

2^ο ΚΟΙΝΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ ΕΥΕ - ΕΕΔΥΠ



12^ο ΕΛΛΗΝΙΚΗΣ ΥΔΡΟΤΕΧΝΙΚΗΣ
ΕΝΩΣΗΣ (ΕΥΕ)



8^ο ΕΛΛΗΝΙΚΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ ΓΙΑ ΤΗ
ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ (ΕΕΔΥΠ)

ΣΥΝΔΙΟΡΓΑΝΩΣΗ



ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΟ
ΔΙΚΤΥΟ
«ΥΔΡΟΚΡΙΤΗΣ»



ΤΕΧΝΙΚΟ ΕΠΙΜΕΛΗΤΗΡΙΟ ΕΛΛΑΔΑΣ

ΤΜΗΜΑ
ΔΥΤΙΚΗΣ
ΕΛΛΑΔΑΣ

Υπό την αιγίδα του Πανεπιστημίου Πατρών και της Περιφέρειας Δυτικής Ελλάδας

ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΑΕΙΦΟΡΟ ΑΝΑΠΤΥΞΗ

ΠΡΑΚΤΙΚΑ



Επιμέλεια έκδοσης:
Παναγιώτης Χρ. Γιαννόπουλος και Αθανάσιος Α. Δήμας
ΠΑΤΡΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2012

Για την επιμέλεια έκδοσης υπογράφουν οι:
Παναγιώτης Χρ. Γιαννόπουλος, Αναπληρωτής Καθηγητής, και
Αθανάσιος Α. Δήμας, Αναπληρωτής Καθηγητής

Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών
Πολυτεχνική Σχολή
Πανεπιστήμιο Πατρών
265 04 Πάτρα
Πάτρα, Οκτώβριος 2012

Η ηλεκτρονική αναπαραγωγή των εργασιών έχει γίνει από τα τελικώς αποδεκτά αρχεία
μετά από κρίση και την ευθύνη για το υλικό κάθε εργασίας έχουν οι συγγραφείς της

ΟΡΓΑΝΩΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

▪ *Εργαστήρια Τεχνολογίας του Περιβάλλοντος και Υδραυλικής Μηχανικής Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών & Δίκτυο «ΥΔΡΟΚΡΙΤΗΣ» Πανεπιστημίου Πατρών*

Γιαννόπουλος Π., Αν. Καθηγητής, Πρόεδρος Συνεδρίου
 Δήμας Αθ., Αν. Καθηγητής, Ταμίας Συνεδρίου
 Τσώνης Στ., Αν. Καθηγητής, Γραμματέας Συνεδρίου
 Δημητρακόπουλος Αλ., Καθηγητής
 Καλέρης Β., Καθηγητής
 Λαγγούσης Α., Λέκτορας (υπό διορισμό)
 Μαναριώτης Ι., Λέκτορας
 Χορς Γ., Επίκ. Καθηγητής
 Χρυσικόπουλος Κ., Καθηγητής

▪ *Ελληνική Υδροτεχνική Ένωση (ΕΥΕ)*

Γιαννόπουλος Στ., Ομότιμος Καθηγητής Α.Π.Θ., Πρόεδρος Ε.Υ.Ε.
 Θεοδοσίου Ν., Επίκ. Καθηγητής Τμήμ. Πολ. Μηχ. Α.Π.Θ., Γ.Γ. Ε.Υ.Ε.
 Μπαμπατζιμόπουλος Χρ., Καθηγητής Γεωπον. Σχολής Α.Π.Θ., Αντιπρόεδρος Ε.Υ.Ε.

▪ *Ελληνική Επιτροπή για τη Διαχείριση Υδατικών Πόρων (ΕΕΔΥΠ)*

Τσιχριντζής Β., Καθηγητής Τμήμ. Μηχ. Περιβάλλ. Δ.Π.Θ., Πρόεδρος Ε.Ε.Δ.Υ.Π.
 Καρατζάς Γ., Καθηγητής Τμήμ. Μηχ. Περιβάλλοντος Πανεπ. Κρήτης
 Τσακίρης Γ., Καθηγητής Σχολής Αγρον. & Τοπογρ. Μηχ. Ε.Μ.Π.

▪ *Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας – Τμήμα Δυτικής Ελλάδας (ΤΕΕ/ΤΔΕ)*

Γιανναδάκης Αθ., Δρ. Μηχανολόγος Μηχανικός, Πρόεδρος
 Χάραρη Ακριβή, Πολιτικός Μηχανικός, μέλος Δ.Ε.

ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ ΟΡΓΑΝΩΤΙΚΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ

Γαλάνη Κ., Πολ. Μηχ., Μ.Δ.Ε., Υποψ. Διδάκτωρ
 Ζιώγας Αλ., Πολ. Μηχ., Μ.Δ.Ε., Υποψ. Διδάκτωρ
 Κολοκυθάς Γ., Πολ. Μηχ., Μ.Δ.Ε., Υποψ. Διδάκτωρ
 Κουτρουβέλη Θ., Πολ. Μηχ., Μ.Δ.Ε., Υποψ. Διδάκτωρ
 Λευθεριώτης Γ., Μηχανολ. Μηχ., Μ.Δ.Ε., Υποψ. Διδάκτωρ
 Μπεκρή Ε., Πολ. Μηχ., Μ.Δ.Ε., Υποψ. Διδάκτωρ
 Μπλούτσος Α., Πολ. Μηχ., Μ.Δ.Ε., Διδάκτωρ
 Πασαπόρτη Χρ., Μηχ. Χωροτ., Πολεοδ. & Περιφερ. Ανάπτυξης, Μ.Δ.Ε.
 Πλέγα Χρ., Πολ. Μηχ., Μ.Δ.Ε.
 Ποδηματά Μ., Περιβαλλοντολόγος, Μ.Δ.Ε., Υποψ. Διδάκτωρ
 Συγγούνα Β., Περιβαλλοντολόγος, Μ.Δ.Ε., Διδάκτωρ
 Φονιάς Ε., Πολ. Μηχ., Μ.Δ.Ε., Υποψ. Διδάκτωρ
 Φουρνιώτης Ν., Πολ. Μηχ., Μ.Δ.Ε., Διδάκτωρ

Γραμματειακή υποστήριξη Συνεδρίου: Θεανώ Σαμπανιώτη, τηλ. 2610 996599

ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Αγγελάκης Α., Δρ. Ινστιτούτο Ηρακλείου, Εθνικό Ίδρυμα Αγροτικών Ερευνών
 Αγγελίδης Παν., Επίκ. Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δ.Π.Θ.
 Αγγελόπουλος Γ., Καθηγητής, Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Π.Π.
 Αϊβαζίδης Α., Καθηγητής, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Δ.Π.Θ.
 Αναστασιάδου – Παρθενίου Ε., Ομότιμη Καθηγήτρια Α.Π.Θ.
 Ανδρεαδάκης Ανδ., Καθηγητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π.
 Αντωνόπουλος Βασ., Καθηγητής, Γεωπονική Σχολή, Α.Π.Θ.
 Αργυρίου Αθ., Αναπλ. Καθηγητής, Τμήμα Φυσικής, Π.Π.
 Βαφειάδης Μ., Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ.
 Βουδούρης Κ., Επίκ. Καθηγητής, Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ.
 Βουδριάς Ε., Καθηγητής, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Δ.Π.Θ.
 Γείτονας Αθ., Καθηγητής, Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Α.Π.Θ.
 Γεωργιάδης Θεόδ., Ομότιμος Καθηγητής Π.Π.
 Γεωργίου Πανταζής, Λέκτορας, Γεωπονική Σχολή, Α.Π.Θ.

Γιαννόπουλος Ανδρ., Επίκ. Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολογίας, Τ.Ε.Ι. Πατρών
 Γιαννόπουλος Παν., Αναπλ. Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Π.Π.
 Γιαννόπουλος Στ., Ομότιμος Καθηγητής Α.Π.Θ., Πρόεδρος Ε.Υ.Ε.
 Γκανούλης Ιάκ., τ. Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ.
 Γκίκας Γ. Δ., Λέκτορας, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Δ.Π.Θ.
 Γρηγορόπουλος Σωτ., Ομότιμος Καθηγητής Π.Π.
 Δήμας Αθ., Αναπλ. Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Π.Π.
 Δημητρακόπουλος Αλ., Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Π.Π.
 Διαμαντής Ιωάννης, Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δ.Π.Θ.
 Διαμαντόπουλος Ευάγ., Καθηγητής, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Π.Κ.
 Ευαγγελίδης Χρ., Αναπλ. Καθηγητής, Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Α.Π.Θ.
 Ζήσης Θωμ., Καθηγητής, Γεωπονική Σχολή, Α.Π.Θ.
 Ζουμπούλης Α., Καθηγητής, Τμήμα Χημείας, Α.Π.Θ.
 Θεοδοσίου Ν., Επίκ. Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ., Γ.Γ. Ε.Υ.Ε.
 Καλέρης Βασ., Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Π.Π.
 Καλύβας Δ., Επίκ. Καθηγητής, Γ.Π.Α.
 Κανακούδης Β., Επίκ. Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Π.Π.
 Καραμπάς Θ., Αναπλ. Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ.
 Καραμούζης Δ., Καθηγητής, Γεωπονική Σχολή, Α.Π.Θ.
 Καραντούνιας Γ., τ. Καθηγητής, Γ.Π.Α.
 Καρατζάς Γ., Καθηγητής, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Π.Κ.
 Καρπούζος Δημήτριος, Λέκτορας, Γεωπονική Σχολή, Α.Π.Θ.
 Κατσιφάρακης Κων., Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ.
 Κερκίδης Π., Καθηγητής, Γ.Π.Α.
 Κρεστενίτης Ι., Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ.
 Κορφιάτης Γ., Καθηγητής, Stevens Inst. of Technology, New Jersey, USA
 Κούγκολος Α., Καθηγητής, Τμήμα Μηχ. Χωροτ. και Περιφ. Ανάπτυξης Π.Θ.
 Κουτσογιάννης Δημ., Καθηγητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π.
 Κωτσοβίνος Νικ., Ομότιμος Καθηγητής Δ.Π.Θ.
 Λαγγούσης Ανδρ., Λέκτορας (υπό διορισμό), Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Π.Π.
 Λαμπράκης Νικ., Καθηγητής, Τμήμα Γεωλογίας, Π.Π.
 Λατινόπουλος Περ., Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ.
 Λέκκας Θεμ., Ομότιμος Καθηγητής Π.Αιγαίου
 Λιακόπουλος Αντ., Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Π.Π.
 Λιβανίου – Τηνιακού Αργ., Επίκ. Καθηγήτρια, Τμήμα Βιολογίας, Π.Π.
 Λουκάς Αθ., Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Π.Π.
 Λυμπεράτος Γερ., Καθηγητής, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π.
 Μακρόπουλος Χ., Λέκτορας, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π.
 Μαναριώτης Ι., Λέκτορας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Π.Π.
 Μέμος Κων., Καθηγητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π.
 Μιμίκου Μαρ., Καθηγήτρια, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π.
 Μουτσόπουλος Κ., Επίκ. Καθηγητής, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Δ.Π.Θ.
 Μπέλλος Κ., Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δ.Π.Θ.
 Μπαμπατζιμόπουλος Χρ., Καθηγητής, Γεωπονική Σχολή, Α.Π.Θ., Αντιπρόεδρος Ε.Υ.Ε.
 Μπλούτσος Αντ., Καθηγητής, Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ.
 Μυλόπουλος Ι., Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ.
 Μυλόπουλος Νικ., Αναπλ. Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Π.Π.
 Νάνου – Γιάνναρου Αικ., Λέκτορας, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π.
 Νουτσόπουλος Κων., Λέκτορας, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π.
 Οικονόμου Ευστ., Λέκτορας, Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Α.Π.Θ.
 Παναγούλια Διον., τ. Επίκ. Καθηγήτρια, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π.
 Πανώρας Αθ., Δρ., Εθνικό Ίδρυμα Αγροτικής Έρευνας (ΕΘΙΑΓΕ)
 Παπαθεοδώρου Γ., Αναπλ. Καθηγητής, Τμήμα Γεωλογίας, Π.Π.
 Παπαμχαήλ Δ., Καθηγητής, Γεωπονική Σχολή, Α.Π.Θ.
 Παπανικολάου Παν., Επίκ. Καθηγητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π.
 Παπαστεργιάδου Ευανθ., Επίκ. Καθηγήτρια, Τμήμα Βιολογίας, Π.Π.
 Παρισόπουλος Γ., Δρ., Εθνικό Ίδρυμα Αγροτικής Έρευνας (ΕΘΙΑΓΕ)
 Πεταλάς Χ., Επίκ. Καθηγητής, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Δ.Π.Θ.
 Πλιάκας Φ.-Κ., Αναπλ. Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δ.Π.Θ.
 Πρίνος Παν., Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ.

Σακελλαρίου – Μακραντωνάκη Μ., Καθηγήτρια, Τμήμα Γεωπονίας, Φυτ. Παραγ. και Αγροτ. Περιβάλλ., Π.Θ.
 Σαμαράς Γρ., Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής, Αλεξάνδρειο Τ.Ε.Ι. Θεσσαλονίκης
 Σαουντζής Μ., Επίκ. Καθηγητής, Σχολή Δασολογίας, Α.Π.Θ., Ταμίας Ε.Υ.Ε.
 Σιδηρόπουλος Επαμ., Αναπλ. Καθηγητής, Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Α.Π.Θ.
 Σκαρλάτος Π., Καθηγητής, Dep. of Civil, Environ. & Geomatics Engineering, Florida Atlantic University
 Σκούρας Δημ., Καθηγητής, Τμήμα Οικονομικών Επιστημών, Π.Π.
 Στάμου Αναστ., Καθηγητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π.
 Στεφανίδης Παναγιώτης, Αναπλ. Καθηγητής, Σχολή Δασολογίας & Φυσικού Περιβάλλοντος, Α.Π.Θ.
 Συλαίος Γ., Επίκ. Καθηγητής, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Δ.Π.Θ.
 Τερζίδης Γ., Ομότιμος Καθηγητής Α.Π.Θ.
 Τζιμόπουλος Χρ., Ομότιμος Καθηγητής Α.Π.Θ.
 Τολίκας Δ., Ομότιμος Καθηγητής Α.Π.Θ.
 Τσακίρης Γ., Καθηγητής, Σχολή Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών, Ε.Μ.Π.
 Τσιχριντζής Βασ., Καθηγητής, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Δ.Π.Θ., Πρόεδρος Ε.Ε.Δ.Υ.Π.
 Τσώνης Στ., Αναπλ. Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Π.Π.
 Χατζηθεοδώρου Χρ., Ομότιμος Καθηγητής Π.Π.
 Χρηστάνης Κίμων, Καθηγητής, Τμήμα Γεωλογίας, Π.Π.
 Χριστοδούλου Γ., Καθηγητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π.
 Χορς Γ., Επίκ. Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Π.Π.
 Χρυσάνθου Β., Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δ.Π.Θ.
 Χρυσικόπουλος Κ., Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Π.Π.
 Ψιλοβίκος Α., Επίκ. Καθηγητής, Τμήμα Γεωπονίας, Ιχθυολογίας & Υδάτινου Περιβάλλοντος, Π.Θ.

ΚΡΙΤΕΣ ΑΡΘΡΩΝ ΣΥΝΕΔΡΙΟΥ

Αϊβαζίδης Α., Καθηγητής, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Δ.Π.Θ.
 Αντωνόπουλος Βασ., Καθηγητής, Γεωπονική Σχολή, Α.Π.Θ.
 Βασιλειάδου Ι., Δρ. Materials Science and Eng. and Chemical Eng. Dept., Univ. Carlos III de Madrid
 Βαφειάδης Μ., Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ.
 Βουδριάς Ε., Καθηγητής, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Δ.Π.Θ.
 Γεωργιάδης Θεόδ., Ομότιμος Καθηγητής Π.Π.
 Γιαννόπουλος Ανδρ., Επίκ. Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολογίας, Τ.Ε.Ι. Πατρών
 Γιαννόπουλος Παν., Αναπλ. Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Π.Π.
 Γιαννόπουλος Στ., Ομότιμος Καθηγητής Α.Π.Θ., Πρόεδρος Ε.Υ.Ε.
 Δήμας Αθ., Αναπλ. Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Π.Π.
 Δημητρακόπουλος Αλ., Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Π.Π.
 Διαμαντόπουλος Ευάγ., Καθηγητής, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Π.Κ.
 Δόκου Ζωή, Δρ., Ερευνήτρια, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Π.Κ.
 Ζήσης Θωμ., Καθηγητής, Γεωπονική Σχολή, Α.Π.Θ.
 Θεοδοσίου Ν., Επίκ. Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ., Γ.Γ. Ε.Υ.Ε.
 Θεοχάρης Μεν., Επίκ. Καθηγητής, Τ.Ε.Ι. Ηπείρου
 Καλέρης Βασ., Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Π.Π.
 Καλφούντζος Δημ., Αναπλ. Καθηγητής, Τ.Ε.Ι. Λάρισας
 Καραμούζης Δ., Καθηγητής, Γεωπονική Σχολή, Α.Π.Θ.
 Καραμπάς Θ., Αναπλ. Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ.
 Καρατζάς Γ., Καθηγητής, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Π.Κ.
 Κατσιφαράκης Κων., Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ.
 Κουτσογιάννης Δημ., Καθηγητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π.
 Κρεστενίτης Ι., Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ.
 Κωτσοβίνος Νικ., Ομότιμος Καθηγητής Δ.Π.Θ.
 Λαγγούσης Ανδρ., Λέκτορας (υπό διορισμό), Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Π.Π.
 Λέκκας Θεμ., Ομότιμος Καθηγητής Π.Αιγαίου
 Λουκάς Αθ., Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Π.Θ.
 Λυμπεράτος Γερ., Καθηγητής, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π.
 Μακρόπουλος Χ., Λέκτορας, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π.
 Μαναριώτης Ι., Λέκτορας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Π.Π.
 Μελίδης Παρ., Επίκ. Καθηγητής, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Δ.Π.Θ.
 Μέμος Κων., Καθηγητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π.
 Μπαλτάς Ευάγγ., Αναπλ. Καθηγητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π.

Μπαμπατζιμόπουλος Χρ., Καθηγητής, Γεωπονική Σχολή, Α.Π.Θ., Αντιπρόεδρος Ε.Υ.Ε.
 Μυλόπουλος Νικ., Αναπλ. Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Π.Θ.
 Νουτσόπουλος Κων., Λέκτορας, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π.
 Οικονόμου Ευστ., Λέκτορας, Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Α.Π.Θ.
 Παναγούλια Διον., τ. Επίκ. Καθηγήτρια, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π.
 Πανώρας Αθ., Δρ., Εθνικό Ίδρυμα Αγροτικής Έρευνας (ΕΘΙΑΓΕ)
 Παπαθεοδώρου Γ., Αναπλ. Καθηγητής, Τμήμα Γεωλογίας, Π.Π.
 Παπανικολάου Παν., Επίκ. Καθηγητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π.
 Παπαστεργιάδου Ευανθ., Επίκ. Καθηγήτρια, Τμήμα Βιολογίας, Π.Π.
 Παρανυχιανάκης Ν., Λέκτορας, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Π.Κ.
 Πρίνος Παν., Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ.
 Σακελλαρίου – Μακραντωνάκη Μ., Καθηγήτρια, Τμήμα Γεωπονίας, Φυτ. Παραγ. & Αγροτ. Περιβάλλ., Π.Θ.
 Σκαρλάτος Π., Καθηγητής, Dep. of Civil, Environ. & Geomatics Engineering, Florida Atlantic University
 Στάμου Αναστ., Καθηγητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π.
 Τζιμόπουλος Χρ., Ομότιμος Καθηγητής Α.Π.Θ.
 Τσιχριντζής Βασ., Καθηγητής, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Δ.Π.Θ., Πρόεδρος Ε.Ε.Δ.Υ.Π.
 Τσώνης Στ., Αναπλ. Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Π.Π.
 Χατζηγιαννάκης Ευάγγ., Δρ., Ινστιτ. Εγγείων Βελτιώσεων/Ελληνικός Γεωργικός Οργανισμός ‘ΔΗΜΗΤΡΑ’
 Χατζηθεοδώρου Χρ., Ομότιμος Καθηγητής Π.Π.
 Χορς Γ., Επίκ. Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Π.Π.
 Χριστοδούλου Γ., Καθηγητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π.
 Χρυσάνθου Β., Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δ.Π.Θ.
 Χρυσικόπουλος Κ., Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Π.Π.
 Ψιλοβίκος Α., Επίκ. Καθηγητής, Τμήμα Γεωπονίας, Ιχθυολογίας & Υδάτινου Περιβάλλοντος, Π.Θ.

ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΑΡΘΡΩΝ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΦΟΙΤΗΤΩΝ ΠΡΟΣ ΒΡΑΒΕΥΣΗ

Η Επιτροπή Αξιολόγησης άρθρων μεταπτυχιακών φοιτητών προς επιλογή των δύο καλύτερων προς βράβευση απαρτίζεται από τους:

- Γιαννόπουλος Στ., Ομότιμος Καθηγητής Α.Π.Θ., Πρόεδρος Ε.Υ.Ε.
- Δημητρακόπουλος Αλ., Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Π.Π.
- Τσιχριντζής Βασ., Καθηγητής, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Δ.Π.Θ., Πρόεδρος Ε.Ε.Δ.Υ.Π.

Ως κριτήρια αξιολόγησης των εν λόγω άρθρων καθορίζονται:

- ❖ Η πρωτοτυπία της έρευνας,
- ❖ Η συγγραφική ποιότητα του άρθρου και
- ❖ Η ποιότητα της παρουσίασης του άρθρου από το φοιτητή.

Η βαρύτητα εκάστου κριτηρίου είναι στη δικαιοδοσία της ανωτέρω Επιτροπής.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν έντυπο τεύχος των Πρακτικών περιέχει τις Περιλήψεις των άρθρων που έχουν γίνει αποδεκτά μετά από κρίση για παρουσίαση και συμπερίληψη στα ηλεκτρονικά Πρακτικά του 2^{ου} Κοινού Συνεδρίου της Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης (Ε.Υ.Ε.) και της Ελληνικής Επιτροπής για τη Διαχείριση Υδατικών Πόρων (Ε.Ε.Δ.Υ.Π.). Στην Οργανωτική Επιτροπή του Συνεδρίου συμμετείχαν, πέραν της Ε.Υ.Ε. και της Ε.Ε.Δ.Υ.Π., το Δίκτυο ΥΔΡΟΚΡΙΤΗΣ, το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών και τα Εργαστήρια Τεχνολογίας του Περιβάλλοντος και Υδραυλικής Μηχανικής, καθώς και το Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας/Τμήμα Δυτικής Ελλάδας.

Το 2^ο Κοινό Συνέδριο της ΕΥΕ και ΕΕΔΥΠ σκοπεύει να συμβάλλει στην ανταλλαγή γνώσεων και εμπειριών μεταξύ επιστημόνων διαφόρων ειδικοτήτων που ασχολούνται σε δημόσιους και ιδιωτικούς φορείς με θέματα διαχείρισης υδατικών πόρων, συνδεδεμένα με την ορθολογική και αιεφόρο ανάπτυξη των περιοχών, με ιδιαίτερη έμφαση στην καινοτομία και την πρακτική εφαρμογή. Επίσης, το Συνέδριο αυτό, επιθυμώντας να αναδείξει την συνεισφορά των νέων επιστημόνων, καθιέρωσε την βράβευση των δύο καλύτερων εργασιών μεταπτυχιακών φοιτητών που παρουσιάστηκαν αυτοδυνάμως ή με έως δύο επιβλέποντες συν-συγγραφείς.

Συνολικά, έγιναν αποδεκτά 107 άρθρα (από 131 αρχικώς υποβληθέντα) για παρουσίαση και συμπερίληψη στα Πρακτικά του Συνεδρίου, τα οποία υπάγονται στις εξής θεματικές ενότητες:

- Υδρολογία – Μετεωρολογία – Κλιματική αλλαγή
- Υδραυλική – Μηχανική των ρευστών
- Διαχείριση υδατικών πόρων – Υδραυλικά έργα – Οικονομία
- Διαχείριση υδρολογικών λεκανών – Λήψη αποφάσεων
- Διαχείριση υγρών και στερεών αποβλήτων – Τεχνολογίες επεξεργασίας και καθαρισμού υδάτων – Υδροβιότοποι
- Περιβαλλοντική υδραυλική – Υδροδυναμική
- Γεωργική υδραυλική
- Υδραυλική υπογείων υδάτων – Υδρογεωλογία
- Ακτομηχανική – Διαχείριση παράκτιων περιοχών
- Προσομοίωση και βελτιστοποίηση υδατικών πόρων – Βάσεις δεδομένων – Γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών.

Ο αριθμός των εργασιών που τελικώς έγιναν δεκτές, η ποιότητα των εργασιών και το ενδιαφέρον συμμετοχής στο Συνέδριο αποδεικνύουν την επίτευξη των στόχων του Συνεδρίου.

Επιπροσθέτως, στον ενδιάμεσο ελεύθερο χώρο του Συνεδριακού Κέντρου του Πανεπιστημίου Πατρών, όπου διεξήχθησαν οι εργασίες του Συνεδρίου, οργανώθησαν εκθεσιακά περίπτερα επίδειξης δραστηριοτήτων μελετών, λογισμικών και συσκευών σχετικών με την διαχείριση των υδατικών πόρων και των υδρολογικών λεκανών.

Ευχαριστίες απευθύνονται ιδιαιτέρως προς το Πανεπιστήμιο Πατρών και την Περιφέρεια Δυτικής Ελλάδας υπό την αιγίδα των οποίων διεξήχθη το Συνέδριο, τα Διοικητικά Συμβούλια της Ε.Υ.Ε. και της Ε.Ε.Δ.Υ.Π. καθώς και τους Προέδρους κκ. Σταύρο Γιαννόπουλο και Βασίλειο Τσιχριντζή για την άψογη συνεργασία, την Επιστημονική Επιτροπή και ιδιαιτέρως τους κριτές για την συνεισφορά τους στις κρίσεις των άρθρων ώστε να διατηρηθεί υψηλό το επιστημονικό επίπεδο του Συνεδρίου, όλα τα μέλη της Οργανωτικής Επιτροπής, τους συμμετέχοντες στα Προεδρεία των Συνεδρίων και τους φοιτητές που στήριξαν την άρτια οργάνωση του Συνεδρίου και, ασφαλώς, τους χορηγούς για την οικονομική και υλική προσφορά τους, η οποία ήταν ιδιαίτερος πολύτιμη στην υφιστάμενη δυσμενή οικονομική συγκυρία.

Πάτρα, Οκτώβριος 2012

Παναγιώτης Χρ. Γιαννόπουλος
Αναπληρωτής Καθηγητής
Πρόεδρος Οργανωτικής Επιτροπής
Συντονιστής Δικτύου ΥΔΡΟΚΡΙΤΗΣ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

α/α	ΤΙΤΛΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ Συγγραφείς	Σελ.
A. ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ – ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑ – ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ		
A01	ΑΠΛΟΠΟΙΗΜΕΝΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΤΗΣ ΕΞΙΣΩΣΗΣ PENMAN ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΤΗΣ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΑΠΟ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΕΝΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ Βαλιάντζας Ι. Δ.	3
A02	ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ ΣΕ ΦΥΣΙΚΟ ΑΝΑΓΛΥΦΟ Μπέλλος Β., Τσακίρης Γ.	12
A03	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ ΣΤΟΝ ΚΑΘΟΡΙΣΜΟ ΤΩΝ ΟΜΒΡΙΩΝ ΚΑΜΠΥΛΩΝ Τέρτη Γ., Γαλιατσάτου Π., Πρίνος Π.	25
A04	ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΗΣ ΔΙΑΚΙΝΔΥΝΕΥΣΗΣ ΤΩΝ ΥΔΑΤΟΡΡΕΥΜΑΤΩΝ ΤΩΝ Β ΚΑΙ ΒΑ ΚΛΙΤΥΩΝ ΤΗΣ ΟΣΣΑΣ Κωτσόπουλος Σπ., Αλεξίου Ι., Λόκκας Φ., Γραβάνης Γ., Μπαλτάς Ε., Μαγαλιός Στ.	36
A05	ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ ΚΑΙ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΥΔΡΟΔΟΤΗΣΗ Βαφειάδης Μ., Σπάχος Θ., Κατσιφαράκης Κ.	46
A06	ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΤΩΝ ΚΛΙΜΑΤΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΩΝ ΣΤΟ ΥΔΑΤΙΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΤΗΣ ΛΙΜΝΗΣ ΚΑΡΛΑΣ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΔΟ 2070-2100 Τζώρτζης Ι., Χαλκίδης Ηρ.	54
A07	Ο ΡΟΛΟΣ ΤΗΣ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΑΡΔΕΥΣΗΣ: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ “ENORASIS” Καζαντζίδης Α., Κιουτσιούκης Ι., Αργυρίου Αθ.	67
A08	ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΕΩΝ ΣΕ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΕΣ ΛΕΚΑΝΕΣ ΜΕ ΕΝΑΝ ΒΡΟΧΟΜΕΤΡΙΚΟ ΣΤΑΘΜΟ ΚΑΙ ΧΡΗΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΑΠΟΡΡΟΗΣ Λαγγούσης Α., Καλέρης Β.	75
B. ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ – ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ		
B01	ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ Χρυσοχοϊδης Δ. Α., Σούλης Ι. Β., Φυτανίδης Δ. Κ.	83
B02	ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΟ ΦΡΑΓΜΑ ΘΗΣΑΥΡΟΥ Σούλης Ι. Β., Κατηρτζόγλου Αλ. Κ.	95
B03	ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΡΕΥΜΑΤΩΝ ΘΟΛΟΤΗΤΑΣ ΣΤΑΘΕΡΟΥ ΟΓΚΟΥ ΣΤΗ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΤΗΣ ΑΡΧΙΚΗΣ ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΣΥΣΤΑΣΗΣ Γεωργουλιάς Α., Κοπασάκης Κ., Αγγελίδης Π., Κωτσοβίνος Ν.	107
B04	ΜΑΚΡΟΤΡΑΧΥΤΗΤΑ ΛΟΓΩ ΒΥΘΙΣΜΕΝΩΝ ΕΜΠΟΔΙΩΝ ΣΕ ΑΝΟΙΚΤΟ ΑΓΩΓΟ Χριστοδούλου Γ. Χ.	120
B05	ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΥΡΒΩΔΟΥΣ ΡΟΗΣ ΣΕ ΑΝΟΙΚΤΟ ΑΓΩΓΟ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΕΓΚΑΡΣΙΟ ΠΡΟΒΟΛΟ Κουτρουβέλη Θ. Ι., Φουρνιώτης Ν. Θ., Δημητρακόπουλος Αλ. Κ., Δήμας Αθ. Α.	130

B06*	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ 3D ΡΟΗΣ ΣΕ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟ ΚΛΕΙΣΤΟ ΑΓΩΓΟ Αλεξίου Ν. Α., Σούλης Ι. Β., Φυτανίδης Δ. Κ.	142
B07	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΥΡΒΩΔΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΡΟΗΣ ΥΠΕΡΑΝΩ ΠΥΘΜΕΝΑ ΜΕ Η ΧΩΡΙΣ ΦΥΤΟΚΑΛΥΨΗ Πεχλιβανίδης Γ.Η., Κεραμάρης Ε., Πεχλιβανίδης Η.Γ.	154
B08	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΤΥΡΒΩΔΟΥΣ ΑΝΩΣΤΙΚΗΣ ΦΛΕΒΑΣ ΣΕ ΚΙΝΟΥΜΕΝΟ ΑΠΟΔΕΚΤΗ Μπλούτσος Αρ. Α., Γιαννόπουλος Π. Χρ.	165
B09	ΕΞΑΠΛΩΣΗ ΦΛΕΒΑΣ ΒΑΡΥΤΕΡΗΣ ΤΟΥ ΑΠΟΔΕΚΤΗ ΣΕ ΚΛΙΜΕΝΟ ΠΥΘΜΕΝΑ Χριστοδούλου Γ., Νικηφοράκης Ι., Παπακωνσταντής Η.	176
B10	ΑΝΑΜΕΙΞΗ ΣΕ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΕΝΟ ΑΠΟΔΕΚΤΗ ΑΠΟ ΤΥΡΒΩΔΗ ΑΝΩΣΤΙΚΗ ΦΛΕΒΑ ΜΕ ΤΕΧΝΙΚΕΣ LASER Παππάς Ηλ. Δ., Παπανικολάου Π. Ν.	188
B11	ΠΥΚΝΟΜΕΤΡΙΚΗ ΣΤΡΩΜΑΤΩΣΗ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΑΝΑΜΕΙΞΗΣ ΑΝΩΣΤΙΚΗΣ ΦΛΕΒΑΣ ΣΕ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΕΝΟ ΑΠΟΔΕΚΤΗ Δέσκος Γ. Β., Δημητριάδης Π. Γ., Παπανικολάου Π. Ν.	200
B12	ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ VOF Φυτανίδης Δ. Κ., Σούλης Ι. Β.	212

Γ. ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ – ΥΔΡΑΥΛΙΚΑ ΕΡΓΑ – ΟΙΚΟΝΟΜΙΑ

Γ01	Ο ΡΟΛΟΣ ΤΗΣ ΧΡΕΩΣΗΣ ΠΑΓΙΟΥ ΣΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΩΝ ΜΕΙΩΣΗΣ ΤΟΥ ΜΗ ΑΝΤΑΠΟΔΟΤΙΚΟΥ ΝΕΡΟΥ Κανακούδης Β., Τσιτσιφλή Σ.	227
Γ02	ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΟΦΕΛΟΥΣ : ΜΙΑ ΚΡΙΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΟΥ ΑΣΩΠΟΥ Τέντες Γ., Δαμίγος Δ.	240
Γ03	ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΥΔΡΕΥΣΗΣ ΑΠΟ ΤΙΣ Δ.Ε.Υ.Α. ΤΩΝ ΝΟΜΩΝ ΠΕΛΛΑΣ ΚΑΙ ΗΜΑΘΙΑΣ: ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ Γιαννόπουλος Στ., Πέτκου Ολ., Γιαννοπούλου Ι., Τζιμόπουλος Χ.	252
Γ04	ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΡΟΘΥΜΙΑΣ ΠΛΗΡΩΜΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΩΝ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ ΝΕΡΟΥ ΣΤΗΝ ΠΟΛΗ ΤΟΥ ΒΟΛΟΥ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΗΣ ΕΞΑΡΤΗΜΕΝΗΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ Φαφούτης Χρ., Μυλόπουλος Ν.	266
Γ05	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΚΛΙΜΑΤΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΩΝ ΣΤΙΣ ΑΝΑΓΚΕΣ ΣΕ ΝΕΡΟ ΤΩΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΑ ΤΟΥ ΑΡΔΕΥΤΙΚΟΥ ΝΕΡΟΥ Γεωργίου Π.Ε., Παπαμιχαήλ Δ.Μ., Λιάπης Α.Γ.	278
Γ06	ΑΚΡΙΒΗΣ ΧΩΡΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΣΕ ΕΠΙΠΕΔΟ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΟΔΟΥ ΤΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΝΕΡΟΥ ΣΤΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΔΙΚΤΥΩΝ ΥΔΡΕΥΣΗΣ Κανακούδης Β., Γκονέλας Κ.	291
Γ07	Η ΧΩΡΟΤΑΞΙΑ ΤΩΝ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ – ΜΙΑ ΑΠΟΤΥΧΗΜΕΝΗ ΠΡΟΣΠΑΘΕΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ; Οικονόμου Ε.Κ.	303

Δ. ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΛΕΚΑΝΩΝ – ΔΗΨΗ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

- Δ01 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ ΑΝΘΡΩΠΟΓΕΝΩΝ ΠΑΡΕΜΒΑΣΕΩΝ ΣΤΗ ΣΤΑΘΜΗ ΤΗΣ Λ. ΔΟΙΡΑΝΗΣ ΚΑΙ ΣΥΝΤΑΞΗ ΠΙΛΟΤΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΝΑΠΑΠΛΗΡΩΣΗ ΤΗΣ
Μυρωνίδης Δ. 317
- Δ02 ΜΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΕΣ ΠΑΡΕΜΒΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΤΙΠΛΗΜΜΥΡΙΚΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΣΤΟΝ ΔΙΑΚΡΑΤΙΚΟ ΠΟΤΑΜΟ ΕΒΡΟ: Η ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΗΣ ΟΡΘΟΛΟΓΙΚΗΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ
Αγγελίδης Π., Πεταλά Ε., Κώτσικας Μ., Κοπασάκης Κ., Γεωργουλός Α., Κωτσοβίνος Ν. 327
- Δ03 ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΕ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΥΠΟ ΚΑΘΕΣΤΩΣ ΥΠΕΡ-ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ: Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ ΛΙΜΝΗΣ ΚΑΡΛΑΣ
Σιδηρόπουλος Π., Μυλόπουλος Ν. 339
- Δ04* ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΘΕΩΡΙΑΣ ΠΑΙΓΝΙΩΝ ΣΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΜΜΟΧΑΛΙΚΟΛΗΨΙΩΝ ΕΠΙ ΤΟΥ ΑΛΦΕΙΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ
Ποδηματά Μ. Β., Γιαννόπουλος Π. Χρ. 350
- Δ05 ΠΡΩΤΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΥΠΟΛΟΓΙΑΣ ΠΟΤΑΜΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ ΒΑΣΕΙ ΒΙΟΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΙ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ
Παναγόπουλος Π., Χατζηνικολάου Γ. 362
- Δ06 ΚΡΙΣΙΜΑ ΘΕΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΗΣ ΟΔΗΓΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ
Παναγόπουλος Π., Παντελόπουλος Π., Γκίνη Μ., Βαρβέρης Αν., Τριανταφύλλου Αικ., Τασόγλου Σπ., Πλιάκας Θ., Βλάχος Π., Χατζηνικολάου Γ. 376
- Δ07 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΤΩΝ ΠΟΣΟΤΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΕΝΟΣ ΠΑΡΑΚΤΙΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΟΥ ΣΕ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΜΑΚΡΟΧΡΟΝΙΑΣ ΥΠΕΡΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΕΠΕΙΣΟΔΙΩΝ ΞΗΡΑΣΙΑΣ
Γαλαζούλας Ευάγ., Πεταλάς Χρ. 390
- Δ08 Η ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΟΔΗΓΙΑΣ 2000/60/ΕΚ ΣΤΑ ΥΔΑΤΙΚΑ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑΤΑ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ
Μίχας Σ., Νικολάου Κ., Τσιάλας Θ. 400

Ε. ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΓΡΩΝ ΚΑΙ ΣΤΕΡΕΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ – ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ ΥΔΑΤΩΝ – ΥΔΡΟΒΙΟΤΟΠΟΙ

- Ε01 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΜΙΚΡΟΦΥΚΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΜΕΤΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΛΥΜΑΤΩΝ
Αραβαντινού Α.Φ., Θεοδωρακόπουλος Μ.Α., Μαναριώτης Ι.Δ. 415
- Ε02 ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΕΛΑΙΟΤΡΙΒΕΙΟΥ ΜΕ ΑΝΟΙΚΤΕΣ ΜΗ-ΑΕΡΙΖΟΜΕΝΕΣ ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΗΤΟΥΣ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΟΥΣ: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΙΣ ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ
Γκίκας Γ. Δ., Τσακμάκης Ι. Δ., Τσιχριντζής Β. Α. 425
- Ε03 ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΕΝΔΟΚΡΙΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΡΑΚΤΩΝ ΣΕ ΤΕΧΝΗΤΟΥΣ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΟΥΣ: ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ
Παπαευαγγέλου Β., Γκίκας Γ. Δ., Τσιχριντζής Β. Α. 435
- Ε04 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΕΠΙΚΑΘΗΣΕΩΝ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΜΒΡΑΝΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΧΩΡΗΜΕΝΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ
Διαμαντής Β., Αντωνάτος Έκτ., Μήτρακας Μαν., Μελίδης Παρ., Αίβαζίδης Αλ. 447

E05*	ΒΙΩΣΙΜΗ ΧΡΗΣΗ ΡΗΤΙΝΩΝ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗΣ ΝΙΤΡΙΚΩΝ ΑΠΟ ΤΟ ΝΕΡΟ ΥΔΡΕΥΣΗΣ ΣΕ ΜΙΚΡΕΣ ΚΑΙ ΑΠΟΚΕΝΤΡΩΜΕΝΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ Μιμίδης Κ., Διαμαντής Β.	456
E06	ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΑΡΣΕΝΙΚΟΥ ΚΑΙ ΑΝΤΙΜΟΝΙΟΥ ΑΠΟ ΝΕΡΟ ΠΟΥ ΠΡΟΟΡΙΖΕΤΑΙ ΓΙΑ ΠΟΣΗ Σαζακλή Ε., Ζούβελου Στ., Καλαβρουζιώτης Ι., Λεοτσινίδης Μ.	466
E07	ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΩΝ ΑΣΤΙΚΩΝ ΣΤΕΡΕΩΝ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ ΑΠΟ ΤΟΥΣ ΔΗΜΟΥΣ ΤΟΥ ΝΟΜΟΥ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ – ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ Γιαννόπουλος Στ., Πλάκας Κ., Δημούδη Ειρ., Οικονόμου Ευστ.	476
E08	ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΠΙΕΣΗΣ ΕΥΤΡΟΦΙΣΜΟΥ ΣΤΗΝ ΥΠΟ-ΑΝΑΣΥΣΤΑΣΗ ΛΙΜΝΗ ΚΑΡΛΑ: ΕΙΝΑΙ ΕΦΙΚΤΗ Η ‘ΚΑΛΗ ΟΙΚΟΛΟΓΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ’ ΜΕΧΡΙ ΤΟ 2015; Κάγκαλου Ιφ., Κορμάς Κ., Λασπίδου Χ.	489
E09	ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ ΠΑΤΑΤΑΣ (ΑΒΠ) ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΒΙΟΑΙΘΑΝΟΛΗΣ Αράπογλου Δ., Βαρζάκας Θ., Βλυσίδης Α., Δουλιγέρης Χ., Ισραηλίδης Κ.	500
E10	ΥΔΡΕΥΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΧΕΤΕΥΣΗ ΣΤΗ ΜΙΝΩΙΚΗ ΚΡΗΤΗ: ΜΑΘΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΚΑΤΑΘΗΚΕΣ Αγγελάκης Α. Ν.	509

ΣΤ. ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ – ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ

ΣΤ01	ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΕΛΙΚΩΝ ΑΡΑΙΩΣΕΩΝ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΛΥΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΝΟΤΙΟΑΝΑΤΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΖΩΝΗ ΤΟΥ ΠΑΤΡΑΪΚΟΥ ΚΟΛΠΟΥ: ΘΕΡΙΝΗ ΠΕΡΙΟΔΟΣ Φουρνιώτης Ν. Θ., Χορς Γ. Μ.	521
ΣΤ02	ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΜΑΚΡΟΠΡΟΘΕΣΜΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ, ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ ΚΑΙ ΣΥΣΣΩΡΕΥΣΗΣ ΡΥΠΙΩΝ ΤΗΣ ΜΑΥΡΗΣ ΘΑΛΑΣΣΑΣ ΣΤΙΣ ΠΑΡΑΚΤΙΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΤΟΥ Β. ΑΙΓΑΙΟΥ ΜΕΣΩ ΤΩΝ ΣΤΕΝΩΝ ΤΩΝ ΔΑΡΔΑΝΕΛΙΩΝ Κοπασάκης Κ., Γεωργουλός Α., Αγγελίδης Π., Κωτσοβίνος Ν.	533
ΣΤ03*	ΜΕΘΟΛΟΓΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ ΤΑΧΕΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΠΑΡΟΧΗΣ ΠΟΤΑΜΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΟΙΟΤΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ Μπεκρή Ε. Σπ., Disse Μ., Γιαννόπουλος Π. Χρ.	546
ΣΤ04	ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΕΝΟΣ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟΥ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ-ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕΡΩΝ Σπανουδάκη Κ., Στάμου Α., Νάνου-Γιάνναρου Αικ.	558
ΣΤ05	ΥΔΡΟΧΗΜΙΚΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΔΥΤΙΚΗΣ ΚΩΠΑΙΔΑΣ ΣΤΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΕΝΟΣ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ Παναγόπουλος Α., Αραμπατζής Γ., Τζιρίτης Ε., Βρουχάκης Ι., Κασάπη Κ.Α., Χρυσάφη Α.Α., Σταθάκη Σ., Ζάβρα Α.	572
ΣΤ06	ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΡΥΠΙΩΝ ΜΕΣΑ ΣΕ ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟ ΠΟΡΩΔΕΣ ΜΕΣΟ Πλέγα Χρ. Χ., Κατζουράκης Β. Ε., Χρυσικόπουλος Κ. Β.	582
ΣΤ07	ΔΙΑΧΡΟΝΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΤΟΥ ΠΑΤΡΑΪΚΟΥ ΚΟΛΠΟΥ Ντζόλα Β., Σαζακλή Ε., Ζάννης Π., Σκληβανιώτης Μ., Λεοτσινίδης Μ.	595

ΣΤ08	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗΣ ΣΕ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΑΡΟΧΗΣ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΣΤΕΡΕΟΠΑΡΟΧΗΣ ΣΤΟΝ ΠΟΤΑΜΟ ΝΕΣΤΟ Αγγέλης Ι., Χρυσάνθου Βλ.	607
ΣΤ09	ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΥΡΒΩΔΟΥΣ ΡΟΗΣ ΔΙΑΜΕΣΟΥ ΤΥΧΑΙΑ ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΩΝ ΑΚΑΜΠΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ Δημακόπουλος Α. Σ., Ricardo A. M., Γρηγοριάδης Δημ. Γ.Ε., Ferreira R. M.L.	617
ΣΤ10	ΠΗΓΕΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΚΑΙ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΝΕΡΟΥ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ ΛΑΣΠΙΑ Γκίκας Γ. Δ., Κουρτίδου Συμ., Τσιχριντζής Β. Α.	626
ΣΤ11 *	ΔΙΕΡΕΥΝΩΝΤΑΣ ΤΗΝ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΚΑΙΝΟΤΟΜΩΝ ΚΟΧΛΙΩΤΩΝ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΩΝ Στεργιοπούλου Άλκ., Καλκάνη Ευφρ.	637
ΣΤ12	ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΠΟΙΟΤΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΟΥ ΑΡΔΕΥΤΙΚΟΥ ΝΕΡΟΥ ΤΗΣ ΔΗΜΟΤΙΚΗΣ ΕΝΟΤΗΤΑΣ ΑΜΒΡΑΚΙΚΟΥ ΤΟΥ ΔΗΜΟΥ ΑΡΤΑΙΩΝ Θεοχάρης Μ., Μυριούνης Χ., Σιάνου Α.	648
ΣΤ13	ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ, ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΑΡΔΕΥΤΙΚΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΕ ΝΗΣΙΩΤΙΚΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ Μαλάμος Ν., Παγανέλης Γ.	660
ΣΤ14	ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΑΠΟΣΤΡΩΜΑΤΩΣΗΣ ΜΕ ΔΙΑΧΥΣΗ ΑΕΡΑ ΤΟΥ ΥΔΡΟΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ ΔΙΠΟΤΑΜΟΥ – ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥΠΟΛΗΣ Μήτρακας Μ., Κακαλής Χ., Στυλιανού Σ., Καπράρα Ε., Σαμαράς Π., Ζουμπούλης Α.Ι.	670
ΣΤ15	ΑΠΟΛΗΨΗ ΠΟΣΙΜΟΥ ΝΕΡΟΥ ΑΠΟ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΕΣ ΠΗΓΕΣ: ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΣΤΗ ΣΤΟΥΠΑ ΜΕΣΣΗΝΙΑΣ Παπακωνσταντής Η. Γ., Παπανικολάου Π. Ν., Καστρινάκης Ε. Γ.	682
ΣΤ16	ΔΙΑΦΥΓΕΣ ΡΕΥΣΤΩΝ ΑΠΟ ΤΟΝ ΠΥΘΜΕΝΑ ΤΩΝ ΘΑΛΑΣΣΩΝ ΤΗΣ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ: ΕΝΑ ΠΑΝΟΡΑΜΑ Παπαθεοδώρου Γ., Χριστοδούλου Δ., Ετιορε Γ., Γεραγά Μ., Φερεντίνος Γ., Κορδέλλα Σ.	694

Z. ΓΕΩΡΓΙΚΗ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ

Z01	ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΣΥΝΘΕΤΟΥ ΣΥΜΒΙΒΑΣΤΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΦΡΑΓΜΑ ΟΛΥΝΘΙΟΥ. Τζιμόπουλος Χ., Ευαγγελίδης Χ., Μπαλιώτη Β.	709
Z02 *	ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΑΝΤΙΠΛΗΓΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΤΩΝ ΥΠΟ ΠΙΕΣΗ ΑΡΔΕΥΤΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ Ανυφαντής Β., Τζιμόπουλος Χ., Γιαννόπουλος Στ.	719
Z03	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ TOPSIS ΣΕ ΑΡΔΕΥΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΤΟΥ ΤΟΕΒ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ Τζιμόπουλος Χ.	733
Z04	ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΙΚΟΥ ΝΕΡΟΥ ΜΕ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ SWBACROS ΣΕ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΒΑΜΒΑΚΙΟΥ ΣΕ ΛΥΣΙΜΕΤΡΑ Παρασκευάς Χ., Γεωργίου Π., Ηλίας Α., Πανώρας Α., Μπαμπατζιμόπουλος Χ.	744
Z05	ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΑΡΔΕΥΤΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΠΛΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΑΡΔΕΥΤΙΚΟ ΕΡΓΟ ΛΑΜΑΡΗΣ ΠΡΕΒΕΖΑΣ Θεοχάρης Μ. Ε., Σιάνου Α. Δ.	756

Z06	ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΣΤΑΘΕΡΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΚΑΙ ΥΠΟΓΕΙΑ ΕΙΣΡΟΗ ΣΕ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΚΑΙ ΑΣΤΑΘΟΥΣ ΣΤΡΑΓΓΙΣΗΣ Καραμούζης Δ.Ν., Γεωργίου Π.Ε., Καρπούζος Δ.Κ.	767
Z07	ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΡΔΕΥΤΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΜΕ ΤΗ ΒΟΗΘΕΙΑ ΤΟΥ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ - ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΑΡΔΕΥΤΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ ΤΟΥ Τ.Ο.Ε.Β. ΠΗΝΕΙΟΥ Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη Μ., Τζιμόπουλος Χ., Γιουβάνης Β.	780
Z08	ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΑΡΔΕΥΣΗΣ Σακελλαρίου – Μακραντωνάκη Μ., Τζιμόπουλος Χ., Νάκας Χ., Καρατάσιου Ε., Παπανικολάου Χ.	791
Z09	ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΔΙΟΔΕΥΣΗΣ ΤΗΣ ΣΕ ΔΙΚΤΥΟ ΣΤΡΑΓΓΙΣΤΙΚΩΝ ΤΑΦΡΩΝ Παντελάκης Δ., Ζήσης Θ., Αναστασιάδου-Παρθενίου Ε., Μπαλτάς Ε.	802
Z10	ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΔΙΔΙΑΣΤΑΤΩΝ ΚΑΙ ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΣΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΕΔΑΦΙΚΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΕ ΚΑΛΛΙΕΡΓΟΥΜΕΝΟ ΑΓΡΟ ΜΕ ΣΤΑΓΔΗΝ ΑΡΔΕΥΣΗ Κωτσόπουλος Στ. Α., Αντωνόπουλος Β. Ζ.	815
Z11	ΣΧΕΣΗ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΤΟΜΑΤΑΣ Καλφούντζος Δ., Κόκκορα Μ., Βύρλας Π.	825
Z12	ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΒΑΘΕΙΑ ΔΙΗΘΗΣΗ ΣΕ ΑΚΑΛΛΙΕΡΓΗΤΟ ΕΔΑΦΟΣ ΜΕ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ MACRO Κολοτούρος Χ.Α., Αντωνόπουλος Β.Ζ., Γεωργίου Π.Ε.	834
Z13	ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΤΑΤΟΜΩΝ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΚΑΤΩ ΑΠΟ ΤΡΕΙΣ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΗΤΙΚΕΣ ΜΕΤΑΧΕΙΡΙΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΑΝΩΤΕΡΗ ΕΔΑΦΙΚΗ ΣΤΡΩΣΗ Κάργας Γ., Λαμπροπούλου Α., Κερκίδης Π.	847
Z14	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΥΟ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΤΗΣ ΑΛΑΤΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΙΚΟΥ ΔΙΑΛΥΜΑΤΟΣ ΑΠΟ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΣΥΣΚΕΥΩΝ Κάργας Γ., Χριστοφίδου Δ., Κερκίδης Π.	858
Z15	Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΗΤΙΚΩΝ ΜΕΤΑΧΕΙΡΙΣΕΩΝ ΣΤΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΩΝ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΤΗΣ ΑΝΩΤΕΡΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ Κάργας Γ., Κερκίδης Π.	870

Η. ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ – ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑ

H01	ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΙΩΝ ΣΕ ΚΟΡΕΣΜΕΝΑ ΠΟΡΩΔΗ ΜΕΣΑ: ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ (ΜΕΓΕΘΟΣ ΠΟΡΩΔΟΥΣ ΜΕΣΟΥ, ΕΝΔΟΠΟΡΩΔΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑ, ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΚΟΛΛΟΕΙΔΩΝ) Συγγούνα Β. Η., Χρυσικόπουλος Κ. Β.	883
H02	ΧΡΗΣΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΜΗΝΟΥΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΝΕΥΡΩΝΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΥΠΟΓΕΙΑ ΥΔΑΤΑ Ταπόγλου Ευδ., Τριχάκης Ι. Χ., Δόκου Ζ., Καρατζάς Γ. Π.	896
H03	ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ ΣΤΗ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΤΗΣ ΣΤΑΘΜΗΣ ΤΟΥ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΤΟ ΠΕΔΙΝΟ ΤΜΗΜΑ ΤΟΥ Ν. ΞΑΝΘΗΣ Δαμιανίδης Π., Πλιάκας Φ.-Κ., Καλλιώρας Α.	908

H04	ΣΥΣΤΗΜΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΣΧΕΔΙΟΥ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΤΟΥ Π. ΚΟΜΨΑΤΟΥ, Ν. ΡΟΔΟΠΗΣ Μιμίδης Κ., Πλιάκας Φ., Πεχτελίδης Α., Διαμαντής Ι.	920
H05	ΝΕΕΣ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΕΡΕΥΝΕΣ ΓΙΑ ΤΗ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ SAT ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΝΕΑΣ ΠΕΡΑΜΟΥ Ν. ΚΑΒΑΛΑΣ. Κατιμάδα Χ., Τζεβελέκης Θ., Γκιουγκής Ι., Διαμαντής Ι.	932
H06	ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΑΙ ΠΟΙΟΤΗΤΕΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕΡΩΝ ΣΤΟ ΥΔΡΟΦΟΡΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΤΩΝ ΠΟΤΑΜΩΝ ΚΑΤΩ ΡΟΥ ΑΛΙΑΚΜΟΝΑ - ΛΟΥΔΙΑ, Κ. ΜΑΚΕΔΟΝΙΑ, ΒΟΡΕΙΑ ΕΛΛΑΔΑ Βεράνης Ν., Χρηστίδης Χρ., Χρυσάφη Αλ., Μακροβασίλη Κ.	944
H07	ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΟΥ ΠΑΡΑΚΤΙΟΥ ΠΡΟΣΧΩΜΑΤΙΚΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΤΗΣ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΛΜΥΡΟΥ ΤΗΣ Π.Ε. ΜΑΓΝΗΣΙΑΣ Μυριούνης Χ., Δημόπουλος Γ.	958
H08	ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΑΙ ΠΟΙΟΤΗΤΕΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕΡΩΝ ΣΤΟ ΟΡΕΙΝΟ ΣΥΓΚΡΟΤΗΜΑ ΚΕΡΔΥΛΛΙΩΝ -ΚΡΟΥΣΙΩΝ, ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑ, ΒΟΡΕΙΑ ΕΛΛΑΔΑ Βεράνης Ν., Χρηστίδης Χρ.	970
H09	ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΑ ΠΟΣΟΤΙΚΑ ΚΑΙ ΠΟΙΟΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΑΠΟ ΤΗ ΜΑΚΡΟΧΡΟΝΙΑ ΜΗ ΟΡΘΟΛΟΓΙΚΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΟΥΣ. ΤΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΤΟΥ ΘΕΣΣΑΛΙΚΟΥ ΚΑΜΠΟΥ Μανάκος Αντ.	984
H10	ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ - ΥΔΡΟΧΗΜΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΤΟΥΣ ΟΡΕΙΝΟΥΣ ΟΓΚΟΥΣ ΟΛΥΜΠΟΥ-ΟΣΣΑΣ Μανάκος Αντ., Βεράνης Ν.	996
H11	ΥΔΡΟΧΗΜΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΑΙ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕΡΩΝ ΣΤΗ ΛΕΚΑΝΗ ΤΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ ΝΗΛΕΑ, ΝΑ ΕΥΒΟΙΑ Τσερόλας Π., Ζαγγανά Ε.	1008
Θ. ΑΚΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗ – ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ		
Θ01	ΧΡΗΣΗ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΓΙΑ ΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΕΡΓΩΝ ΤΕΧΝΗΤΗΣ ΑΝΑΠΛΗΡΩΣΗΣ ΑΚΤΩΝ Καραμπάς Θ., Χριστόπουλος Σπ., Αυγέρης Ι.	1023
Θ02*	ΔΙΑΔΟΣΗ ΘΡΑΥΟΜΕΝΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ ΠΑΝΩ ΑΠΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΠΥΘΜΕΝΑ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΚΛΙΣΗΣ ΜΕΣΩ ΜΕΘΟΔΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΜΕΓΑΛΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ Κολοκυθάς Γερ., Δήμας Αθ.	1033
Θ03	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΣΤΟ ΒΕΛΤΙΣΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΕΡΓΩΝ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΑΚΤΩΝ ΔΗΜΟΥ ΑΣΙΝΗΣ Χριστόπουλος Σπ., Αυγέρης Ι., Καραμπάς Θ., Κουτίτας Χρ.	1046
Θ04	ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΠΑΡΑΚΤΙΑΣ ΖΩΝΗΣ ΤΟΥ ΣΤΡΥΜΟΝΙΚΟΥ ΚΟΛΠΟΥ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΜΙΑΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ Οικονόμου Ε.Κ., Γιαννακοπούλου Ε., Γείτονας Αθ.	1058
Θ05*	ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΩΝ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΗΣ ΖΩΝΗΣ ΘΡΑΥΣΗΣ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ SPH Μακρής Χρ. Β., Κρεστενίτης Ι. Ν.	1070

Θ06*	ΜΕΛΕΤΗ ΘΡΑΥΣΗΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ ΜΕ ΜΟΝΤΕΛΟ BOUSSINESQ ΣΕ ΔΥΟ ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ Φονιάς Ε. Ν., Μέμος Κ. Δ., Καραμπάς Θ. Β.	1083
Θ07	ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΡΓΩΝ ΓΙΑ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΠΑΡΑΚΤΙΑΣ ΖΩΝΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ Χατζηρόδου Α., Τσουκαλά Β.Κ.	1096
I. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ – ΒΑΣΕΙΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ – ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ		
I01	ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΜΕΙΩΣΗΣ ΤΟΥ ΜΗ ΑΝΤΑΠΟΔΟΤΙΚΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΥΔΡΕΥΣΗΣ Κανακούδης Β., Τσιτσιφλή Σ., Σαμαράς Π., Ζουμπούλης Α.	1111
I02*	ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΒΑΣΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΕΙΦΟΡΙΚΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΛΕΚΑΝΩΝ – ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΑΛΦΕΙΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ Πασαπόρτη Χρ. Ν., Γιαννόπουλος Π. Χρ.	1123
I03	ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΣΧΕΤΙΚΗΣ ΣΗΜΑΣΙΑΣ ΤΩΝ ΒΑΣΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΩΝ ΚΛΕΙΣΤΩΝ ΥΠΟ ΠΙΕΣΗ ΔΙΚΤΥΩΝ ΥΔΡΕΥΣΗΣ – ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΙΣΧΥΟΥΣΩΝ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ Γιαννόπουλος Στ., Σπανοθύμιου Μ., Σπηλιώτης Μ.	1134
I04	ΑΥΤΟΜΑΤΗ ΧΑΡΑΞΗ ΥΔΡΟΚΡΙΤΗ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ G.I.S. - ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ Γιαννόπουλος Στ., Χρηστίδης Χρ., Λουκάς Αθ.	1148
I05*	ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΥΠΟ ΠΙΕΣΗ ΑΡΔΕΥΤΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΜΕ ΑΣΑΦΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥΣ Κανάκης Π.Χ., Παπαμιχαήλ Δ.Μ., Γεωργίου Π.Ε.	1162
I06	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΝΕΡΟΥ ΣΤΡΑΤΙΣΤΙΚΩΝ ΤΑΦΡΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ QUAL2Kw Γκίκας Γ. Δ., Δήμας Χρ., Τσιχριντζής Β. Α.	1174
I07	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ RIZER HYDRA ΣΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΟΜΒΡΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ ΤΟΥ ΔΗΜΟΥ ΝΕΑΠΟΛΗΣ Ν. ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ Γιαννόπουλος Στ., Κωτούλας Γρ., Μυριούνης Χρ.	1186
I08	ΧΡΗΣΗ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΚΑΙ Γ.Σ.Π. ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΡΤΙΣΗ ΧΑΡΤΩΝ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΟΥ ΠΡΟΕΙΔΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΤΑ ΠΛΑΙΣΙΑ ΜΕΛΕΤΗΣ ΘΡΑΥΣΗΣ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ Μπενσασσών Λ., Αθανασάκης Μ.	1200
I09	ΕΛΕΓΧΟΣ ΝΙΤΡΟΥΡΥΠΑΝΣΗΣ ΣΕ ΑΡΔΕΥΤΙΚΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΣΤΗΝ ΤΡΟΙΖΗΝΑ ΜΕ ΤΗ ΣΥΝΔΥΑΣΤΙΚΗ ΧΡΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΑΓΡΟ-ΟΙΚΟΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΜΑΖΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΤΕΥΞΗ ΑΕΙΦΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ Ματιάτος Ι., Παπαδοπούλου Μ. Π.	1212
I10	ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΣΤΗ ΛΕΚΑΝΗ ΚΟΡΩΝΕΙΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ Γκινίδη Π., Τζιμόπουλος Χ., Γιαννόπουλος Στ.	1226
I11	ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΤΗΣ ΟΡΕΙΝΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΜΕΣΟΒΟΥΝΟΥ Μάρης Φ., Μαχτής Π., Βασιλείου Α.	1238

I12*	Η ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΤΩΝ ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΤΗΣ ΛΙΜΝΗΣ ΚΑΡΛΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ GIS Ζήσου Χ., Ψιλοβίκος Α.	1250
I13	ΜΙΑ ΥΒΡΙΔΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΛΟΓΗ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΔΡΑΣΕΩΝ ΣΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ Σπηλιώτης Μ.	1262
	ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΥΓΓΡΑΦΕΩΝ	1275

Σημείωση. – Στα Περιεχόμενα, με αστερίσκο (*) στον κωδικό αριθμό του άρθρου δηλώνεται ότι η εργασία είναι αποδεκτή για ειδική αξιολόγηση από την Επιτροπή προκειμένου να βραβευθούν οι δύο μεταπτυχιακοί φοιτητές που θα παρουσιάσουν τις αντιστοίχως δύο καλύτερες εργασίες.

A

**ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ
ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑ
ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ**

ΑΠΛΟΠΟΙΗΜΕΝΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΤΗΣ ΕΞΙΣΩΣΗΣ PENMAN ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΤΗΣ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΑΠΟ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΕΝΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

I. Δ. Βαλιάντζας

Τομέας Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων & Γεωργικής Μηχανικής, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Ιερά Οδός 75, 11855 Αθήνα. lhyd2vay@aua.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Πρόσφατα έχει προταθεί από τον Valiantzas (2006) ένας απλός αλγεβρικός τύπος ισοδύναμης ακρίβειας με την εξίσωση Penman για τον προσδιορισμό της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς από μετρήσεις των συμβατικών μεταβλητών που λαμβάνονται στους μετεωρολογικούς σταθμούς. Στη εργασία αυτή, προτείνονται απλές εμπειρικές εξισώσεις που βασίζονται σε επιπλέον απλοποιήσεις, στις οποίες λαμβάνονται υπ' όψη οι ιδιαιτερότητες του Ελλαδικού χώρου. Οι προτεινόμενες εξισώσεις δεν απαιτούν μετρήσεις των συμβατικών μετεωρολογικών μεταβλητών, ταχύτητας ανέμου ή/και σχετικής υγρασίας. Οι εξισώσεις συγκρίνονται με προγενέστερες μεθόδους. Παρουσιάζονται διάφορες εφαρμογές.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Εξατμισοδιαπνοή, Penman, Penman-Monteith, υδρολογικές εφαρμογές, διαχείριση υδατικών πόρων

SIMPLIFIED VERSIONS FOR THE PENMAN EQUATION FOR ESTIMATING REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION FROM LIMITED DATA IN GREECE

J. D. Valiantzas

Division of Water Resources Management, Department of Natural Resources Management & Agricultural Engineering, Agricultural University of Athens
75 Iera Odos, Athens 11855, Greece. lhyd2vay@aua.gr

ABSTRACT

Simple algebraic formulas, which are simplifications of the «standardized» form of the Penman equation, were proposed to be applied over the Greek area for computing reference evapotranspiration without requiring wind speed and/or relative humidity data. The suggested formulas are verified and compared with other commonly used (reduced FAO Penman-Monteith) methods.

KEYWORDS: Evapotranspiration, Penman equation, Penman-Monteith equation, hydrologic applications, water resources management

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αρχική μέθοδος του Penman (1948,1963) καθώς και οι διάφορες παραλλαγές της χρησιμοποιούνται χρησιμοποιείται ευρέως ανά τον κόσμο, σε διάφορες τεχνικές εφαρμογές, σαν γενικευμένη μέθοδος αναφοράς σε διαφορετικές περιοχές και κλιματικές συνθήκες για την εκτίμηση της δυνητικής εξάτμισης από υδάτινες επιφάνειες καθώς επίσης και για την εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς.

$$E_{PEN} = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot \frac{(R_n)}{\lambda} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \cdot \frac{6.43(f_U)D}{\lambda} \quad ; \quad f_U = 1 + 0.536u \quad (1.1)$$

όπου: E_{PEN} είναι η δυνητική εξάτμιση ή εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (mm/d), R_n είναι η καθαρή ακτινοβολία (MJ/m²/d), f_U είναι η συνάρτηση της ταχύτητας του ανέμου, u είναι η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 2 m (m/s), $D=(e_s-e_a)$ είναι το έλλειμμα κορεσμού στην ατμόσφαιρα (kPa), γ ο ψυχομετρικός συντελεστής, (kPa/ °C), Δ η κλίση καμπύλης πίεσης κορεσμού υδρατμών, (kPa/ °C).

Από την άλλη, η εξίσωση των Penman-Monteith

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u)} + \frac{900\gamma}{[\Delta + \gamma(1 + 0.34u)]} \cdot \frac{uD}{(T + 273)} \quad (1.2)$$

εφαρμοζόμενη σύμφωνα με την τυποποιημένη υπολογιστική διαδικασία της FAO-56 (FAO-56 PM) για την εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς, ET_0 , όπως προτείνεται από τους Allen et al. (1998), θεωρείται σαν γενικευμένη μέθοδος «αναφοράς» κατά τις εφαρμογές στη Μηχανική των Αρδεύσεων σε διαφορετικές περιοχές και κλιματικές συνθήκες. Οι μεταβλητές R_n και D υπολογίζονται έμμεσα από την τυποποιημένη υπολογιστική διαδικασία αναφοράς που προτείνεται από τους Allen et al. (1998) από τα συνήθη δεδομένα συμβατικών σταθμών, η μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία αέρα, T_{max} , T_{min} , εκπεφρασμένες σε °C, η ηλιακή ακτινοβολία R_S (MJ/m²/d), η σχετική υγρασία RH (%), και η u .

Ένα από τα πλέον βασικά μειονεκτήματα της μεθόδου FAO-56 Penman-Monteith είναι η απαίτησή της σε πρωτογενείς μετρήσεις δεδομένων, οι οποίες δεν είναι πάντα διαθέσιμες. Έτσι, σε πολλούς συμβατικούς μετεωρολογικούς σταθμούς τα δεδομένα ταχύτητας ανέμου, u , ή/και της σχετικής υγρασίας, RH , δεν είναι διαθέσιμα ή είναι αμφίβολου ποιότητας.

Στην εργασία αυτή προτείνεται μια σειρά νέων απλών αλγεβρικών εξισώσεων υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς, ET_0 , η οποία δεν απαιτεί δεδομένα ταχύτητας του ανέμου, u , ή/και της σχετικής υγρασίας, RH , και έχει εφαρμογή στον Ελλαδικό χώρο. Η προτεινόμενη εξίσωση προκύπτει μετά από απλοποιήσεις της εξίσωσης Penman (1948, 1963) και αποτελεί επέκταση-απλοποίηση των αποτελεσμάτων των προηγούμενων εργασιών, Valiantzas (2006), Valiantzas (2012a), Valiantzas (2012b), Valiantzas (2012c), και Valiantzas (2012d), και προκύπτει μετά από προσαρμογή στα ελληνικά κλιματολογικά δεδομένα. Γίνονται εφαρμογές και συγκρίσεις.

2. ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΑΠΟ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΕΝΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Σε προηγούμενη εργασία του ο Valiantzas (2006) βασιζόμενος στη συστηματική ανάλυση των συστατικών όρων του μοντέλου αναφοράς Penman ανέπτυξε

απλοποιημένες αλγεβρικές εξισώσεις ισοδύναμης ακρίβειας με το μοντέλο Penman. Η εξίσωση Penman (1.1) μπορεί να γραφεί ως:

$$E_{PEN} = E_{radS} - E_{radL} + E_{aero} \quad (2.1)$$

όπου οι όροι της εξίσωσης συνδυασμού Penman, E_{radS} , E_{radL} και E_{aero} αντιστοιχούν στο συστατικό όρο που αφορά στην καθαρή εισερχόμενη ακτινοβολία βραχέων κυμάτων, στο συστατικό όρο που αφορά στην καθαρή εξερχόμενη ακτινοβολία μακρών κυμάτων, και τέλος στον αεροδυναμικό όρο αντίστοιχα. Αυτοί οι όροι λαμβάνουν την ακόλουθη μορφή σύμφωνα με την τυποποιημένη υπολογιστική διαδικασία αναφοράς που προτείνεται από τους Shuttleworth (1993) και Allen et al. (1998) των μεταβλητών R_n και D :

$$E_{radS} = \frac{1}{\lambda} (1 - \alpha) R_S \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \quad (2.2)$$

$$E_{radL} = \frac{1}{\lambda} \left(1.35 \frac{R_S}{0.75 R_A} - 0.35 \right) \left(0.34 - 0.14 \sqrt{\frac{RH}{100} e_{S(av)}} \right) \sigma (T + 273.2)^4 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \quad (2.3)$$

$$E_{aero} = \frac{1}{\lambda} \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} 6.43 f_U D_{(av)} \quad (2.4)$$

όπου α είναι η λευκαύγεια για την καλλιέργεια αναφοράς, R_A είναι η εξωγήινη ηλιακή ακτινοβολία ($\text{MJ}/\text{m}^2/\text{d}$), R_S είναι η ηλιακή ακτινοβολία ($\text{MJ}/\text{m}^2/\text{d}$), $e_{S(av)}$ είναι η μέση πίεση κορεσμού υδρατμών (kPa), $D_{(av)}$ είναι το μέσο έλλειμμα κορεσμού στην ατμόσφαιρα (kPa), και σ είναι η σταθερά Stefan-Boltzman.

Ο Valiantzas (2006) μεταβάλλοντας τις μετεωρολογικές μεταβλητές σε ένα τυπικό εύρος μεταβολής τους, και με τη βοήθεια προσομοιώσεων και διεργασιών παλινδρόμησης, πρότεινε μια σειρά εμπειρικών απλοποιημένων εκφράσεων για τους τρεις όρους που δίνονται από τις (2.2), (2.3), και (2.4):

$$E_{radS} \approx 0.051(1 - \alpha) R_S \sqrt{T + 9.5} \quad (2.5)$$

$$E_{radL} \approx 2.4 \left(\frac{R_S}{R_A} \right)^2 + 0.024(T + 20) \left(1 - \frac{RH}{100} \right) \quad (2.6)$$

$$E_{aero} \approx 0.048(T + 20) \left(1 - \frac{RH}{100} \right) (1 + 0.536u) \quad (2.7)$$

3.1 ΝΕΑ ΑΠΛΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΕΞΙΣΩΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΟΛΩΝ ΤΩΝ ΔΕΛΟΜΕΝΩΝ (T , R_S , RH , u)

Στη (2.6) ο υπολογισμός της μεταβλητής R_A (εξωγήινη ηλιακή ακτινοβολία, $\text{MJ}/\text{m}^2/\text{d}$) σε ημερήσια βάση απαιτεί μάλλον πολύπλοκους σύνθετους υπολογισμούς. Γι αυτό ο όρος $[2.4(R_S/R_A)^2]$ αντικαθίσταται από την εξής απλή μορφή $[C_1 \cdot R_S^{C_2} \cdot \varphi^{C_3}]$ όπου C_1 και C_2 είναι εμπειρικοί συντελεστές. Οι μέσες μηνιαίες τιμές μετεωρολογικών

μεταβλητών της βάσης δεδομένων FAO-CLIMWAT (Smith, 1993) από 20 πόλεις της Ελλάδας χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των C_1 και C_2 με τη βοήθεια διαδικασιών παλινδρόμησης. Οι διαδικασίες παλινδρόμησης οδηγούν στις τιμές των συντελεστών $C_1=0.088$ και $C_2=0.9$. Ακολούθως, η προτεινόμενη εξίσωση για τις Ελλαδικές συνθήκες βασισμένη στις (2.5), (2.6) και (2.7) (χρησιμοποιώντας την τυπική τιμή λευκαύγειας για την καλλιέργεια αναφοράς $a=0.23$) λαμβάνει την παρακάτω απλή μορφή:

$$ET_o \approx 0.0393R_S \sqrt{T+9.5} - 0.088R_S^{0.9} + 0.048(T+20) \left(1 - \frac{RH}{100}\right) u^{0.7} \quad (3.1)$$

όπου η μέση θερμοκρασία T πρέπει να είναι εκπεφρασμένη σε $^{\circ}\text{C}$, η ηλιακή ακτινοβολία R_S σε $\text{MJ/m}^2/\text{d}$, η σχετική υγρασία RH σε %, και u σε m/s .

3.2 ΝΕΑ ΑΠΛΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΕΞΙΣΩΣΗ ΧΩΡΙΣ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΑΝΕΜΟΥ (T , R_S , RH)

Σε πολλές περιοχές οι τοπικές μέσες υπερετήσιες τιμές της ταχύτητας του ανέμου, U_{av} (m/s), είναι πιθανόν να μπορούν να εκτιμηθούν από γειτονικούς μετεωρολογικούς σταθμούς που διαθέτουν δεδομένα ανέμου ή να βασιστούν στη χρήση των τυπικών τιμών που χαρακτηρίζουν μια ολόκληρη περιφέρεια. Για τις περιπτώσεις όπου η U_{av} μπορεί να εκτιμηθεί, τότε μπορούμε να αντικαταστήσουμε στην (3.1) την τιμή της u με την τιμή της U_{av} .

Το εύρος μεταβολής των τιμών της μέσης υπερετήσιας τιμής της ταχύτητας του ανέμου, U_{av} , στην Ελληνική επικράτεια κυμαίνεται κυρίως μεταξύ των τιμών $0.5 \text{ m/s} < U_{av} < 5 \text{ m/s}$. Ο Ελλαδικός χώρος διαχωρίζεται σε δυο βασικές κατηγορίες περιοχών: α) στις περιοχές όπου επικρατούν σχετικά ισχυροί άνεμοι όπου $U_{av} > 2.4 \text{ m/s}$ και β) στις περιοχές με μέτρια έως μικρή ένταση ανέμων όπου $U_{av} < 2.4 \text{ m/s}$. Στην πρώτη κατηγορία περιλαμβάνονται κυρίως περιοχές του Αιγαίου, ενώ στη δεύτερη περιλαμβάνονται κυρίως περιοχές της ηπειρωτικής Ελλάδας.

Βασίζόμενοι λοιπόν στην (3.1) με την τιμή της u ίση με την τιμή της U_{av} , εφαρμόζοντας μια διαδικασία παλινδρόμησης στις μέσες μηνιαίες τιμές μετεωρολογικών μεταβλητών της βάσης δεδομένων FAO-CLIMWAT (Smith, 1993) από τις 20 πόλεις της Ελλάδας, λαμβάνουμε την παρακάτω απλή εξίσωση:

$$ET_o \approx 0.0393R_S \sqrt{T+9.5} - 0.088R_S^{0.9} + 0.113(T+20) \left(1 - \frac{RH}{100}\right) \quad \text{για } U_{av} > 2.4 \text{ m/s} \quad (3.2\alpha)$$

$$ET_o \approx 0.0393R_S \sqrt{T+9.5} - 0.088R_S^{0.9} + 0.0638(T+20) \left(1 - \frac{RH}{100}\right) \quad \text{για } U_{av} < 2.4 \text{ m/s} \quad (3.2\beta)$$

Στην παραπάνω προτεινόμενη εξίσωση δεν απαιτούνται δεδομένα της ταχύτητας του ανέμου. Ισχύει για τον υπολογισμό μηνιαίων ή ημερήσιων τιμών της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς, ET_o , στον Ελλαδικό χώρο.

3.3 ΝΕΑ ΑΠΛΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΕΞΙΣΩΣΗ ΧΩΡΙΣ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΑΝΕΜΟΥ ΚΑΙ ΣΧΕΤΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ (T , R_S)

Επιπλέον απλοποιήσεις που εφαρμόζονται στην (3.2) οδηγούν σε μια απλοποιημένη έκφραση της μεθόδου Penman, με εφαρμογή στον Ελλαδικό χώρο, στην οποία τα T και R_S είναι τα μόνα απαραίτητα δεδομένα. Πράγματι, σύμφωνα με τον Valiantzas (2012c) και Valiantzas (2012d), εφαρμόζοντας μια σειρά προσομοιώσεων στις οποίες οι μετεωρολογικές παράμετροι T_{dew} , T και RH (όπου T_{dew} είναι η θερμοκρασία σημείου δρόσου, °C) μεταβάλλονται σε τυπικά διαστήματα μεταβολής τους, υποδεικνύεται η ακόλουθη σχέση για την εκτίμηση του RH :

$$(1 - RH / 100) \approx 0.078(T - T_{dew})^{0.7} \quad (3.3)$$

Σύμφωνα με τους Allen et al. (1998), η θερμοκρασία δρόσου μπορεί να προσεγγιστεί από την ελάχιστη θεοκρασία, δηλαδή:

$$T_{dew} \approx T_{min} \quad (3.4)$$

Για τις Ελλαδικές συνθήκες, εφαρμόζοντας μια μέθοδο παλινδρόμησης στα δεδομένα της βάσης δεδομένων FAO-CLIMWAT (Smith, 1993) από τις 20 πόλεις της Ελλάδας, λαμβάνεται η ακόλουθη σχέση:

$$T_{dew} \approx T_{min} - 0.23T + 2 \quad (3.5)$$

Λαμβάνοντας υπ' όψη τις (3.3) και (3.5), η (3.2) μετά από απλοποιήσεις λαμβάνει την ακόλουθη μορφή:

$$ET_o \approx 0.0393R_S \sqrt{T+9.5} - 0.088R_S^{0.9} + 0.00881(T+20)(1.23T - T_{min} - 2)^{0.7} \quad \text{για } U_{av} > 2.4m/s \quad (3.6\alpha)$$

$$ET_o \approx 0.0393R_S \sqrt{T+9.5} - 0.088R_S^{0.9} + 0.00498(T+20)(1.23T - T_{min} - 2)^{0.7} \quad \text{για } U_{av} < 2.4m/s \quad (3.6\beta)$$

3.4 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΜΕΙΩΜΕΝΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΤΗΣ FAO PENMAN-MONTEITH (T , R_S , RH) Η (T , R_S)

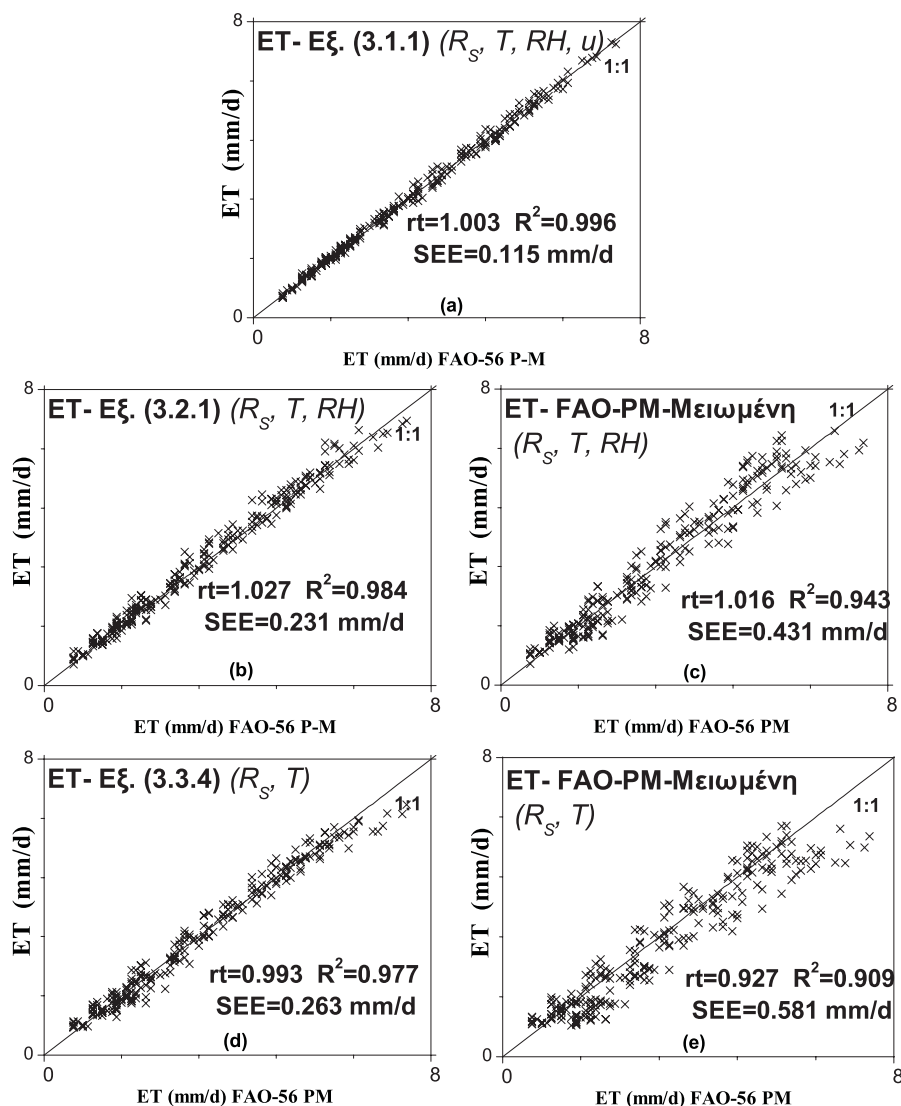
Μια μέθοδος, η οποία έχει καθιερωθεί διεθνώς να εφαρμόζεται όταν δεν διατίθενται όλα τα μετεωρολογικά δεδομένα, είναι η μειωμένων δεδομένων FAO Penman-Monteith μεθοδολογία (μειωμένη FAO-PM) όπως προτείνεται από τους Allen et al. (1998). Η μεθοδολογία αυτή μπορεί να εφαρμοστεί όταν τα δεδομένα ταχύτητας του ανέμου ή/και της σχετικής υγρασίας δεν είναι διαθέσιμα. Σύμφωνα με τους Allen et al. (1998) υποτίθεται μια και μοναδική τιμή της $u=2$ m/s (μέση παγκόσμια τιμή της ταχύτητας του ανέμου) στην (1.2), η δε RH εκτιμάται υποθέτοντας ότι $T_{dew} \approx T_{min}$.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ

4.1 ΜΗΝΙΑΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Οι μέσες μηνιαίες τιμές μετεωρολογικών μεταβλητών της βάσης δεδομένων FAO-CLIMWAT (Smith, 1993) από 20 πόλεις της Ελλάδας χρησιμοποιήθηκαν επίσης για την επαλήθευση α) της νέας προτεινόμενης εξίσωσης (3.1) που απαιτεί όλα τα

δεδομένα (T , R_s , RH , u), β) της (3.2) χωρίς τα δεδομένα ανέμου (απαιτεί T , R_s , RH), και γ) της (3.6) χωρίς τα δεδομένα ανέμου και σχετικής υγρασίας (απαιτεί μόνο T , R_s), καθώς και για συγκρίσεις με τη μεθοδολογία μειωμένων δεδομένων της FAO Penman-Monteith. Η εξίσωση των Penman-Monteith, (1.2), εφαρμοζόμενη σύμφωνα με την τυποποιημένη υπολογιστική διαδικασία της FAO-56 για την εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς, ET_0 , χρησιμοποιεί όλα τα δεδομένα (T , R_s , RH , u) όπως προτείνεται από τους Allen et al. (1998), και θεωρείται σαν η μέθοδος αναφοράς για την επαλήθευση και τις συγκρίσεις.



Σχήμα 1. Συγκρίσεις εκτιμήσεων μέσης μηνιαίας μηνιαίας εξατμισοδιαπνοής αναφοράς υπολογισμένων από διάφορες μεθόδους με τιμές της μεθόδου αναφοράς FAO56-Penman Monteith για τον Ελλαδικό χώρο.

Στο Σχήμα 1 παρουσιάζονται τα συγκριτικά γραφήματα μεταξύ των διάφορων εξισώσεων, απλοποιημένων μεθόδων και της τυπικής μεθόδου αναφοράς FAO56-Penman-Monteith (FAO56-PM), για την εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής από υποθετικές καλλιέργειες αναφοράς, στις 20 πόλεις της Ελλάδας. Στο γράφημα του Σχήματος 1a δείχνεται ότι υπάρχει πολύ καλή σύγκλιση μεταξύ των προβλέψεων της

προτεινόμενης πλήρους δεδομένων εξίσωσης (3.1) και της μεθόδου αναφοράς FAO56-Penman-Monteith. Για όλες τις περιοχές, τα σημεία είναι διασπαρμένα γύρω από ιδανική ευθεία παλινδρόμησης (1:1) με τους παρακάτω στατιστικούς δείκτες:

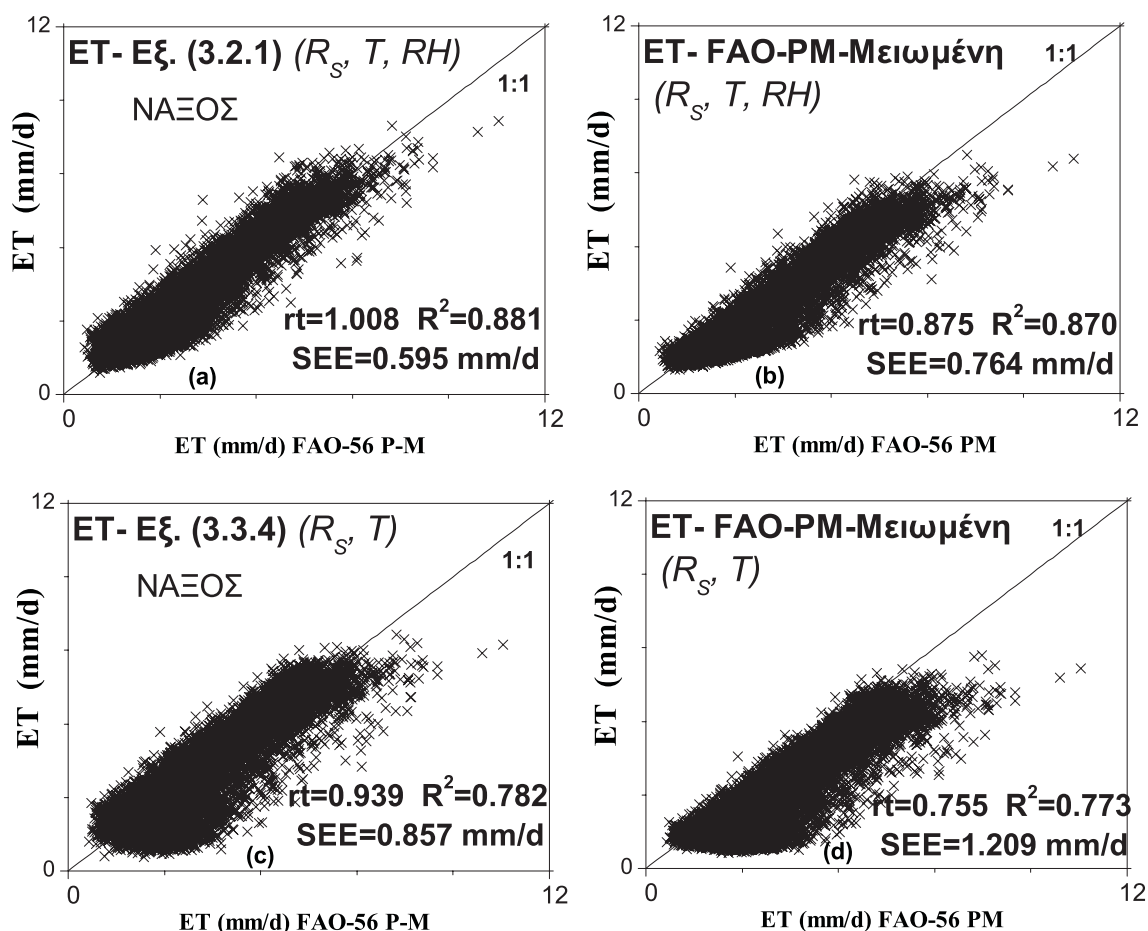
Ο συντελεστής προσδιορισμού έχει την ιδιαίτερα μεγάλη τιμή $R^2=0.996$, το συστηματικό σφάλμα είναι πρακτικά μηδενικό, $rt=1.003$ όπου rt είναι ο υπερετήσιος μέσος λόγος των εκτιμήσεων προς τις τιμές αναφοράς. Η τιμή του τυπικού σφάλματος εκτίμησης, SEE , είναι μικρή, $SEE=0.115$ mm/d, που αντιστοιχεί στο 3.5 % της μέσης υπερετήσιας τιμής του ΕΤ₀.

Στο γράφημα του Σχήματος 1b δείχνεται ότι υπάρχει σχετικά καλή σύγκλιση μεταξύ των προβλέψεων της προτεινόμενης εξίσωσης (3.2) - χωρίς τα δεδομένα ανέμου - και της μεθόδου αναφοράς FAO56-PM. Η προτεινόμενη εξίσωση (3.2) υπερέχει της αντίστοιχης μεθοδολογίας μειωμένων δεδομένων της FAO (χωρίς τα δεδομένα ανέμου) όπως φαίνεται και από τα αποτελέσματα και τους στατιστικούς δείκτες που παρουσιάζονται στο γράφημα του Σχήματος 1c. Η μειωμένη FAO παράγει μεγαλύτερη διασπορά των σημείων των εκτιμήσεων, $R^2=0.943$ έναντι $R^2=0.984$ της (3.2), και σαφώς μεγαλύτερο σφάλμα εκτίμησης $SEE=0.431$ mm/d από ότι η προτεινόμενη (3.2). Η τιμή του τυπικού σφάλματος, SEE , για την προτεινόμενη (3.2) είναι σχεδόν η μισή της αντίστοιχης μειωμένης FAO.

Παρόμοια συμπεράσματα προκύπτουν από τη σύγκριση της προτεινόμενης (3.6) - χωρίς τα δεδομένα u και RH - και της αντίστοιχης μεθοδολογίας μειωμένων δεδομένων της FAO (χωρίς τα δεδομένα ανέμου και σχετικής υγρασίας) στα Σχήματα 1d και 1e αντίστοιχα. Η μειωμένη FAO, όπως φαίνεται στα Σχήματα 1d και 1e, υποεκτιμά συστηματικά τη μέθοδο αναφοράς κατά το ποσοστό του 7% ($rt=0.927$), παράγει πολύ μεγαλύτερη διασπορά των σημείων των εκτιμήσεων, $R^2=0.909$ έναντι $R^2=0.977$ της (3.6), και σαφώς μεγαλύτερο σφάλμα εκτίμησης $SEE=0.581$ mm/d, υπερδιπλάσιο από ότι η προτεινόμενη (3.6).

4.2. ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Οι ημερήσιες τιμές των μετρημένων μετεωρολογικών μεταβλητών για την Νήσο Νάξο κατά την περίοδο 1982-2000 χρησιμοποιήθηκαν επίσης για την επαλήθευση της (3.2) χωρίς τα δεδομένα ανέμου, και της (3.6) χωρίς τα δεδομένα ανέμου και σχετικής υγρασίας, καθώς και για συγκρίσεις με τη μεθοδολογία μειωμένων δεδομένων της FAO Penman-Monteith. Στο γράφημα του Σχήματος 2a δείχνεται ότι υπάρχει σχετικά καλή σύγκλιση μεταξύ των προβλέψεων της προτεινόμενης (3.2) και της μεθόδου αναφοράς FAO56-PM. Η προτεινόμενη (3.2) υπερέχει της αντίστοιχης μειωμένης FAO, όπως φαίνεται και από τα αποτελέσματα και τους στατιστικούς δείκτες που παρουσιάζονται στο γράφημα του Σχήματος 2b. Η μειωμένη FAO υποεκτιμά συστηματικά τη μέθοδο αναφοράς κατά το σημαντικό ποσοστό του 13% ($rt=0.875$), σε αντίθεση με την (3.2) με $rt=1.008$, παράγει ελάχιστα μεγαλύτερη διασπορά των σημείων των εκτιμήσεων, και αρκετά μεγαλύτερο σφάλμα εκτίμησης $SEE=0.764$ mm/d, έναντι της προτεινόμενης (3.2) με $SEE=0.595$ mm/d. Παρόμοια συμπεράσματα προκύπτουν από τη σύγκριση της προτεινόμενης (3.6) και της αντίστοιχης μειωμένης FAO στα Σχήματα 2c και 2d αντίστοιχα. Η μειωμένη FAO υποεκτιμά κατά το ιδιαίτερα σημαντικό ποσοστό του 24.5% με αρκετά μεγαλύτερο σφάλμα εκτίμησης $SEE=1.21$ mm/d, έναντι της προτεινόμενης (3.6).



Σχήμα 2. Συγκρίσεις εκτιμήσεων ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής αναφοράς υπολογισμένων από διάφορες μεθόδους με τιμές της μεθόδου αναφοράς FAO56-Penman Monteith για τη νήσο Νάξο.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Προτείνονται ιδιαίτερα απλής μορφής εξισώσεις για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής από υποθετικές καλλιέργειες αναφοράς στον Ελλαδικό χώρο. Η εξισώσεις δεν απαιτούν δεδομένα ταχύτητας του άνεμου ή/και σχετικής υγρασίας και δίνουν πολύ ικανοποιητικές προβλέψεις.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M., 1998. *Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper, No 56, Rome, 300pp.
- Penman, H.L., 1948. *Natural evaporation from open water, bare and grass*. Proc. R. Soc. Lond., Ser. A, 193: 120-145.
- Penman, H.L., 1963. *Vegetation and hydrology*. Technical Communication, No 53, Commonwealth Bureau of Soils, Harpenden, England.
- Shuttleworth, W.J., 1993. *Evaporation*, McGraw-Hill, New York, 4.1-4.53.
- Smith, M., 1993. *CLIMWAT for CROPWAT: a climatic database for irrigation planning and management*. FAO Irrigation and Drainage Paper, No 49, Rome.

- Valiantzas, J.D., 2006. *Simplified versions for the Penman evaporation equation using routine weather data*. J. Hydrol., 331(3-4): 690-702.
- Valiantzas, J.D., 2012a. *Discussion of "Case study on the accuracy and cost/effectiveness in simulating reference evapotranspiration in west-central Florida" by Exner-Kittridge, M. G, and Rains, M. C*. J. Hydrol. Eng., 17(1): 224-225.
- Valiantzas, J.D., 2012b. *Simplified reference evapotranspiration formula using an empirical impact factor for Penman's aerodynamic term*. J. Hydrol. Eng., doi:[http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000590](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000590), in press.
- Valiantzas, J.D., 2012c. *Simple ET_0 forms of Penman's equation without wind and/or humidity data I: Theoretical Development*. J. Irrig. Drain. Eng., (accepted).
- Valiantzas, J.D., 2012d. *Simple ET_0 forms of Penman's equation without wind and/or humidity data II: Comparisons with reduced set-FAO and other methodologies*. J. Irrig. Drain. Eng., (accepted).

**ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ
ΣΕ ΦΥΣΙΚΟ ΑΝΑΓΛΥΦΟ
Β. Μπέλλος, Γ. Τσακίρης**

Κέντρο Εκτίμησης Φυσικών Κινδύνων και Προληπτικού Σχεδιασμού και
Εργαστήριο Εγγειοβελτιωτικών Έργων και Διαχείρισης Υδατικών Πόρων
Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Ε.Μ.Π.
Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 15773 Ζωγράφου, Αθήνα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σύμφωνα με την οδηγία 2007/60 απαιτείται η δημιουργία χαρτών πλημμυρικού κινδύνου σε όλες τις περιοχές που κινδυνεύουν από πλημμύρες. Κατά κύριο λόγο οι περιοχές αυτές είναι οι πεδινές και παράκτιες περιοχές και απαιτούν δισδιάστατη προσέγγιση κατά την εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται ένας αλγόριθμος για τη δισδιάστατη προσομοίωση της πλημμύρας σε φυσικό ανάγλυφο με υδατόρευμα με ή χωρίς βασική απορροή. Ο Αλγόριθμος στηρίζεται στην αριθμητική επίλυση των εξισώσεων Saint-Venant σε δύο διαστάσεις με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Διαφορών και με το ρητό αριθμητικό σχήμα δύο βημάτων και δεύτερης τάξης ακρίβειας McCormack. Για τον έλεγχο του Αλγορίθμου γίνεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν με βάση τον Αλγόριθμο με αυτά των αναλυτικών λύσεων για προβλήματα πλημμύρας απλής γεωμετρίας, με ικανοποιητικά αποτελέσματα.

**NUMERICAL SIMULATION OF A FLOOD IN COMPLEX
TOPOGRAPHY IN TWO DIMENSIONS
V. Bellos, G. Tsakiris**

Centre for the Assessment of Natural Hazards and Proactive Planning and
Laboratory of Reclamation Works and Water Resources Management
School of Rural and Surveying Engineering, N.T.U.A.
Iron Politechneiou 9, 157 73 Zografou, Athens

ABSTRACT

According to the EU Directive 2007/60 all member states should produce flood hazard maps mainly in flat and coastal areas which are more vulnerable to floods. In this paper an algorithm is presented for the two-dimensional simulation of flood routing on a natural terrain and watercourses with or without basic flow. The Algorithm is based on the numerical solution of Saint-Venant equations in two-dimensional form through the McCormack explicit numerical scheme with second order of accuracy. The results of the Algorithm are compared satisfactorily with the results of analytical solutions in flood routing problems of simple geometry.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Πλημμύρα είναι το φαινόμενο κατά το οποίο ένα επιφανειακός υδροφορέας (π.χ. υδατόρευμα) αδυνατεί να διοδεύσει τους μεγάλους όγκους νερού της άμεσης απορροής που προκαλούνται από υψηλά περισσεύματα βροχόπτωσης (rainfall excess) με αποτέλεσμα να κατακλύζονται οι όμορες εκτάσεις.

Τα αποτελέσματα των πλημμυρών είναι συνήθως ιδιαίτερα σημαντικά στην περίπτωση που τα γεγονότα των ραγδαίων βροχών είναι μεγάλα ή/και οι χρήσεις γης και οι εν γένει ανθρώπινες παρεμβάσεις έχουν συντελέσει στην αύξηση του συντελεστή απορροής στην υδρολογική λεκάνη ή/και το διακύβευμα είναι μεγάλο (π.χ. οικισμοί).

Οι επαναλαμβανόμενες πλημμύρες στους μεγάλους ποταμούς της Ευρώπης τις τελευταίες δεκαετίες ώθησε την Ευρωπαϊκή Ένωση στην ψήφιση και την υποχρεωτική εφαρμογή από τα κράτη-μέλη της Οδηγίας 2007/60 για τις πλημμύρες και την αντιπλημμυρική προστασία των ευαίσθητων περιοχών.

Η οδηγία 2007/60 αποτελεί 'αλλαγή πλεύσης' στην αντιμετώπιση των πλημμυρών αφού εισάγει ως βασικό στόχο τη μείωση της πλημμυρικής διακινδύνευσης (flood risk) στις περιοχές που είναι επιρρεπείς σε γεγονότα πλημμυρών. Τα στάδια μελέτης που προβλέπει η οδηγία περιλαμβάνουν:

- α) Χάρτες πλημμυρικού κινδύνου
- β) Χάρτες πλημμυρικής διακινδύνευσης
- γ) Σχέδια για τη μείωση της πλημμυρικής διακινδύνευσης

Κατά κύριο λόγο οι περιοχές αυτές είναι οι πεδινές και παράκτιες περιοχές και απαιτούν δισδιάστατη προσέγγιση κατά την εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου.

Η παρούσα εργασία έχει ως σκοπό την παρουσίαση ενός αλγορίθμου για τη δισδιάστατη προσομοίωση της πλημμύρας σε φυσικό ανάγλυφο με υδατόρευμα με ή χωρίς βασική απορροή, που αποτελεί την μεγάλη πλειοψηφία των περιπτώσεων στο Μεσογειακό περιβάλλον. Ο αλγόριθμος στηρίζεται στην αριθμητική επίλυση των εξισώσεων Saint-Venant σε δύο διαστάσεις με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Διαφορών (Finite Difference Method - FDM) και με το ρητό αριθμητικό σχήμα δύο βημάτων και δεύτερης τάξης ακρίβειας McCormack.

Για τον έλεγχο του Αλγορίθμου εξετάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη χρήση του σε προβλήματα απλής γεωμετρίας σε σχέση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα αναλυτικών επιλύσεων. Αποδεικνύεται ότι ο Αλγόριθμος δίνει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε προβλήματα δισδιάστατης διόδευσης πλημμύρας σε πραγματικό ανάγλυφο και συνθετότερης γεωμετρίας.

2. ΣΥΝΤΟΜΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ

Το θεωρητικό υπόβαθρο που χρησιμοποιείται από την ερευνητική κοινότητα για την αναλυτική προσομοίωση των πλημμυρικών φαινομένων ενός ποταμού είναι οι εξισώσεις Saint-Venant ή Εξισώσεις Αβαθών Υδάτων (Shallow Water Equations - SWE).

Οι αριθμητικές μέθοδοι που έχουν χρησιμοποιηθεί για την επίλυση των SWE, μπορούν να διακριθούν κατά κύριο λόγο σε τρεις κατηγορίες: στη Μέθοδο των Πεπερασμένων Διαφορών (Finite-Difference Method - FDM), στη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite-Element Method - FEM) και στη Μέθοδο των Πεπερασμένων Όγκων (Finite-Volume Method- FVM).

Τα πρώτα μοντέλα επίλυσης των SWE ήταν μονοδιάστατα. Την αριθμητική μέθοδο FDM, εφάρμοσε μεταξύ άλλων ο Preissman (1971) χρησιμοποιώντας

πεπλεγμένα αριθμητικά σχήματα. Οι Terzidis and Strelkoff (1970), μελέτησαν τα κύματα (surges) και τις ασυνέχειες (shocks) σε ανοιχτούς αγωγούς. Ρητά αριθμητικά σχήματα επίλυσης των 1D-SWE χρησιμοποίησαν οι Fennema and Chaudhry (1986), Bellos and Sakkas (1987), κ.α.

Η περαιτέρω ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών τις τελευταίες δεκαετίες επέτρεψε την ευρεία διάδοση της δισδιάστατης προσέγγισης των SWE. Στη μέθοδο FDM στηρίχθηκε ο Matsutomi (1983), ο οποίος χρησιμοποίησε το αριθμητικό σχήμα Leap-Frog σε ξηρό πυθμένα με ειδική αντιμετώπιση του μετώπου του κύματος, ενώ οι Zech et al (1983) ανέπτυξαν αριθμητικό μοντέλο με δυνατότητα περιγραφής της προέλασης και της απόσυρσης πλημμυρικών κυμάτων.

Ευρεία επίσης ήταν και η χρήση του αριθμητικού σχήματος McCormack στη μέθοδο των Πεπερασμένων Διαφορών. Ενδεικτικά, οι Garcia and Kahavita (1986), Jovanović and Djordjević (1995), Fiedler and Ramirez (2000), Liang et al (2007), Guangcai et al (2010) ανέπτυξαν αριθμητικό μοντέλο για την επίλυση των 2D-SWE με τη μέθοδο των FDM και το αριθμητικό σχήμα McCormack.

Τέλος, ειδική αναφορά πρέπει να γίνει και στην τάση των τελευταίων χρόνων για την ανάπτυξη εμπορικών πακέτων λογισμικού. Σε αυτή την κατεύθυνση κινήθηκαν και αρκετά πανεπιστημιακά ιδρύματα και ερευνητικά κέντρα, αναπτύσσοντας εμπορικά πακέτα λογισμικού που προσομοιώνουν το φαινόμενο της διόδευσης πλημμυρικού κύματος με διάφορες τεχνικές. Ενδεικτικά, σήμερα είναι διαθέσιμα μεταξύ άλλων τα πακέτα λογισμικού: MIKE11 και MIKE21, FLDWAV, CCHE2D, TELEMAC-2D, Hec-Ras, RiverFLO-2D, EFDC, Sobek, ISIS-2D κ.α.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται ένας νέος Αλγόριθμος για την δισδιάστατη προσομοίωση πλημμύρας σε πεδινές/παράκτιες περιοχές με ήπιο ανάγλυφο και υδατορεύματα με/ή χωρίς βασική απορροή. Ο αλγόριθμος αυτός που στηρίζεται στο αριθμητικό σχήμα McCormack είναι κατάλληλος για την προσομοίωση των πλημμυρών στην πλειονότητα των Μεσογειακών συνθηκών.

3. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

Όπως έχει προαναφερθεί, ο προτεινόμενος Αλγόριθμος βασίζεται στην αριθμητική επίλυση των 2D-SWE, οι οποίες έχουν προκύψει από την ολοκλήρωση κατά βάθος των εξισώσεων κίνησης των ρευστών Navier-Stokes (εξίσωση διατήρησης μάζας και εξισώσεις διατήρησης ορμής). Οι 2D-SWE ισχύουν κάτω από ορισμένες προϋποθέσεις (Abbott, 1979), οι οποίες είναι:

- Το νερό είναι ασυμπίεστο και ομογενές
- Εισάγεται η έννοια των μέσων ταχυτήτων κατά μήκος και εγκάρσια στη ροή
- Οι συνιστώσες της ταχύτητας κατά την κατακόρυφη διεύθυνση είναι αμελητέες
- Η κατανομή των πιέσεων σε οποιοδήποτε κατακόρυφο επίπεδο είναι η υδροστατική
- Η κλίση του πυθμένα είναι μικρή
- Δεν υπάρχουν ασυνέχειες ή απότομες μεταβολές στο πεδίο ροής
- Δεν υπάρχει εισροή (π.χ. βροχόπτωση) ή εκροή (π.χ. εξάτμιση ή διήθηση)
- Οι εσωτερικές δυνάμεις τριβής (ιξώδες) και οι αντίστοιχες εξωτερικές (π.χ. τριβές στον πυθμένα) μπορούν να προσομοιωθούν με συντελεστές που προκύπτουν από ημιεμπειρικές εξισώσεις

Οι εξισώσεις 2D-SWE γράφονται σε μορφή συντηρητικού νόμου:

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} = D \quad (3.1)$$

όπου:

$$W = \begin{pmatrix} h \\ uh \\ vh \end{pmatrix} \quad F = \begin{pmatrix} uh \\ u^2h + 0.5gh^2 \\ uvh \end{pmatrix} \quad G = \begin{pmatrix} vh \\ uvh \\ v^2h + 0.5gh^2 \end{pmatrix} \quad D = \begin{pmatrix} 0 \\ gh(S_0^x - S_f^x) \\ gh(S_0^y - S_f^y) \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

και h το βάθος νερού (m), u η ταχύτητα νερού κατά την οριζόντια διεύθυνση x (m/s), v η ταχύτητα νερού κατά την οριζόντια διεύθυνση y (m/s), g η επιτάχυνση της βαρύτητας (m/s^2), S_0^x η κλίση πυθμένα κατά την οριζόντια διεύθυνση x , S_0^y η κλίση πυθμένα κατά την οριζόντια διεύθυνση y , S_f^x οι απώλειες λόγω τριβής στον πυθμένα κατά την οριζόντια διεύθυνση x και S_f^y οι απώλειες λόγω τριβής στον πυθμένα κατά την οριζόντια διεύθυνση y . Οι όροι της κλίσης γραμμής ενέργειας μπορούν να γραφούν χρησιμοποιώντας την εξίσωση Manning:

$$S_f^x = \left(n^2 u \sqrt{u^2 + v^2} \right) h^{-4/3} \quad \text{και} \quad S_f^y = \left(n^2 v \sqrt{u^2 + v^2} \right) h^{-4/3} \quad (3.3)$$

4. ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ

Ο αλγόριθμος που προτείνεται αναπτύχθηκε στη γλώσσα προγραμματισμού Fortran 90/95. Βασίστηκε στην FDM, σε υπολογιστικό πλέγμα όπου οι εκάστοτε μεταβλητές (στην προκειμένη περίπτωση το βάθος και οι ταχύτητες ροής) υπολογίζονται όλες στο κέντρο του κάθε κελιού του υπολογιστικού πλέγματος (cell-centered, unstaggered grid). Η διακριτοποίηση των 2D-SWE έγινε με το ρητό αριθμητικό σχήμα δύο βημάτων (πρόβλεψης-διόρθωσης) McCormack (McCormack, 1970), το οποίο είναι κατάλληλο για την περιγραφή ασυνεχειών στο υπολογιστικό πεδίο (shock capturing capability). Η διακριτοποίηση γίνεται με τις εξισώσεις που ακολουθούν:

βήμα πρόβλεψης

$$W_{i,j}^* = W_{i,j}^k - \frac{\Delta t}{\Delta x} (F_{i+1,j}^k - F_{i,j}^k) - \frac{\Delta t}{\Delta y} (G_{i,j+1}^k - G_{i,j}^k) + \Delta t D_{i,j}^k \quad (4.1)$$

βήμα διόρθωσης

$$W_{i,j}^{k+1} = \frac{1}{2} \left[W_{i,j}^k + W_{i,j}^* - \frac{\Delta t}{\Delta x} (F_{i,j}^* - F_{i-1,j}^*) - \frac{\Delta t}{\Delta y} (G_{i,j}^* - G_{i,j-1}^*) + \Delta t D_{i,j}^* \right] \quad (4.2)$$

Η διακριτοποίηση αυτού του τύπου θα πρέπει να ικανοποιεί το γνωστό κριτήριο ευστάθειας Courant-Friedrichs-Lewy (CFL condition). Συγκεκριμένα ο Αλγόριθμος, δέχεται ως δεδομένο τον αριθμό Courant (C) και προσδιορίζει το χρονικό βήμα έπειτα από κάθε επαναληπτική διαδικασία ως εξής (Katopodes and Strelkoff, 1979):

$$C = \left(\sqrt{u^2 + v^2} + c \right) \frac{\Delta t}{\min(\Delta x, \Delta y)} \quad (4.3)$$

όπου c η ταχύτητα διάδοσης κυματισμών (celerity - m/s).

Ειδική αναφορά θα πρέπει επίσης να γίνει για τις αρχικές και οριακές συνθήκες. Όσον αφορά τις αρχικές συνθήκες (initial conditions) υπάρχουν οι εξής δυνατότητες: είτε το υπολογιστικό πεδίο να είναι τελείως ξηρό, είτε να γίνει εισαγωγή των τιμών των μεταβλητών (ταχύτητες και βάθος ροής) σε κάθε κελί του υπολογιστικού πλέγματος αν υπάρχουν τιμές οι οποίες είναι διάφορες του μηδενός.

Όσον αφορά στις οριακές συνθήκες, για τις μεν ανάντη οριακές συνθήκες (upstream boundary conditions) είναι απαραίτητη η εισαγωγή είτε σταθερής παροχής, είτε κάποιου υδρογραφήματος (Dirichelet), καθώς και η εισαγωγή της καμπύλης στάθμης-παροχής για την ανάντη οριακή διατομή. Για τις δε κατάντη οριακές συνθήκες (downstream boundary conditions), αν είναι γνωστό ότι οι συνθήκες ροής στο κατάντη όριο είναι υπερκρίσιμες, αυτές δε χρειάζεται να οριστούν. Αν αυτό δεν είναι γνωστό, είναι απαραίτητο να προσδιοριστούν είτε με βάση κάποια γνωστή στάθμη, όπως είναι η θάλασσα ή κάποια λίμνη, είτε με βάση την παροχή της αμέσως ανάντη διατομής (Neuman), είτε με την εισαγωγή υδρογραφήματος (Dirichelet), είτε με την εξίσωση του κινηματικού κύματος (Dirichelet):

$$\frac{\partial h}{\partial t} + c \frac{\partial h}{\partial x} = 0 \quad (4.4)$$

ενώ η ταχύτητα ροής υπολογίζεται με την εισαγωγή της καμπύλης στάθμης-παροχής για την κατάντη οριακή διατομή. Τέλος, όσον αφορά στις πλευρικές οριακές συνθήκες (lateral boundary conditions) αυτές δεν χρειάζεται να προσδιοριστούν, καθώς ο Αλγόριθμος είναι ικανός να προσδιορίσει τα όρια της ροής μέσω του ανάγλυφου του εδάφους.

Ένα πρώτο εμπόδιο κατά τη διάρκεια ανάπτυξης του αλγορίθμου είναι η επίλυση των εξισώσεων σε ξηρό πυθμένα, καθώς και ο προσδιορισμός των συνεχώς μεταβαλλόμενων ορίων μεταξύ ξηρού και υγρού πυθμένα. Το εμπόδιο αυτό έχει ξεπεραστεί στο παρελθόν από διάφορους ερευνητές (π.χ. Fiedler and Ramirez, 2000) με την εισαγωγή ενός αρχικού βάθους νερού σε όλο το υπολογιστικό πεδίο με πολύ μικρή τιμή, αμελητέα όσον αφορά την τελική επίλυση.

Στην προκειμένη περίπτωση υιοθετήθηκε η τεχνική εισαγωγής ενός κατωφλίου, σύμφωνα με την οποία αν το βάθος νερού σε ένα κελί είναι κάτω από την τιμή του κατωφλίου θεωρείται ξηρό και η ταχύτητα ροής μηδενίζεται, ενώ αντίστοιχα αν είναι μεγαλύτερη θεωρείται υγρό. Η τεχνική αυτή έχει εφαρμοστεί επίσης και από άλλους ερευνητές (Liang et al, 2006) και με αυτόν τρόπο είναι δυνατόν να προσομοιωθεί η δυσανάλογα μεγάλη επίδραση του όρου των τριβών πυθμένα σε μικρά βάθη νερού σε σχέση με αντίστοιχα μεγαλύτερα.

Ένα δεύτερο εμπόδιο που έπρεπε να αντιμετωπιστεί, κατά κύριο λόγο στην εφαρμογή του μοντέλου σε φυσικό ανάγλυφο, ήταν ότι λόγω σφάλματος διασποράς (το αριθμητικό σχήμα McCormack είναι δεύτερης τάξης ακρίβειας) εμφανίζονται ανεπιθύμητες ταλαντώσεις (oscillations) με αποτέλεσμα τις περισσότερες φορές την αδυναμία του αριθμητικού σχήματος να καταλήξει σε αποτέλεσμα λόγω αριθμητικής αστάθειας.

Πληθώρα ερευνητών έχει προτείνει την εισαγωγή αριθμητικών τεχνικών για την εξομάλυνση της αριθμητικής διασποράς. Ενδεικτικά, οι Chaudhry (2008), Fiedler and Ramirez (2000), κ.α., χρησιμοποίησαν μία τεχνική εξομάλυνσης των ταλαντώσεων λόγω αριθμητικών σφαλμάτων (oscillations), χωρίς την ταυτόχρονη αλλοίωση της ακρίβειας των υπολογισμών στο υπόλοιπο υπολογιστικό πεδίο (Jameson et al, 1981).

Άλλοι ερευνητές (π.χ. Liang et al, 2006) ανέπτυξαν παραλλαγές σε γνωστά αριθμητικά σχήματα, όπως το TVD-McCormack (Total Variation Diminishing).

Στην προκειμένη περίπτωση το εν λόγω πρόβλημα αντιμετωπίστηκε με την εισαγωγή τεχνητής-αριθμητικής διάχυσης στο αριθμητικό σχήμα McCormack και συγκεκριμένα αντικαθιστώντας τον πρώτο όρο του βήματος διόρθωσης ως εξής:

$$W_{i,j}^k = \omega W_{i,j}^k + \frac{1}{4}(1 - \omega)(W_{i+1,j}^k + W_{i-1,j}^k + W_{i,j+1}^k + W_{i,j-1}^k) \quad (4.5)$$

όπου ω συντελεστής διάχυσης ο οποίος κυμαίνεται από 0 έως 1. Με την παραπάνω τροποποίηση εισάγεται σφάλμα δεύτερης τάξης ακρίβειας (που συνεπώς δε μειώνει την ακρίβεια του εν λόγω αριθμητικού σχήματος) ανάλογο της δεύτερης παραγωγού, γεγονός που μπορεί να προσομοιώσει τη φυσική διάχυση που σχετίζεται με το ιξώδες του νερού). Ο συντελεστής ω προτείνεται να υπερβαίνει το 0.90.

Η τεχνική αυτή εφαρμόστηκε ικανοποιητικά και σε μονοδιάστατα μοντέλα ασταθούς ροής (Bellos and Hrissanthou, 2011) και προσαρμόστηκε ούτως ώστε να ανταποκρίνεται στην προκειμένη περίπτωση της δισδιάστατης ροής. Η τεχνική αυτή έχει σημαντικό πλεονέκτημα όσον αφορά στην ευκολία προγραμματισμού σε σχέση με άλλες μεθόδους που προαναφέρθηκαν.

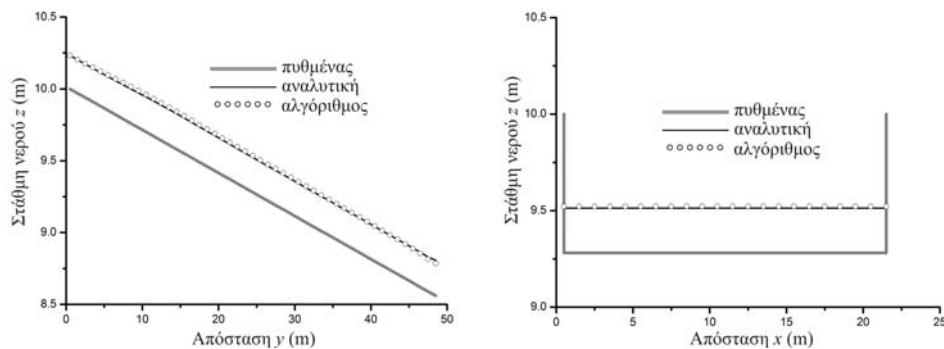
5. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ

Στην παρούσα ενότητα θα γίνει η παρουσίαση κάποιων απλών ελέγχων της απόδοσης του προτεινόμενου Αλγορίθμου με την εκτέλεση κάποιων σεναρίων όπου είναι δυνατόν να υπάρχουν αναλυτικές λύσεις με σκοπό να γίνει σύγκριση αποτελεσμάτων. Επίσης γίνεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων με γνωστά αποτελέσματα που προέκυψαν με βάση συγκεκριμένα σενάρια από τη σχετική βιβλιογραφία, με στόχο τον ποιοτικό έλεγχο του μοντέλου.

Το πρώτο σενάριο αφορά στον έλεγχο συμπεριφοράς του Αλγορίθμου σε υπερκρίσιμες συνθήκες ροής. Συγκεκριμένα σε ορθογωνικό αγωγό πλάτους $B=20$ m με κλίση $S=0.03$ και με συντελεστή τραχύτητας κατά Manning $n=0.03$ s/m^{1/3}, εισέρχεται παροχή $Q=10$ m³/s. Οι συνθήκες ροής είναι υπερκρίσιμες (το κανονικό βάθος ροής σύμφωνα με την εξίσωση της σταθερής ομοιόμορφης ροής κατά Manning είναι $h_n=0.23$ m, ενώ το κρίσιμο βάθος για ορθογωνικό αγωγό είναι $h_c=((Q/B)^2/g)^{1/3}=0.30$ m), επομένως χρειάζονται τρεις γνωστές μεταβλητές (βάθος h , ταχύτητες ροής u και v) για τις ανάντη οριακές συνθήκες και καμία κατάντη (Abbott, 1979).

Ακολουθεί σύγκριση της αριθμητικής με την αναλυτική επίλυση του σεναρίου, η οποία αναλυτική επίλυση προκύπτει από την εξίσωση προσδιορισμού του κανονικού βάθους ροής σε σταθερές και ομοιόμορφες συνθήκες ροής, γνωστής και ως εξίσωσης Manning.

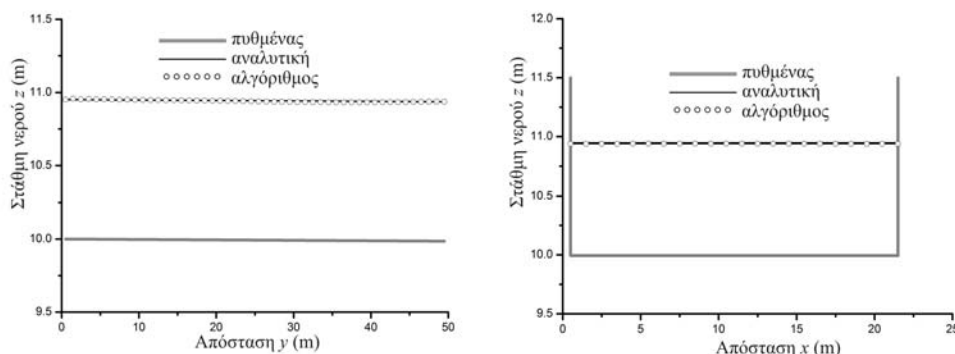
Στο παρακάτω Σχήμα 1 που ακολουθεί, φαίνονται τα αποτελέσματα του Αλγορίθμου όταν η ροή έχει σταθεροποιηθεί, καθώς και η σύγκρισή τους με την αντίστοιχη αναλυτική επίλυση. Σημειώνεται ότι το βήμα χώρου ήταν 1 m και για τις δύο διευθύνσεις, ο αριθμός Courant $C=0.2$, ο συντελεστής διάχυσης $\omega=0.9$ και το κατώφλι προσδιορισμού ξηρού πυθμένα $h_{dry}=0.003$ m.



Σχήμα 1 α. Μηκοτομή της ελεύθερης επιφάνειας του νερού στον κεντρικό άξονα κατά μήκος του αγωγού β. Ενδεικτική διατομή για την υπερκρίσιμη ροή

Το δεύτερο σενάριο αφορά στον έλεγχο συμπεριφοράς του μοντέλου σε υποκρίσιμες συνθήκες ροής. Συγκεκριμένα, έχοντας ως δεδομένο τον ίδιο αγωγό του πρώτου σεναρίου με μόνη διαφορά ότι η κλίση του αγωγού είναι $S=0.0003$, εισέρχεται πάλι παροχή $Q=10 \text{ m}^3/\text{s}$. Οι συνθήκες ροής είναι υποκρίσιμες (το κανονικό βάθος ροής είναι $h_n=0.95 \text{ m}$, ενώ το κρίσιμο βάθος $h_c=0.31 \text{ m}$), επομένως χρειάζονται δύο γνωστές μεταβλητές ως ανάντη οριακές συνθήκες (βάθος και ταχύτητα ροής στην κατά μήκος διεύθυνση) και μία ως κατάντη οριακή συνθήκη (βάθος ροής), (Abbott, 1979).

Στο παρακάτω Σχήμα 2 που ακολουθεί, φαίνονται τα αποτελέσματα του μοντέλου όταν η ροή έχει μονιμοποιηθεί, καθώς και η σύγκρισή τους με την αντίστοιχη αναλυτική επίλυση. Σημειώνεται ότι το βήμα χώρου ήταν 1 m και για τις δύο διευθύνσεις, ο αριθμός Courant $C=0.2$, ο συντελεστής διάχυσης $\omega=0.9$ και το κατώφλι προσδιορισμού ξηρού πυθμένα $h_{dry}=0.003 \text{ m}$.



Σχήμα 2 α. Μηκοτομή της ελεύθερης επιφάνειας του νερού στον κεντρικό άξονα κατά μήκος του αγωγού β. Ενδεικτική διατομή για την υποκρίσιμη ροή

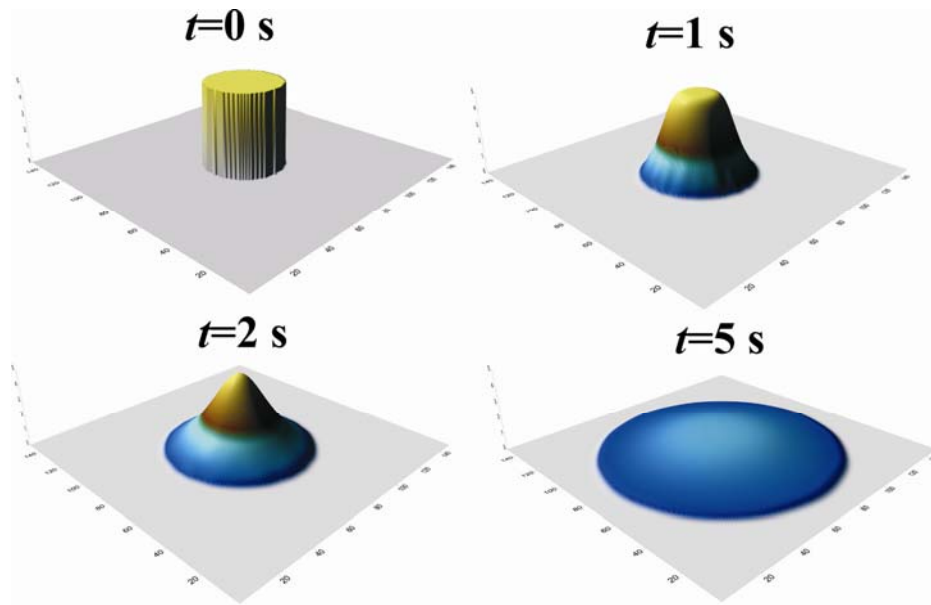
Παρατηρείται ότι και για τις δύο περιπτώσεις (υπερκρίσιμη και υποκρίσιμη ροή), τα αποτελέσματα του Αλγορίθμου επαληθεύονται από τις αναλυτικές λύσεις.

Στο τρίτο σενάριο ελέγχεται ποιοτικά το μοντέλο σε ένα υποθετικό αριθμητικό σενάριο, το οποίο είναι γνωστό από τη βιβλιογραφία ως 'θραύση κυκλικού φράγματος' (circular dam-break) και έχει μελετηθεί από διάφορους ερευνητές. (Anastasiou and Chan, 1997 και Ericum et al, 2010). Στο σενάριο αυτό υπάρχει στήλη νερού η οποία αφήνεται ξαφνικά σε ένα οριζόντιο επίπεδο.

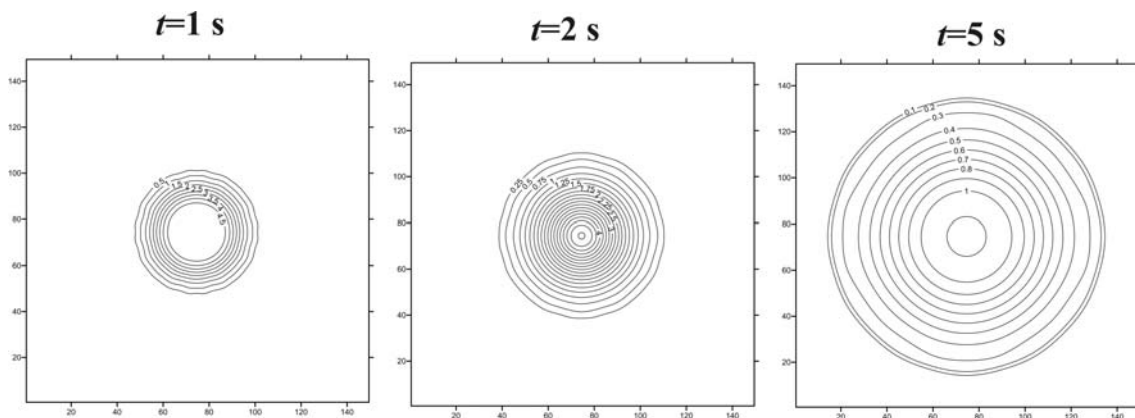
Στην προκειμένη περίπτωση θεωρήθηκε κυλινδρική στήλη νερού ακτίνας 20 m και ύψους 5 m . Ο συντελεστής τραχύτητας του υπολογιστικού πεδίου θεωρήθηκε $n=0.012 \text{ s/m}^{1/3}$. Σημειώνεται ότι το βήμα χώρου είναι 1 m και για τις δύο διευθύνσεις, ο

αριθμός Courant $C=0.1$, ο συντελεστής διάχυσης $\omega=0.9$ και το κατώφλι προσδιορισμού ξηρού πυθμένα $h_{dry}=0.00007$ m.

Στα Σχήματα 3-4 που ακολουθούν απεικονίζονται τα αποτελέσματα του Αλγορίθμου για το εν λόγω σενάριο, τόσο σε τρισδιάστατη μορφή όσο και σε μορφή ισοβαθών, όπου παρατηρείται η αναμενόμενη λόγω συμμετρίας συμπεριφορά του Αλγορίθμου.



Σχήμα 3 Τρισδιάστατη απεικόνιση του τρίτου σεναρίου για διάφορες χρονικές στιγμές



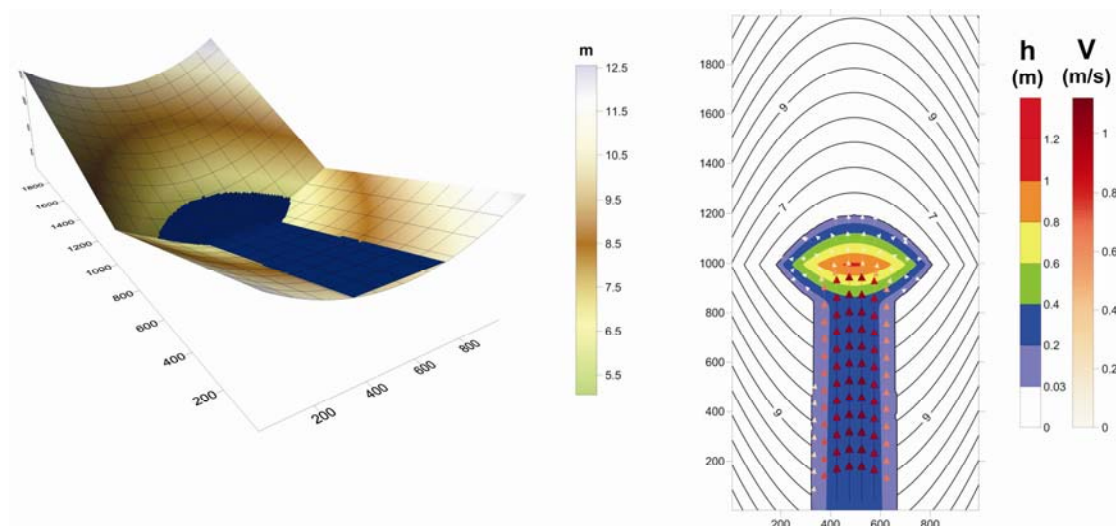
Σχήμα 4 Ισοβαθείς (m) τρίτου σεναρίου

Το τέταρτο σενάριο είναι επίσης ένα σενάριο ποιοτικού ελέγχου του Αλγορίθμου. Συγκεκριμένα εξετάζεται αγωγός του οποίου η διατομή η οποία έχει σχήμα παραβολής δευτέρου βαθμού και είναι πλάτους 1000 m. Στα πρώτα 1000 m κατά μήκος, η κλίση του αγωγού είναι θετική και ίση με $S=0.5\%$, ενώ στα επόμενα 1000 m, η κλίση του αγωγού είναι αρνητική και ίση με $S=-0.5\%$.

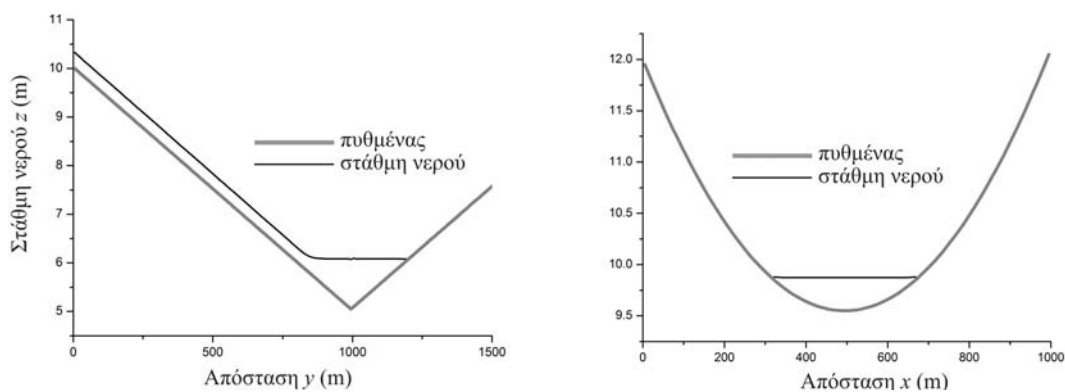
Ως αρχική συνθήκη ορίζεται ο ξηρός πυθμένας (dry bed). Ως ανάντη οριακή συνθήκη ορίζεται τρίωρο τριγωνικό υδρογράφημα, όπου η μέγιστη παροχή (peak) είναι $Q=75$ m³/s στις 2 h, ενώ δεν ορίζεται καμία κατάντη οριακή συνθήκη παρά το γεγονός

ότι η ροή είναι υποκρίσιμη, καθώς λόγω αρνητικής κλίσης το νερό θα πρέπει να 'λιμνάσει' στο κατά μήκος κέντρο του αγωγού.

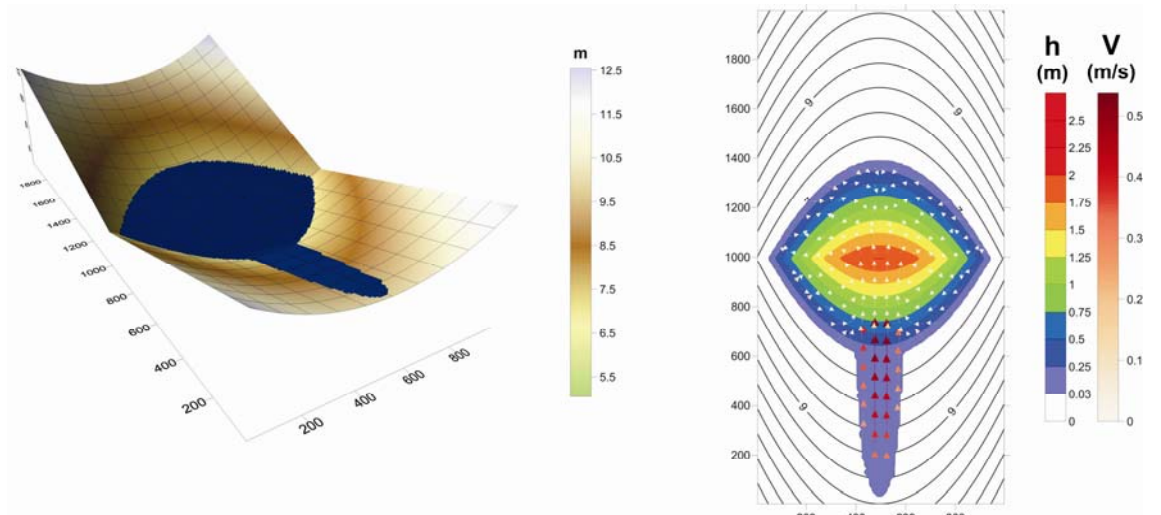
Το χωρικό βήμα και για τις δύο διευθύνσεις είναι 10 m, ενώ ο συντελεστής τραχύτητας Manning είναι $n=0.03 \text{ s/m}^{1/3}$. Ο αριθμός Courant είναι $C=0.8$ και το κατώφλι ξηρού πυθμένα είναι $h_{dry}=0.03 \text{ m}$. Ακολουθούν τα αποτελέσματα του μοντέλου για το εν λόγω σενάριο, για διάφορες χρονικές στιγμές (Σχήματα 5-10).



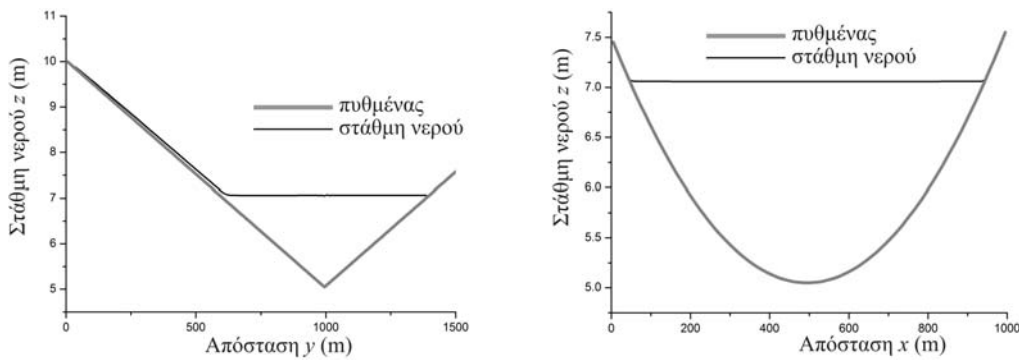
Σχήμα 5 α. Τρισδιάστατη άποψη β. Κάτοψη βαθών και προφίλ ταχυτήτων στο τέταρτο σενάριο τη χρονική στιγμή $t=1 \text{ h}$



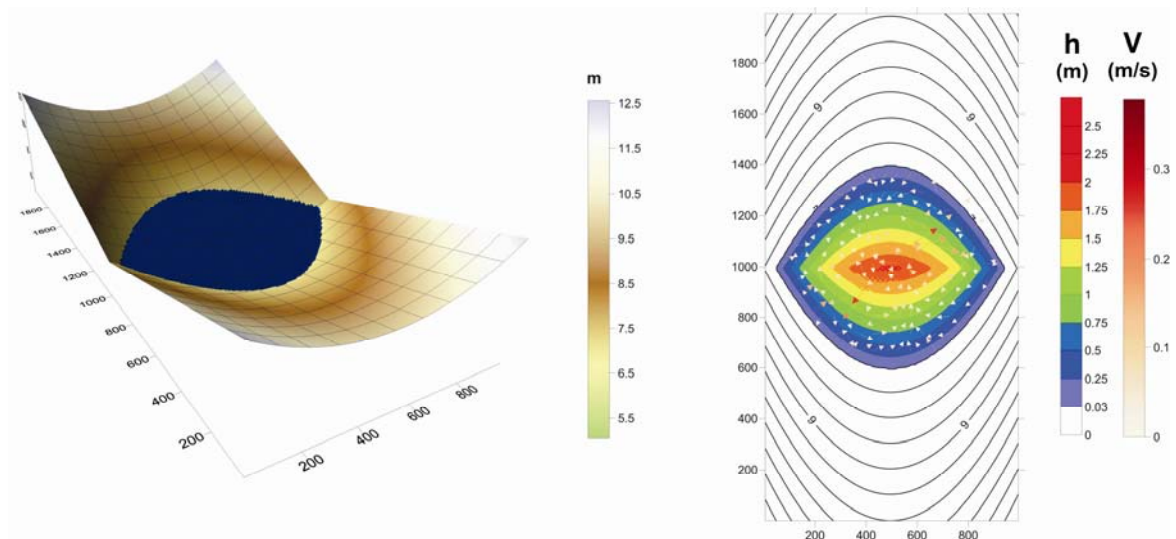
Σχήμα 6 α. Μηκοτομή της ελεύθερης επιφάνειας του νερού στον άξονα συμμετρίας κατά μήκος του αγωγού β. Διατομή στη θέση $x=100 \text{ m}$ στο τέταρτο σενάριο τη χρονική στιγμή $t=1 \text{ h}$



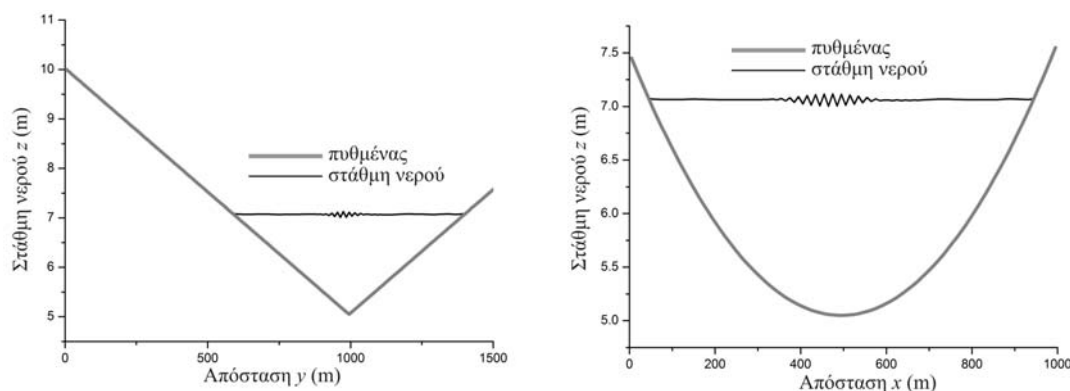
Σχήμα 7 α. Τρισδιάστατη άποψη β. Κάτοψη βαθών και προφίλ ταχυτήτων στο τέταρτο σενάριο τη χρονική στιγμή $t=3$ h



Σχήμα 8 α. Μηκοτομή της ελεύθερης επιφάνειας του νερού στον άξονα συμμετρίας κατά μήκος του αγωγού β. Διατομή στον άξονα συμμετρίας εγκάρσια του αγωγού στο τέταρτο σενάριο τη χρονική στιγμή $t=3$ h



Σχήμα 9 α. Τρισδιάστατη άποψη β. Κάτοψη βαθών και προφίλ ταχυτήτων στο τέταρτο σενάριο σε μόνιμη κατάσταση



Σχήμα 10 α. Μηκοτομή ελεύθερης επιφάνειας του νερού στον άξονα συμμετρίας κατά μήκος του αγωγού β. Διατομή στον άξονα συμμετρίας εγκάρσια του αγωγού στο τέταρτο σενάριο σε μόνιμη κατάσταση

Παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα του μοντέλου είναι αναμενόμενα. Το νερό βρίσκεται σε οριζόντια θέση εγκάρσια του αγωγού, ενώ από κάποια χρονική στιγμή και έπειτα λιμνάζει στο κέντρο του αγωγού (οι ταχύτητες είναι πρακτικά μηδενικές) όπου η κατάσταση μονιμοποιείται όσο και να μεγαλώσει η χρονική στιγμή που εξάγονται τα αποτελέσματα.

Σημειώνεται ότι η μορφή αυτή του παραπάνω αγωγού αποτελεί μία απλοποιημένη μορφή ενός φυσικού αναγλύφου, ενώ τα Σχήματα 5, 7 και 9 αποτελούν μία απλοποιημένη εκδοχή χαρτών πλημμυρικού κινδύνου σύμφωνα με την Οδηγία 2007/60, όπου σε όλο το υπολογιστικό πεδίο πρέπει να απεικονίζονται τα πλημμυρικά όρια, τα βάθη και οι ταχύτητες ροής.

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΙΚΑ ΣΧΟΛΙΑ

Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή του προτεινόμενου Αλγορίθμου και τους σχετικούς ελέγχους, αλλά και άλλους ελέγχους που δεν αναφέρονται στην παρούσα εργασία λόγω περιορισμού της έκτασής της, προκύπτει ότι ο προτεινόμενος Αλγόριθμος είναι ένα αξιόπιστο υπολογιστικό εργαλείο όσον αφορά στην προσομοίωση της διάδευσης πλημμύρας σε φυσικό ανάγλυφο, καθώς και για την κατάρτιση χαρτών πλημμυρικού κινδύνου σε πεδινές και παράκτιες περιοχές που είναι περισσότερο εκτεθειμένες στον κίνδυνο πλημμύρας.

Η προσομοίωση της ροής νερού σε ξηρό πυθμένα είναι ικανοποιητική, ενώ υπάρχει η δυνατότητα υπολογισμού της διάδευσης της πλημμύρας, τόσο με ασταθείς οριακές συνθήκες (υδρογράφημα), όσο και με σταθερές (σταθερή παροχή). Η δυνατότητα του Αλγορίθμου να δέχεται διαφορετικούς συντελεστές τραχύτητας στο υπολογιστικό πεδίο, είναι δυνατόν να προσομοιώσει με μεγαλύτερη ακρίβεια το πλημμυρικό κύμα που προκαλείται.

Ο πρωτότυπος τρόπος εισαγωγής της τεχνητής διάχυσης στο αριθμητικό σχήμα McCormack κρίνεται ικανοποιητικός, καθώς διατηρείται ταυτόχρονα η ικανότητα περιγραφής ασυνεχειών (shock capturing capability) ενώ παράλληλα εξομαλύνονται οι ανεπιθύμητες ταλαντώσεις. Ο νέος σχετικά τρόπος προσδιορισμού της διάκρισης των κινούμενων ορίων μεταξύ ξηρού/υγρού πυθμένα κρίνεται επίσης ικανοποιητικός και έχει ως αποτέλεσμα την ρεαλιστική προσομοίωση της διάδευσης ενός πλημμυρικού κύματος σε τελείως ξηρό πυθμένα.

Από την πρώτη παρουσίαση του αλγορίθμου προκύπτει η ανάγκη για ενδεδειγμένη διερεύνηση για τον έλεγχο της αξιοπιστίας του, τόσο σε υπολογιστικό, όσο και σε πειραματικό επίπεδο. Επίσης μπορεί να γίνει και έλεγχος του μοντέλου σε πραγματικό πεδίο ροής όπου υπάρχουν μετρήσεις παροχής, συνεπώς μπορεί να γίνει επιλογή για το ανάντη όριο του υπολογιστικού πεδίου με βάση έναν υδρομετρικό σταθμό, ενώ θα γίνεται έλεγχος του Αλγορίθμου με τις μετρήσεις των υπόλοιπων σημείων κατάντη.

Βελτιώσεις είναι δυνατόν να γίνουν στην ίδια τη δομή του αλγορίθμου, με κύριο γνώμονα την επιτάχυνση της διαδικασίας των υπολογισμών. Αυτό αφορά τόσο στην επιπρόσθετη βελτίωση του αλγορίθμου σε επίπεδο προγραμματισμού, όσο και στον έλεγχο διαφόρων αριθμητικών τεχνικών που έχουν τη δυνατότητα επιτάχυνσης των υπολογισμών.

Τέλος ο Αλγόριθμος αποτελεί τη βάση για την περαιτέρω διερεύνηση του τρόπου αντιμετώπισης των τριβών πυθμένα σε πραγματικά σενάρια, τόσο σε αριθμητικό/θεωρητικό επίπεδο όσο και με την συνδυασμένη χρήση σύγχρονων τεχνολογιών (φωτογραμμετρική χαρτογράφηση, τηλεπισκόπηση, GIS).

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Abbott, M.B. 1979. *Computational Hydraulics*. Pitman Publishing Ltd., London, England, 324 p.
- Anastasiou, K. and Chan, C.T. 1997. *Solution of the 2D Shallow Water Equations using the Finite Volume Method on unstructured triangular mesh*. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 24: pp. 1225-1245.
- Bellos, C.V. and Sakkas, J.G. 1987. *1D dam-break flood wave propagation on dry bed*. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 113(12): 1510-1524.
- Bellos, V. and Hrissanthou, V. 2011. *Numerical simulation of a dam-break flood wave*. European Water 33: 45-33.
- Chaudhry, M.H. 2008. *Open Channel Flow (Second Edition)*. Springer Editions, New York, NY, 523 pp.
- Erpicum, S., Dewals, B.J., Archambeau, P. and Piroton, M. 2010. *Dam break flow computation based on efficient flux vector splitting*. Journal of Computational and Applied Mathematics, 234: 2143-2151.
- Fennema, R.J. and Chaudhry, M.H. 1986. *Explicit numerical schemes for unsteady free-surface flows with shocks*. Water Resources Research, 22(13): 1923-1930.
- Fiedler, F.R. and Ramirez, J.A. 2000. *A numerical method for simulating discontinuous shallow flow over an infiltrating surface*. International Journal for Numerical Methods in Fluid, 32: 219-240.
- Garcia, R. and Kahawita, R.A. 1986. *Numerical solution of the St. Venant equations with the McCormack finite-difference scheme*. International Journal of Numerical Methods in Fluids, 6: 259-274.
- Guangcai, S., Wenli, W., Liu, Y.L. 2010. *Numerical scheme for simulation of 2D flood waves*. International Conference on Computational and Information Science, Chengdu, Sichuan, China, pp. 846-849.
- Jameson, A., Schmidt, W. and Turkel, E. 1981. *Numerical Solutions of the Euler equations by Finite Volume Methods Using Runge-Kutta Time-Stepping Schemes*. Proc. AIAA 14th Fluid and Plasma Dynamics Conference, Palo Alto, CA: AIAA-81-1259.

- Jovanović, M. and Djordjević, D. 1995. *Experimental verification of the McCormack numerical scheme*. Advances in Engineering Software, 23: 61-67.
- Katopodes, N.D. and Strelkoff, T. 1979. *Two-dimensional shallow water-wave models*. Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, 105(4): 317-334.
- Liang, D., Lin, B. and Falconer, F. A., 2006. *Simulation of rapidly varying flow using an efficient TVD-McCormack scheme*. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 53: 811-826.
- Liang, D., Lin, B. and Falconer, F.A. 2007. *A boundary-fitted numerical model for flow routing with shock-capturing capability*. Journal of Hydrology, 332: 477-486.
- Matsutomi, H. 1983. *Numerical computations of two-dimensional inundation of rapidly varied flows due to breaking of dams*. XX IAHR Congress, Proc., Subject A.d., Vol. 11, Spet. 5-9, Moscow, USSR, pp. 479-488.
- McCormack, R. W., 1970. *Numerical solution of the interaction of a shock wave with a laminar boundary layer*. Second Conference of Numerical Methods in Fluid Dynamics, Berkeley, September: 15-19.
- Preissman, A. 1971. *Modèles pour le calcul de la propagation des crues*. La Houille Blanche: 219-224. (in French).
- Terzidis, G. and Strelkoff, Th. 1970. *Computation of open-channel surges and shocks*. Journal of Hydraulics Division, ASCE, 96(12): 2581-2610.
- Zech, Y., Sorel, M.C. and Vansnick, M. 1983. *Mathematical modelling of floods in rivers and uncovering of flood plains*. International Conference on the Hydraulic Aspects of Floods and Flood Control, Sept. 13-15, London, England, pp. 217-227.

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ ΣΤΟΝ ΚΑΘΟΡΙΣΜΟ ΤΩΝ ΟΜΒΡΙΩΝ ΚΑΜΠΥΛΩΝ

Γ. Τέρτη^{*1}, Π. Γαλιατσάτου¹, Π. Πρίνος¹

¹Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης,
54124, Θεσσαλονίκη, Ελλάδα, *e-mail: galateia@civil.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία υπολογίζονται οι όμβριες καμπύλες για τωρινά και μελλοντικά κλίματα στην Αλεξανδρούπολη και Θεσσαλονίκη. Για την περιγραφή της σχέσης ημερήσιων και ενδο-ημερήσιων ακραίων κατακρημνίσεων, χρησιμοποιείται μία στατιστική μέθοδος υποβιβασμού χρονικής κλίμακας η οποία βασίζεται στη Γενικευμένη Κατανομή Ακραίων Τιμών. Για την αξιολόγηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στις όμβριες καμπύλες, χρησιμοποιούνται προβλέψεις από το περιοχικό κλιματικό μοντέλο KNMI. Συγκρίνοντας τις όμβριες καμπύλες που βασίζονται στα δεδομένα του κλιματικού μοντέλου για το τρέχον κλίμα με αυτές για το μελλοντικό διαπιστώνεται μια σαφής αυξητική τάση στις εντάσεις και τα ύψη βροχής για τη Θεσσαλονίκη ενώ παρουσιάζεται μειωτική τάση για την περιοχή της Αλεξανδρούπολης.

EFFECTS OF CLIMATE CHANGE ON THE ESTIMATION OF INTENSITY-DURATION-FREQUENCY (IDF) CURVES

G. Terti^{*1}, P. Galiatsatou¹, P. Prinos¹

¹Department of Civil Engineering, Aristotle University of Thessaloniki, 54124,
Thessaloniki, Greece, *e-mail: galateia@civil.auth.gr

ABSTRACT

In this study, we calculate IDF curves for the current and future climates for the regions of Alexandroupoli and Thessaloniki (Greece). A statistical downscaling method, which is based on properties of the Generalized Extreme Value (GEV) distribution, is implemented in order to describe the relationships between daily and sub-daily extreme precipitations. Predictions from the regional climate model (RCM) KNMI are used in order to assess how extreme rainfall events may be affected by future climatic conditions. Comparing the IDF curves based on RCM simulations for the current and future climatic conditions, we find a clear increasing trend in the future rainfall intensities and depths for the region of Thessaloniki. However, for the region of Alexandroupoli, rainfall intensities and depths exhibit a decreasing trend.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια πολλές επιστημονικές μελέτες επικεντρώνονται στον καθορισμό της έκτασης και των συνεπειών της κλιματικής αλλαγής στην ένταση και τη συχνότητα των ακραίων βροχοπτώσεων, και κατά συνέπεια στην αστική απορροή (Mailhot et al., 2007). Παρόλο που η φύση και το μέγεθος αυτών των αλλαγών είναι ακόμη πολύ αβέβαια, ενδεχόμενη αύξηση των ακραίων βροχοπτώσεων, θα οδηγήσει σε μεταβολή των καταιγίδων σχεδιασμού (design storms) και κατά συνέπεια θα επηρεάσει τις ιδιότητες της αστικής απορροής εντείνοντας την εμφάνιση πλημμυρών (Grum et al., 2006). Δεδομένου ότι ο σχηματισμός των χρονικών προτύπων βροχόπτωσης βασίζεται σε στατιστική ανάλυση παρελθοντικών ακραίων κατακρημνίσεων, η επάρκεια των αποχετευτικών συστημάτων στο μέλλον είναι εξαιρετικά αμφίβολη.

Οι πολιτικοί μηχανικοί θα πρέπει να ενσωματώσουν τις μελλοντικές κλιματικές συνθήκες στα μοντέλα υπολογισμού της αστικής απορροής προκειμένου να αποφευχθούν αρνητικές επιπτώσεις όπως υπερχειλίσσεις και πλημμύρες. Για το λόγο αυτό, προβλέψεις από υπολογιστικά κλιματικά μοντέλα προσομοίωσης όπως είναι τα Μοντέλα Γενικής Κυκλοφορίας (διεθνώς Global Circulation Models-GCMs) ή τα Περιοχικά Κλιματικά Μοντέλα (διεθνώς Regional Climate Models-RCMs), χρησιμοποιούνται συνήθως ως δεδομένα για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών των βροχοπτώσεων (Olofsson, 2007; Prodanovic-Simonovic, 2007; Desramaut, 2008). Ένα σημαντικό πρόβλημα στην αξιοποίηση των κλιματικών δεδομένων που προκύπτουν από αυτά είναι η αναντιστοιχία της χωρικής και χρονικής κλίμακας που χρησιμοποιείται στις αναλύσεις των κλιματικών μοντέλων με αυτή που χρησιμοποιείται στα μοντέλα προσομοίωσης της αστικής απορροής. Κατά συνέπεια, η εφαρμογή μεθόδων προσαρμογής της μεγάλης χωρικής και χρονικής κλίμακας των κλιματικών μοντέλων σε λεπτομερέστερη κλίμακα (μέθοδοι υποβιβασμού κλίμακας) είναι απαραίτητη (Nguyen et al., 2006, 2010).

Οι συνηθέστερες μέθοδοι υποβιβασμού κλίμακας είναι οι στατιστικές, οι οποίες έχουν μικρό υπολογιστικό κόστος σε σύγκριση με τις δυναμικές και μπορούν να εφαρμοστούν στα δεδομένα που προκύπτουν είτε από GCMs ή είτε από RCMs, για να περιγράψουν τη σχέση μεταξύ των ημερήσιων κλιματικών μεταβλητών σε παγκόσμια ή τοπική κλίμακα και των τοπικών ημερήσιων ή ενδο-ημερήσιων μεταβλητών των ακραίων βροχοπτώσεων για την εκτίμηση των σχέσεων έντασης-διάρκειας-περιόδου επαναφοράς (όμβριες καμπύλες) για τις τρέχουσες και τις μελλοντικές κλιματικές συνθήκες. Οι Sunyer et al. (2011) συνέκριναν πέντε στατιστικές μεθόδους υποβιβασμού κλίμακας που βασίζονται σε μια μεθοδολογία κοινής στατιστικής παραμέτρου χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα από τέσσερα διαφορετικά RCMs που προέρχονται από διαφορετικά GCMs και παρατήρησαν ότι υπάρχουν μεγάλες αβεβαιότητες στις μελλοντικές στατιστικές παραμέτρους που προκύπτουν από τον στατιστικό υποβιβασμό, εν μέρει λόγω της μεταβλητότητας στις παραμέτρους των τεσσάρων RCMs και εν μέρει λόγω της μεθόδου υποβιβασμού που επιλέγεται και εφαρμόζεται κάθε φορά.

Οι Nguyen et al (2002) πρότειναν μια στατιστική μέθοδο υποβιβασμού χρονικής κλίμακας η οποία βασίζεται στη Γενικευμένη Κατανομή Ακραίων Τιμών (ΓΑΤ, διεθνώς GEV) προκειμένου να περιγραφεί η σχέση ημερήσιων και ενδο-ημερήσιων ακραίων κατακρημνίσεων για την εξαγωγή των όμβριων καμπυλών για τωρινά και μελλοντικά κλίματα. Πρόσφατα, οι Beuchat et al (2011) παρουσίασαν μια νέα μέθοδο για τον υποβιβασμό ενδο-ημερήσιας βροχόπτωσης από ημερήσια δεδομένα που χρησιμοποιεί πολυπαραγοντικές καμπύλες παλινδρόμησης (multivariate adaptive regression splines). Ο κύριος στόχος της μελέτης ήταν να διερευνηθεί η εξάρτηση των

στατιστικών παραμέτρων από τον υποβιβασμό της χρονικής κλίμακας. Αυτή η μέθοδος, όμως, εφαρμόστηκε για την αναπαραγωγή ωριαίων και όχι ενδο-ωριαίων στατιστικών. Στη μελέτη των Willems, et al. (2012) παρουσιάζεται μια ανασκόπηση των υφιστάμενων μεθόδων που χρησιμοποιούν διαδικασίες χρονικού και χωρικού υποβιβασμού για την αξιολόγηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στις κατακρημνίσεις σε αστικές λεκάνες απορροής.

Η παρούσα επιστημονική μελέτη αρχικά αξιολογεί την καταλληλότητα της μεθόδου χρονικού υποβιβασμού που προτάθηκε από τους Nguyen et al (2002) για τον καθορισμό της κατανομής βροχοπτώσεων μικρής διάρκειας από μεγαλύτερες διάρκειες για τις περιοχές της Αλεξανδρούπολης και της Κοζάνης. Οι όμβριες καμπύλες για τις σημερινές κλιματικές συνθήκες κατασκευάζονται με βάση τις παρατηρήσεις που αφορούν στη μέγιστη ετήσια κατακρήμνιση στο σταθμό «Μακεδονία» του Διεθνούς Αεροδρομίου Θεσσαλονίκης για την περίοδο 1963-1987 και στο σταθμό της Αλεξανδρούπολης για την περίοδο 1973-1987, αντίστοιχα. Τα δεδομένα των μέγιστων ετήσιων κατακρημνίσεων (MEK) που αντιπροσωπεύουν το μέγιστο ετήσιο ύψος βροχής που πέφτει κάθε χρόνο σε ημερήσια ή ενδο-ημερήσια βάση, διατίθενται από την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (EMY) για 9 χρονικές διάρκειες (5, 10, 15, 30 λεπτά - 1, 2, 6, 12, 24 ώρες). Αφού διαπιστωθεί η ακρίβεια της μεθόδου, χρησιμοποιούνται κλιματικά δεδομένα για τωρινές και μελλοντικές χρονικές περιόδους, που παρέχονται από το κλιματικό μοντέλο KNMI-RACMO2 με στόχο να αξιολογηθούν οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στις σχέσεις έντασης-διάρκειας-περιόδου επαναφοράς στην Αλεξανδρούπολη και τη Θεσσαλονίκη.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Στην παρούσα εργασία ο προσδιορισμός των κατανομών και των επιπέδων επαναφοράς της βροχόπτωσης για το σύνολο των δεδομένων είτε πρόκειται για τις παρατηρήσεις στους συγκεκριμένους σταθμούς των δύο πόλεων (μέγιστη ετήσια κατακρήμνιση) είτε για τα δεδομένα του κλιματικού μοντέλου, γίνεται με τη βοήθεια της Γενικευμένης Κατανομής Ακραίων Τιμών (διεθνώς GEV distribution). Όσον αφορά στα κλιματικά δεδομένα, χρησιμοποιείται μία στατιστική μέθοδος υποβιβασμού χρονικής κλίμακας για να υπολογιστούν τα στατιστικά χαρακτηριστικά της βροχόπτωσης για διάρκειες μικρότερες των 24 ωρών, που παρέχονται από το περιοχικό κλιματικό μοντέλο. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην κατανομή GEV.

2.1 Η ΓΕΝΙΚΕΥΜΕΝΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΑΚΡΑΙΩΝ ΤΙΜΩΝ

Η Γενικευμένη Κατανομή Ακραίων τιμών (GEV) συνδυάζει τις κατανομές ακραίων τιμών τύπου I, II και III σε μία ενιαία μαθηματική έκφραση και αποδεικνύεται κατάλληλη για τη μέγιστη ένταση βροχής σε μεγάλο εύρος περιπτώσεων (Koutsogiannis, Mamassis, 2001). Η συνάρτηση κατανομής, $F(x)$, δίνεται από την έκφραση:

$$F(x) = \exp \left\{ - \left[1 + \frac{\xi(x - \mu)}{\sigma} \right]^{\frac{1}{\xi}} \right\}, \quad \xi \neq 0 \quad (2.1)$$

όπου μ , σ και ξ είναι οι παράμετροι θέσης, κλίμακας και σχήματος αντίστοιχα. Στην παρούσα μελέτη οι τρεις παράμετροι υπολογίζονται με τη μέθοδο των L-ροπών.

Αποδεικνύεται (Nguyen et al., 2002) ότι η k -οστή μη κεντρική ροπή της κατανομής, m_k , μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση των τριών παραμέτρων της κατανομής GEV σύμφωνα με τη σχέση:

$$m_k = \sum_{i=0}^k \binom{k}{i} (-1)^i \left(-\frac{\sigma}{\xi} \right)^i \left(\mu - \frac{\sigma}{\xi} \right)^{k-i} \Gamma(1-i\xi) \quad (2.2)$$

όπου $\Gamma(\cdot)$ είναι η κατανομή Γάμμα (διεθνώς Gamma). Για $k=1, 2, 3$ η (2.3) γίνεται:

$$m_k = \left(\mu - \frac{\sigma}{\xi} \right)^k + (-1)^k \left(-\frac{\sigma}{\xi} \right)^k \Gamma(1-k\xi) + k \sum_{i=1}^{k-1} (-1)^i \left(-\frac{\sigma}{\xi} \right)^i \left(\mu - \frac{\sigma}{\xi} \right)^{k-i} \Gamma(1-i\xi) \quad (2.3)$$

Μετά τον υπολογισμό των παραμέτρων, υπολογίζεται η τιμή της μεταβλητής X_T για κάθε περίοδο επαναφοράς από τη σχέση:

$$X_T = \mu - \frac{\sigma}{\xi} \left\{ 1 - [-\ln(1-p)]^{-\xi} \right\} \quad (2.4)$$

όπου p είναι η πιθανότητα υπέρβασης για περίοδο επαναφοράς T (σε έτη):

$$p = \frac{1}{T} \quad (2.5)$$

2.2 ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΥΠΟΒΙΒΑΣΜΟΥ ΧΡΟΝΙΚΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ

Όπως προαναφέρθηκε η στατιστική μέθοδος υποβιβασμού χρονικής κλίμακας που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία προτάθηκε από τους Nguyen et al. (2002) και βασίζεται στην αρχή ότι μία συνάρτηση $f(x)$ είναι συνάρτηση υποβιβασμού αν είναι ανάλογη με τη συνάρτηση $f(\lambda x)$ για όλες τις θετικές τιμές του συντελεστή υποβιβασμού κλίμακας λ . Δηλαδή αν η $f(x)$ είναι συνάρτηση υποβιβασμού κλίμακας τότε υπάρχει μία συνάρτηση $C(\lambda)$ έτσι ώστε

$$f(x) = C(\lambda) f(\lambda x) \quad (2.6)$$

Οι Nguyen et al. (2002) απέδειξαν ότι

$$C(\lambda) = \lambda^{-\beta} \quad (2.7)$$

και

$$f(x) = x^\beta f(1) \quad (2.8)$$

όπου το β είναι μία σταθερά. Έτσι, η σχέση μεταξύ μη-κεντρικής ροπής k τάξης, m_k , και της μεταβλητής x , μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$m_k = E\{f^k(x)\} = \alpha(k) x^{\beta(k)} \quad (2.9)$$

όπου $\alpha(k) = E\{f^k(1)\}$ και $\beta(k) = \beta k$. Από την (2.9) υπολογίζονται οι τρεις μη-κεντρικές ροπές m_1, m_2, m_3 . Οι Nguyen et al. (2002) και ο Desramaut (2008) χρησιμοποίησαν την εξίσωση (2.9) για να εξάγουν ένα απλό μοντέλο για δύο διαφορετικές χρονικές κλίμακες t και λt ($\lambda \leq 1$), το οποίο θεωρεί την παράμετρο σχήματος της κατανομής GEV σταθερή σε όλες τις διάρκειες ενώ οι παράμετροι της θέσης και της κλίμακας της μικρότερης χρονικής κλίμακας (λt) μεταβάλλονται ανάλογα με τις παραμέτρους της μεγαλύτερης κλίμακας (t) με βάσει ένα συντελεστή ίσο με λ^β .

Στην παρούσα εργασία, η παράμετρος σχήματος, ξ , σε αντίθεση με την υπόθεση των Nguyen et al. (2002) όπου η παράμετρος σχήματος, κ ($\kappa = -\xi$), θεωρείται πως μεταβάλλεται σε κάθε διάρκεια. Έτσι, επιδιώκεται μεγαλύτερη ακρίβεια στις εκτιμήσεις της μεθόδου. Η παραδοχή ότι η παράμετρος σχήματος κ της κατανομής GEV δεν είναι σταθερή για όλες τις χρονικές κλίμακες, προϋποθέτει ότι η κατανομή των ετήσιων μέγιστων δεν έχει συγκλίνει πλήρως (Veneziano et al., 2009). Αυστηρά μιλώντας, πλήρης σύγκλιση επιτυγχάνεται όταν η περίοδος επαναφοράς $T \rightarrow \infty$. Ακολουθώντας την παραδοχή αυτή στην εν λόγω εργασία, παρατηρείται ότι οι υπολογιζόμενες παράμετροι της κατανομής GEV που προκύπτουν απ' ευθείας από τις ιστορικές καταγραφές για διάφορες διάρκειες συμφωνούν ικανοποιητικά με αυτές που υπολογίζονται βάσει των δεδομένων από το κλιματικό μοντέλο μέσω της εξίσωσης (2.3) μετά την εφαρμογή της μεθόδου υποβιβασμού της (2.9).

3. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

3.1 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΟΣΗΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΥΠΟΒΙΒΑΣΜΟΥ ΧΡΟΝΙΚΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ ΣΤΙΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Οι περιοχές μελέτης αναφέρονται στην πόλη της Θεσσαλονίκης και της Αλεξανδρούπολης, αντίστοιχα. Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή των όμβριων καμπυλών παρέχονται από την ΕΜΥ και είναι τα παρακάτω:

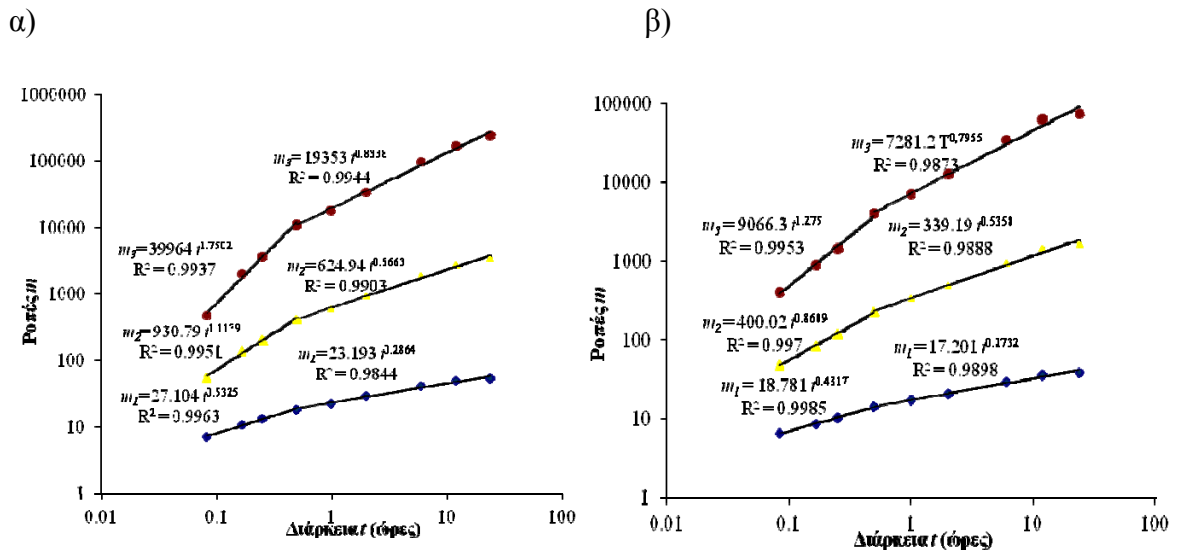
- Μέγιστα ετήσια ύψη βροχής (Μέγιστη Ετήσια Κατακρήμιση-MEK) για διάρκειες (5, 10, 15, 30 λεπτά - 1, 2, 6, 12, 24 ώρες) για την περίοδο 1963-1987 για το σταθμό «Μακεδονία» του Διεθνούς Αεροδρομίου Θεσσαλονίκης.
- Μέγιστα ετήσια ύψη βροχής για διάρκειες (5, 10, 15, 30 λεπτά - 1, 2, 6, 12, 24 ώρες) για την περίοδο 1973-1987 για το σταθμό της Αλεξανδρούπολης.

Τα παραπάνω δεδομένα χρησιμοποιούνται επίσης για τον προσδιορισμό των σταθερών οι οποίες υπεισέρχονται στην εξίσωση σύμφωνα με την οποία υποβιβάζονται χρονικά οι στατιστικές παράμετροι των MEK στις περιοχές μελέτης. Για το σκοπό αυτό, κατασκευάζονται τα λογαριθμικά διαγράμματα των τριών πρώτων μη-κεντρικών ροπών (MKP) σε συνάρτηση με τη διάρκεια βροχόπτωσης (Γράφημα 1). Η γραμμική τάση των τιμών στα λογαριθμικά διαγράμματα των MKP των MEK, όπως φαίνεται στο Γράφημα 1, δίνει τη γραμμική σχέση εξάρτησης (δηλαδή κλιμάκωσης) των στατιστικών ροπών με τη διάρκεια της βροχόπτωσης (2.9). Οι κλίσεις των ευθειών είναι ανάλογες με ένα συντελεστή β .

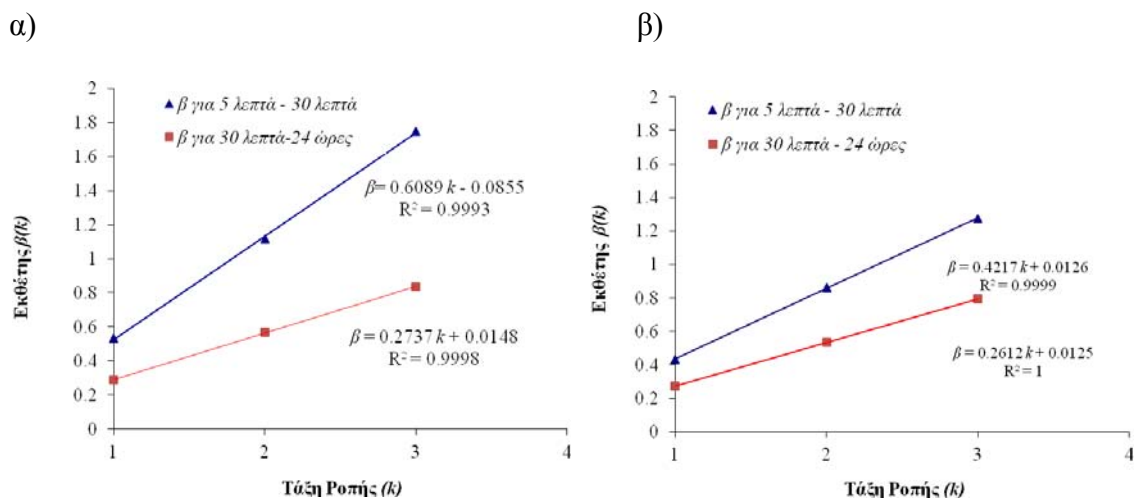
Σύμφωνα με το Γράφημα 1, στην παρούσα μελέτη, προκύπτουν δύο διαφορετικά μοντέλα υποβιβασμού (Γράφημα 1), ένα μεταξύ 5 και 30 λεπτών και ένα μεταξύ 30 λεπτών και 24 ωρών. Επιπρόσθετα, η γραμμικότητα του εκθέτη $\beta(k)$ με την ροπή k -τάξης υποστηρίζει την υπόθεση ότι οι χρησιμοποιούμενες χρονοσειρές των MEK μπορούν να περιγραφούν από δύο απλά μοντέλα υποβιβασμού. Το Γράφημα 2α και 2β

απεικονίζει τη γραμμικότητα του εκθέτη υποβιβασμού $\beta(k)$ για το σταθμό «Μακεδονία» και το σταθμό της Αλεξανδρούπολης, αντίστοιχα.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, είναι δυνατόν να υπολογιστούν οι μη-κεντρικές ροπές και η κατανομή των ΜΕΚ για διάρκειες βροχόπτωσης μικρότερες της μίας ημέρας από διαθέσιμες ημερήσιες ακραίες τιμές βροχόπτωσης που ανήκουν στο ίδιο μοντέλο υποβιβασμού χρονικής κλίμακας (γνωστό β). Η δυνατότητα αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική για την προσαρμογή των κλιματικών δεδομένων που δίνονται σε ημερήσια κλίμακα από το περιοχικό κλιματικό μοντέλο ΚΝΜΙ σε μικρότερη χρονική κλίμακα (ενδο-ημερήσια) έτσι ώστε να παραχθούν οι όμβριες καμπύλες για το μελλοντικό κλίμα στην Αλεξανδρούπολη και τη Θεσσαλονίκη.



Γράφημα 1. Διάγραμμα των ΜΚΡ των ΜΕΚ σε συνάρτηση με τη διάρκεια για το σταθμό α) της Αλεξανδρούπολης και β) της Θεσσαλονίκης (σταθμός «Μακεδονία»).

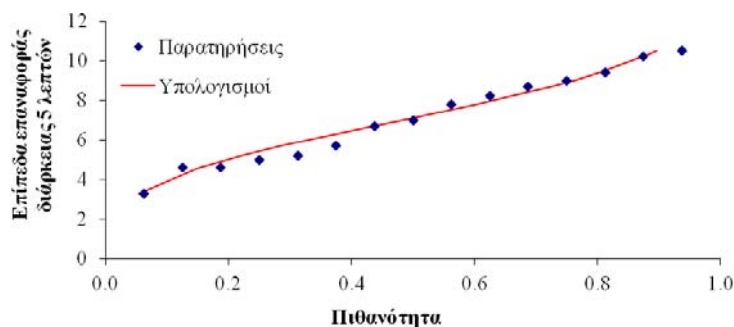


Γράφημα 2. Διάγραμμα του εκθέτη υποβιβασμού $\beta(k)$ με την τάξη των ΜΚΡ για το σταθμό α) της Αλεξανδρούπολης και β) της Θεσσαλονίκης (σταθμός «Μακεδονία»).

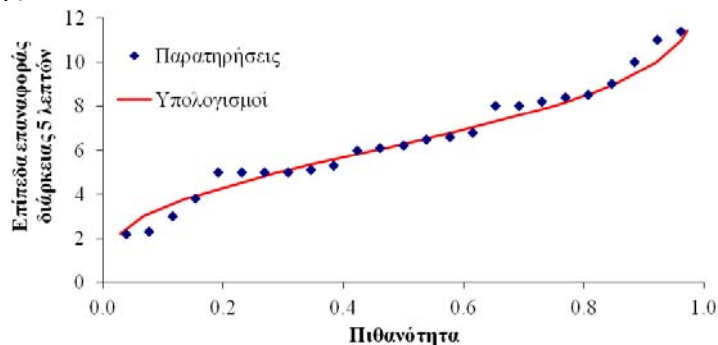
Το Γράφημα 3α και 3β παρουσιάζει μία σύγκριση μεταξύ της κατανομής των ΜΕΚ διάρκειας 5 λεπτών που προκύπτει από τις παρατηρήσεις και αυτής που υπολογίζεται με χρήση του μοντέλου υποβιβασμού χρονικής κλίμακας για το σταθμό

«Μακεδονία» και το σταθμό της Αλεξανδρούπολης, αντίστοιχα. Και για τους δύο σταθμούς παρατηρείται ότι η εκτιμώμενη κατανομή GEV προσαρμόζεται ικανοποιητικά στις παρατηρήσεις, ακόμη και στις ακραίες τιμές των δεδομένων. Η προσαρμοστικότητα της κατανομής ενισχύεται από το γεγονός ότι οι παράμετροι της κατανομής GEV υπολογίζονται άμεσα από τις τρεις μη-κεντρικές ροπές μετά την εφαρμογή του μοντέλου υποβιβασμού. Ακολουθώντας αυτή τη διαδικασία, ο έλεγχος της κατανομής παρουσιάζει μικρότερο τετραγωνικό σφάλμα μεταξύ των παρατηρήσεων και των υπολογιζόμενων (χρονικά υποβιβασμένων) δεδομένων σε σχέση με αυτό που προκύπτει αν θεωρηθεί σταθερή η παράμετρος σχήματος στις διάφορες διάρκειες.

α)



β)



Γράφημα 3. Επίπεδα επαναφοράς 5 λεπτής βροχόπτωσης με βάσει τις παρατηρήσεις και τους υπολογισμούς για το σταθμό α) της Αλεξανδρούπολης και β) της Θεσσαλονίκης (σταθμός «Μακεδονία»).

3.2 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΟΜΒΡΙΩΝ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΚΑΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ

Στο δεύτερο τμήμα της παρούσας μελέτης, χρησιμοποιούνται οι προβλέψεις του περιοχικού μοντέλου KNMI-RACMO2 για την εξαγωγή των όμβριων καμπυλών για το τρέχον και το μελλοντικό κλίμα στις περιοχές μελέτης. Συγκεκριμένα, για την Αλεξανδρούπολη λαμβάνεται ως τωρινό κλίμα η περίοδος 1950-2010 και ως μελλοντικό κλίμα η περίοδος 2011-2100. Από την άλλη, για την περιοχή της Θεσσαλονίκης τα διαστήματα για τα οποία παρουσιάζεται με μεγαλύτερη σαφήνεια η μελλοντική τάση είναι η περίοδος 1950-2000 και 2001-2100 για το τωρινό και το μελλοντικό κλίμα αντίστοιχα.

Οι σχέσεις υποβιβασμού κλίμακας καθορίζονται, όπως αναφέρεται παραπάνω, βάσει των MEK και για τις 9 διάρκειες (5, 10, 15, 30 λεπτά - 1, 2, 6, 12, 24 ώρες) για το διάστημα 1973-1987 και 1963-1987 για την Αλεξανδρούπολη και τη Θεσσαλονίκη

αντίστοιχα, με χρήση της (2.9). Χρησιμοποιώντας τις τρεις ΜΚΡ των ημερήσιων βροχοπτώσεων που παρέχονται από το κλιματικό μοντέλο για τα τωρινά και τα μελλοντικά κλίματα και λαμβάνοντας σταθερό το συντελεστή $\beta(k)$ για τις δύο περιόδους προσομοίωσης (διάρκειες 5-30 λεπτών και 30 λεπτών-24 ωρών), υπολογίζονται οι συντελεστές $a(k)$ και για τις δύο περιόδους σε κάθε περιοχή μελέτης (1950-2010/2011-2100 και 1950-2000/2001-2100). Οι συντελεστές αυτοί χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για τον εκ νέου καθορισμό των μη κεντρικών ροπών, μ_k , μέσω της (2.9) για κάθε ενδο-ημερήσια διάρκεια βροχόπτωσης. Έπειτα, εξάγονται οι παράμετροι της κατανομής GEV για τα τωρινά και τα μελλοντικά κλίματα μέσω της (2.3) χρησιμοποιώντας τις τρεις πρώτες μη-κεντρικές ροπές. Τέλος, μετά την εκτίμηση όλων των παραμέτρων της κατανομής GEV για κάθε ενδο-ημερήσια διάρκεια βροχόπτωσης υπολογίζονται τα επίπεδα επαναφοράς των ενδο-ημερήσιων ΜΕΚ για τις τωρινές και τις μελλοντικές περιόδους βάσει της (2.4).

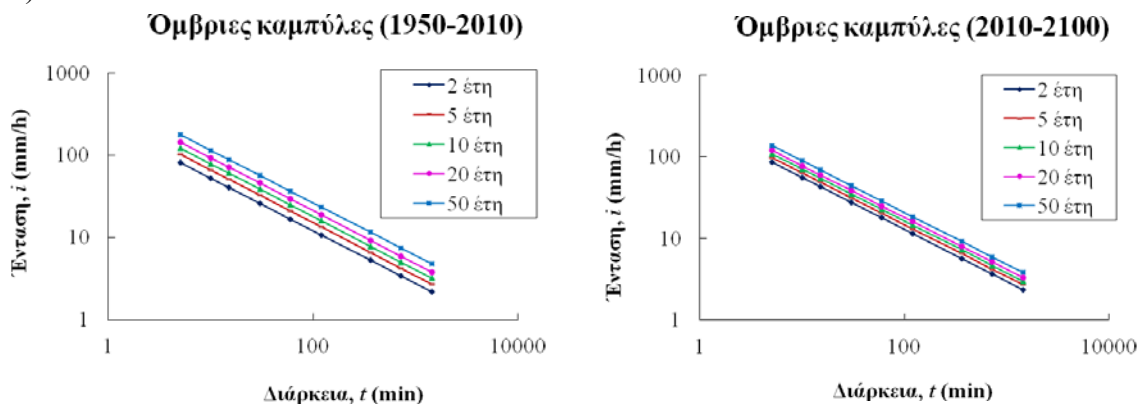
Η εξαγωγή των σχέσεων Έντασης-Διάρκειας-Συχνότητας των ακραίων βροχοπτώσεων για τις διάφορες διάρκειες και περιόδους επαναφοράς στα τωρινά και μελλοντικά κλίματα αντίστοιχα, γίνεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$i = \frac{a \times T^c}{t^{(1-b)}} \quad (3.1)$$

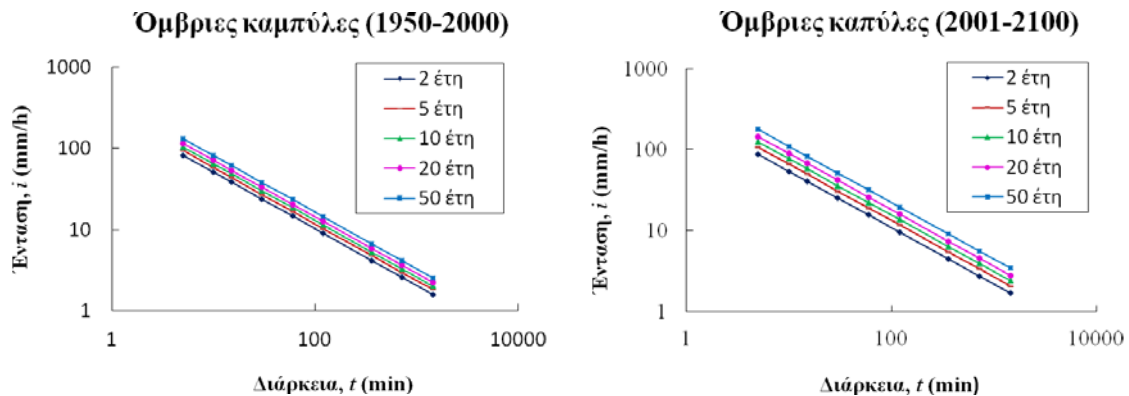
όπου i η ένταση της βροχόπτωσης (mm/h), t η διάρκεια της βροχόπτωσης (h), T η περίοδος επαναφοράς (έτη) και a , b , c σταθερές.

Το Γράφημα 4α παρουσιάζει τις όμβριες καμπύλες που προκύπτουν από τα χρονικά υποβιβασμένα ημερήσια ύψη βροχής που παρέχονται από το μοντέλο KNMI-RACMO2 για το τωρινό και τα μελλοντικό κλίμα αντίστοιχα, στην Αλεξανδρούπολη. Η σύγκριση μεταξύ των όμβριων καμπυλών για το παρόν (1950-2010) και το μέλλον (2011-2100) δείχνει μειωτική τάση στις εντάσεις και τα ύψη βροχόπτωσης. Στο Γράφημα 4β παρουσιάζονται οι όμβριες καμπύλες που προκύπτουν για τη Θεσσαλονίκη. Στην περίπτωση της Θεσσαλονίκης οι εντάσεις και τα ύψη βροχής εμφανίζουν μία σαφή αυξητική τάση.

α)



β)



Γράφημα 4. Όμβριες καμπύλες με βάση τα δεδομένα του κλιματικού μοντέλου KNMI για τις περιόδους α) 1950-2010 και 2011-2100 για το σταθμό της Αλεξανδρούπολης και β) 1950-2000 και 2001-2100 για το σταθμό «Μακεδονία».

Αξίζει να σημειωθεί ότι η άμεση σύγκριση μεταξύ των όμβριων καμπυλών που βασίζονται σε παρατηρούμενες τιμές βροχοπτώσεων με αυτές που προκύπτουν από τα στοιχεία του κλιματικού μοντέλου για το τρέχον κλίμα, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο υποβιβασμού κλίμακας (temporal GEV-scaling method), δε θα ήταν αποτελεσματική και γι αυτό δεν πραγματοποιείται στην παρούσα εργασία. Το κλιματικό μοντέλο φαίνεται να έχει την τάση να υποεκτιμά ή να υπερεκτιμά την ημερήσια και ενδο-ημερήσια βροχόπτωση ανάλογα με την περιοχή μελέτης ιδιαίτερα για μικρές περιόδους επαναφοράς (2, 5, 10, 20, 50 έτη). Το γεγονός αυτό είναι πιθανό να οφείλεται σε δύο λόγους. Ο πρώτος λόγος είναι ότι η περίοδος προσομοίωσης δεν ταυτίζεται απόλυτα, αφού τα διαθέσιμα δεδομένα για το τωρινό κλίμα στους σταθμούς αφορούν στα διαστήματα 1973-1987 (Αλεξανδρούπολη) και 1963-1987 (Θεσσαλονίκη) ενώ τα δεδομένα του κλιματικού μοντέλου για το τωρινό κλίμα αφορούν στα διαστήματα 1950-2010 και 1950-2001 για την Αλεξανδρούπολη και τη Θεσσαλονίκη αντίστοιχα. Ο δεύτερος λόγος είναι η αναντιστοιχία της χωρικής κλίμακας του κλιματικού μοντέλου με τους συγκεκριμένους σταθμούς. Παρά το γεγονός ότι τα περιοχικά κλιματικά δεδομένα προσφέρουν αναλύσεις λεπτομερέστερης χωρικής κλίμακας (25x25 km) σε σχέση με τα μοντέλα Γενικής Κυκλοφορίας, για να πραγματοποιηθεί άμεση σύγκριση μεταξύ των όμβριων καμπυλών που βασίζονται σε παρατηρούμενες τιμές βροχοπτώσεων σε ένα συγκεκριμένο σταθμό με αυτές που προκύπτουν από τα στοιχεία του κλιματικού μοντέλου για το τρέχον κλίμα απαιτείται εκτός από χρονικός υποβιβασμός και χωρικός υποβιβασμός της κλίμακας.

Οι Wilby et al. (2002) περιέγραψαν ένα στατιστικό μοντέλο χωρικού υποβιβασμού γνωστό ως SDSM για την εκτίμηση τοπικών (σημειακών) σεναρίων για τις ημερήσιες μεταβλητές τωρινών και μελλοντικών κλιματικών συνθηκών. Οι Nguyen et al. (2008) εφάρμοσαν μία μέθοδο υποβιβασμού χωρικής κλίμακας που βασίζεται στη μέθοδο SDSM για να συνδέσουν μεταβλητές από ένα μοντέλο Γενικής Κυκλοφορίας με τις τοπικές ακραίες βροχοπτώσεις σε συνδυασμό με μια μέθοδο υποβιβασμού χρονικής κλίμακας η οποία βασίζεται στη Γενικευμένη Κατανομή Ακραίων Τιμών προκειμένου να περιγραφεί η σχέση ημερήσιων και ενδο-ημερήσιων ακραίων κατακρημνίσεων.

Στην παρούσα μελέτη, εξετάστηκε μια διαδικασία προσαρμογής της χωρικής κλίμακας προκειμένου να συνδεθούν τα δεδομένα του κλιματικού μοντέλου KNMI με τις παρατηρήσεις στους συγκεκριμένους σταθμούς. Τα αποτελέσματα δείχνουν μια μικρή αύξηση των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων, σε σύγκριση με εκείνα που

λαμβάνονται χωρίς την εφαρμογή της απλής διαδικασίας προσαρμογής χωρικής κλίμακας. Σε κάθε περίπτωση, οι γενικότερες τάσεις (αυξητικές ή μειωτικές) για τις βροχοπτώσεις της κάθε περιοχής στη μελλοντική περίοδο, δε μεταβάλλονται με την εφαρμογή ή μη της διαδικασίας προσαρμογής της χωρικής κλίμακας.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Όπως προαναφέρθηκε, η χρήση των διαφόρων μεθόδων υποβιβασμού κλίμακας είναι απαραίτητη για την προσαρμογή των προβλέψεων των μοντέλων Γενικής Κυκλοφορίας και των περιοχικών κλιματικών μοντέλων σε κατάλληλες κλίμακες χώρου και χρόνου, προκειμένου να τα χρησιμοποιηθούν ως δεδομένα στις υδρολογικές μελέτες.

Στην εν λόγω μελέτη χρησιμοποιώντας προβλέψεις από το περιοχικό κλιματικό μοντέλο KNMI-RACMO2, εκτιμήθηκαν οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στις σχέσεις έντασης-διάρκειας-περιόδου επαναφοράς, για την Αλεξανδρούπολη και τη Θεσσαλονίκη. Για τη σύνδεση των ημερήσιων δεδομένων που παρέχονται από το κλιματικό μοντέλο με τις ενδο-ημερήσιες ακραίες κατακρημνίσεις για την εξαγωγή των όμβριων καμπυλών για τωρινές και μελλοντικές κλιματικές συνθήκες, εφαρμόστηκε μια στατιστική μέθοδος υποβιβασμού χρονικής κλίμακας η οποία βασίζεται στη Γενικευμένη Κατανομή Ακραίων Τιμών (GEV distribution). Η σύγκριση μεταξύ των όμβριων καμπυλών για το παρόν (1950-2010) και το μέλλον (2011-2100) δείχνει μειωτική τάση στις εντάσεις και τα ύψη βροχόπτωσης για την Αλεξανδρούπολη. Στην περίπτωση της Θεσσαλονίκης οι εντάσεις και τα ύψη βροχής του τωρινού κλίματος (1950-2000) εμφανίζουν μία σαφή αυξητική τάση στο μέλλον (2001-2100).

Για την εξαγωγή ακριβέστερων αποτελεσμάτων, πλησιέστερων στις πραγματικές τιμές των επιπέδων επαναφοράς στην πόλη της Αλεξανδρούπολης και της Θεσσαλονίκης αντίστοιχα, σε επόμενη μελέτη θα πρέπει να συνδυαστεί η εφαρμογή μιας μεθόδου υποβιβασμού χωρικής κλίμακας. Η εφαρμογή μίας τέτοιας μεθόδου δεν αναμένεται να επηρεάσει τη γενικότερη μελλοντική τάση των μεταβλητών της βροχόπτωσης αλλά να δώσει μια πιο ξεκάθαρη και πραγματική εικόνα για το μελλοντικό κλίμα στις περιοχές μελέτης.

Λαμβάνοντας υπόψη την αλλαγή του κλίματος, η πιο σημαντική πρακτική εφαρμογή της παραπάνω προσέγγισης είναι ότι η βελτίωση της ακρίβειας των δεδομένων βροχόπτωσης μειώνει την αβεβαιότητα των υδρολογικών μοντέλων και οδηγεί τελικά στο σχεδιασμό πιο αποτελεσματικών και βιώσιμων συστημάτων απορροής.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Εκφράζονται ευχαριστίες στην Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (EMY) για την παροχή των μετεωρολογικών στοιχείων καθώς και στην κ. Τολίκα, Λέκτορα ΑΠΘ, για την παροχή των δεδομένων του κλιματικού μοντέλου KNMI-RACMO2.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Beuchat, X., B. Schaefli, M. Soutter, and A. Mermoud (2011). *Toward a robust method for subdaily rainfall downscaling from daily data*, Water Resources Research, 47, W09524, doi:10.1029/2010WR010342.
- Desramaut N. (2008). *Estimation of Intensity Duration Frequency Curves for Current and Future Climates*. Master thesis, McGill University, Montreal, Quebec, Canada, p.1-70.
- Grum M., A. T Jørgensen, R.M. Johansen and J. J. Linde (2006). *The effect of climate change on urban drainage: An evaluation based on regional climate model simulations*. Water Science and Technology, 54(6-7), pp. 9-15.
- Koutsoyiannis, D., and N. Mamassis (2001). *Hydrological investigation of intense rainfall and sediment yield in Thriasio, Assessment of sediment generation in Thriasio*, School of Civil Engineering – National Technical University of Athens.
- Mailhot A., S. Duchesne, D. Caya, G. Talbot (2007). *Assessment of future change in intensity-duration-frequency (IDF) curves for Southern Quebec using the Canadian Regional Climate Model (CGCM)*. Journal of Hydrology, 347(1-2), pp. 197-210.
- Nguyen V-T-V., Nguyen, T-D., and Ashkar, F. (2002). *Regional Frequency Analysis of Extreme Rainfalls*, Water Science and Technology, 45(2), 75-81.
- Nguyen V.-T.-V., Desramaut N. and Nguyen T-D., (2010). *Optimal rainfall temporal patterns for urban drainage design in the context of climate change*. Water Science and Technology, 62(5), pp. 1170-1176.
- Olofsson M. (2007). *Climate Change and Urban Drainage. Future precipitation and hydraulic impact*. Licentiate thesis, Department of Civil, Mining and Environmental Engineering, Luleå University of Technology, Sweden, p. 1-23.
- Prodanovic P., Simonovic S. (2007). *Development of rainfall intensity duration frequency curves for the City of London under the changing climate*. Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of Western Ontario, Ontario, Canada, p.5-46.
- Sunyer M.A., Madsen H., Ang P.H. (2001). *A comparison of different regional climate models and statistical downscaling methods for extreme rainfall estimation under climate change*. Atmospheric Research, 103: 119-128.
- Veneziano D., Langousis A. and Lepore C. (2009). *New Asymptotic and Pre-Asymptotic Results on Rainfall Maxima from Multifractal Theory*. Wat. Resour. Res., 45, doi:10.1029/2009WR008257.
- Wilby, R.L., Dawson, C.W., Barrow, E.M., 2002. *SDSM - a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts*. Environmental Modelling and Software, 17:147-159.
- Willems P., Arnbjerg-Nielsen K., Olsson J., Nguyen V.T.V. (2012). *Climate change impact assessment on urban rainfall extremes and urban drainage: Methods and shortcomings*. Atmospheric Research, 103: 106-118.

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΗΣ ΔΙΑΚΙΝΔΥΝΕΥΣΗΣ ΤΩΝ ΥΔΑΤΟΡΡΕΥΜΑΤΩΝ ΤΩΝ Β ΚΑΙ ΒΑ ΚΛΙΤΥΩΝ ΤΗΣ ΟΣΣΑΣ

Σπυρίδων Κωτσόπουλος^{1*}, Ιωάννης Αλεξίου¹, Φιλόθεος Λόκκας¹,
Γεώργιος Γραβάνης¹, Ευάγγελος Μπαλτάς², Στυλιανός Μαγαλιός¹

¹Τμήμα Πολιτικών Έργων Υποδομής, ΤΕΙ Λάρισας, 41110 Λάρισσα

²Εργαστήριο Γενικής και Γεωργικής Υδραυλικής και Βελτιώσεων,
Γεωπονική Σχολή, 54124, Α.Π.Θ.

*Στοιχεία επικοινωνίας: kotsopoulos@teilar.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία γίνεται η καταγραφή και αξιολόγηση ενός αριθμού παραμέτρων, προκειμένου να αναλυθούν και ερμηνευθούν τα έντονα προβλήματα από πλημμύρες που έχουν εμφανιστεί κατά καιρούς στην περιοχή των Β και ΒΑ κλιτύων της Όσσας. Για τη συστηματική αποτύπωση και απόδοση των αναγκαίων δεδομένων χρησιμοποιούνται τα Γεωγραφικά Πληροφοριακά Συστήματα (ΓΠΣ/GIS), μέσω των οποίων ερμηνεύονται και αξιολογούνται πληροφορίες που αναφέρονται σε τοπογραφικά, υδρογραφικά, γεωλογικά, εδαφικά δεδομένα, χρήσεις γης (φυτοκάλυψη) και έργα υποδομής. Με βάση τα δεδομένα αυτά και τη χρήση του υδρολογικού μοντέλου HEC-HMS εκτιμώνται οι πλημμυρικές παροχές είκοσι κύριων υδατορρευμάτων της περιοχής και χαρτογραφείται η διακινδύνευσή τους για διάφορες περιόδους επαναφοράς.

ΛΕΞΕΙΣ-ΚΛΕΙΔΙΑ: Πλημμυρική παροχή, πλημμυρική διακινδύνευση, Γεωγραφικά Πληροφοριακά Συστήματα, υδρολογικές παράμετροι, υδρολογικό μοντέλο HEC-HMS.

ESTIMATION OF FLOOD RISK FOR THE STREAMS OF THE N AND NE SLOPES OF MOUNT OSSA

Spyridon Kotsopoulos¹, Ioannis Alexiou¹, Filotheos Lokkas¹,
Georgios Gravanis¹, Evaggelos Baltas², Stylianos Magalios¹

¹Dept. Civil Engineering Infrastructures, TEI Larissa, 41110 Larissa, Greece

²Laboratory of General and Agricultural Hydraulics and Land Reclamation,
School of Agriculture, 54124, A.U.Th.

*Corresponding author: kotsopoulos@teilar.gr

ABSTRACT

In the present study numerous parameters are recorded and validated in order to analyze and interpret the severe problems that have arisen, due to floods, in the area of N and NE slopes of Mount Ossa, Thessaly. For the systematic survey and mapping of the essential data sets, the Geographic Information Systems (GIS) are utilised, through which the information about topographic, hydrologic, geologic and soil data, land cover and infrastructure works is interpreted and validated. Based on these data sets, the HEC-HMS hydrologic model is utilised to compute the flood discharges of the twenty main streams crossing the area. Additionally, the flood risk for these streams is also assessed for different return periods.

KEYWORDS: Flood discharge, flood risk, Geographic Information Systems, hydrologic parameters, hydrologic model HEC-HMS.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η εκτίμηση της πλημμυρικής παροχής των υδατορρευμάτων που διαρρέουν τις Β και ΒΑ κλιτύες του όρους Όσσα. Για την καταγραφή και διαχείριση των αναγκαίων για τη μελέτη της περιοχής στοιχείων έχουν χρησιμοποιηθεί τα Γεωγραφικά Πληροφοριακά Συστήματα (ΓΠΣ) GIS-ArcView. Η χρήση ΓΠΣ (Burrough, 1986) είναι ενδεδειγμένη για την παράσταση χωρικών μεταβλητών και για το λόγο αυτό έχουν χρησιμοποιηθεί σε πλήθος εφαρμογών, όπως διαχείρισης εδαφοϋδατικών πόρων (Kalfountzos et al., 1998, Kalfountzos et al., 2002) κτλ. Όσον αφορά στην εκτίμηση των πλημμυρικών παροχών, υπάρχουν χωρικές παράμετροι που κατόπιν επεξεργασίας μας παρέχουν τα δεδομένα εισόδου για προσομοίωση πλημμυρών (Παπαμιχαήλ et al., 1995) μέσω υδρολογικών μοντέλων (HEC, 1980, HEC, 2002), όπως εδαφολογικά στοιχεία, στοιχεία φυτοκάλυψης, χρήσεων γης, αναγλύφου, χαρακτηριστικών υδρογραφικού δικτύου κ.τ.λ. Από την επεξεργασία των παραπάνω στοιχείων μπορούν να προκύψουν άμεσα υδρολογικές παράμετροι (Μαγαλιός κ.α., 2006, Lokkas et al., 2007), όπως η έκταση των υδρολογικών λεκανών, οι κλίσεις των λεκανών και των κυρίων υδατορρευμάτων που τις διαρρέουν, οι απορροϊκοί συντελεστές κτλ.

Τέλος, τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας είναι σε συμφωνία με την οδηγία 2007/60/ΕΚ για την αξιολόγηση και διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1 ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος «Αρχιμήδης» (ΕΠΕΑΕΚ II): «Χωροθέτηση και εκτίμηση της υδρολογικής διακινδύνευσης με έμφαση στην ξηρασία και τις πλημμύρες σε αστικές και μη αστικές περιοχές της Θεσσαλίας και αξιολόγηση των περιβαλλοντικών τους επιπτώσεων» που έχει υλοποιηθεί από το Τμήμα Πολιτικών Έργων Υποδομής του ΤΕΙ Λάρισας, έχει επιλεγεί ως περιοχή μελέτης αυτή των Β και ΒΑ κλιτύων της Όσσας που καλύπτει τα υδατορρέυματα των περιοχών Ομολίου, Στομίου και Καρίτσας του πρώην Δήμου Ευρυμενών Λάρισας (Εικόνα 1). Στην περιοχή αυτή παρατηρούνται συνήθως μεγάλα βροχομετρικά ύψη, κατά πολύ μεγαλύτερα αυτών που σημειώνονται στο πεδινό τμήμα του νομού Λάρισας. Αποτέλεσμα των έντονων βροχοπτώσεων, παρά τη σημαντική κάλυψη της περιοχής από φυσική κυρίως βλάστηση, είναι η συχνή εμφάνιση αρκετά έντονων προβλημάτων λόγω πλημμυρών. Οι πλημμύρες αυτές κατά κύριο λόγο οφείλονται στην ιδιαιτερότητα των βροχομετρικών συμβάντων σε συνδυασμό με τις τοπικές συνθήκες (υδρογεωλογικές, χρήσεων γης κ.τ.λ.) και τα υπάρχοντα έργα υποδομής και έχουν επιπτώσεις στην ευρύτερη περιοχή του δέλτα του Πηνειού ποταμού.

2.2 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Για τη μελέτη, εκτίμηση, ανάλυση και αξιολόγηση των πλημμυρικών συμβάντων της περιοχής μελέτης είναι αναγκαία η συλλογή και χρήση πληθώρας δεδομένων υδρολογικών και εδαφολογικών, γεωλογικών, χρήσεων γης, φυτοκάλυψης, αναγλύφου εδάφους καθώς και των υπαρχουσών υποδομών (οδικό δίκτυο, διατομές φυσικών υδατορρευμάτων, τεχνικών έργων και κρίσιμες διατομές που επηρεάζουν τη ροή των υδάτων). Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν (Μαγαλιός κ.α., 2006, Lokkas et al., 2007): χάρτες της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού (ΓΥΣ), γεωλογικοί χάρτες, εδαφολογικοί χάρτες, δασοπονικός χάρτης και χάρτης εδαφοκάλυψης Όσσας (Εικόνα 2) ενώ έγινε και συλλογή στοιχείων και μετρήσεων πεδίου όπως εδαφικών δειγμάτων, στοιχείων τεχνικών έργων και τοπογραφικών στοιχείων (αποτύπωση κλίσεων και διατομών βασικών υδατορρευμάτων) της περιοχής.

Όλες οι παραπάνω χαρτογραφικές πληροφορίες, πρωτογενείς και δευτερογενείς, που αφορούν στην περιοχή μελέτης (Εικόνα 1, οι λεκάνες απορροής εμφανίζονται με έντονο περίγραμμα), ψηφιοποιήθηκαν και μετατράπηκαν σε αρχείο ΣΓΠ/GIS στο πρόγραμμα GIS-ArcView, όπου δημιουργήθηκαν οι χωρικές αλληλοσυσχετίσεις μεταξύ των γεωγραφικών στοιχείων (δηλαδή οι τοπολογικές σχέσεις τους) και οι συνδεδεμένες προς αυτά βάσεις δεδομένων.

Η εκτίμηση της πλημμυρικής παροχής των υδατορρευμάτων της περιοχής μελέτης για καθορισμένη περίοδο επαναφοράς είναι αναγκαίος ο προσδιορισμός των αντίστοιχων μέγιστων βροχοπτώσεων συγκεκριμένης διάρκειας. Για το σκοπό αυτό αξιοποιούνται τα βροχομετρικά ύψη μικρής διάρκειας από το σταθμό της Λάρισας που ήταν και τα μόνα διαθέσιμα στην ευρύτερη περιοχή. Τα ύψη αυτά τροποποιήθηκαν για να περιγράψουν τη διαφοροποίηση που υπάρχει μεταξύ Λάρισας (Μετ. Σταθμός ΕΜΥ Λάρισας) και της περιοχής μελέτης (Μετ. Σταθμός Καρίτσας). Για την ανάλυση των μέγιστων τιμών βροχοπτώσεων μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια ασυμπτωτική κατανομή ακραίων τιμών (Haan, 1977, Mays, 1996, Wanielista et al., 1997, Κωτσόπουλος, 2006, Μιμίκου, 1994, Τσακίρης, 1995). Από την ανάλυση των βροχομετρικών στοιχείων (μικρής διάρκειας από το σταθμό της Λάρισας και μηνιαίων από το σταθμό Καρίτσας) προέκυψε τελικά για την περιοχή μελέτης, η εξίσωση (2.1) που υπολογίζει το μέγιστο ύψος βροχής, P_T (mm), για συγκεκριμένη διάρκεια βροχόπτωσης, t (min), και περίοδο επαναφοράς T (έτη):

$$P_T = 15.73 \cdot t^{0.324} \cdot T^{0.209} \quad (2.1)$$

Ο χρόνος συρροής ή συγκέντρωσης, t_c , σύμφωνα με την εμπειρική σχέση του Kirpich υπολογίζεται ως (Chow et al., 1988, Wanielista et al., 1997, Τσακίρης, 1995):

$$t_c = 3.98 \cdot \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.77} \quad (2.2)$$

όπου t_c ο χρόνος συγκέντρωσης σε min, L το μήκος διαδρομής σε km και S η μέση κατά μήκος κλίση της λεκάνης σε m/m.

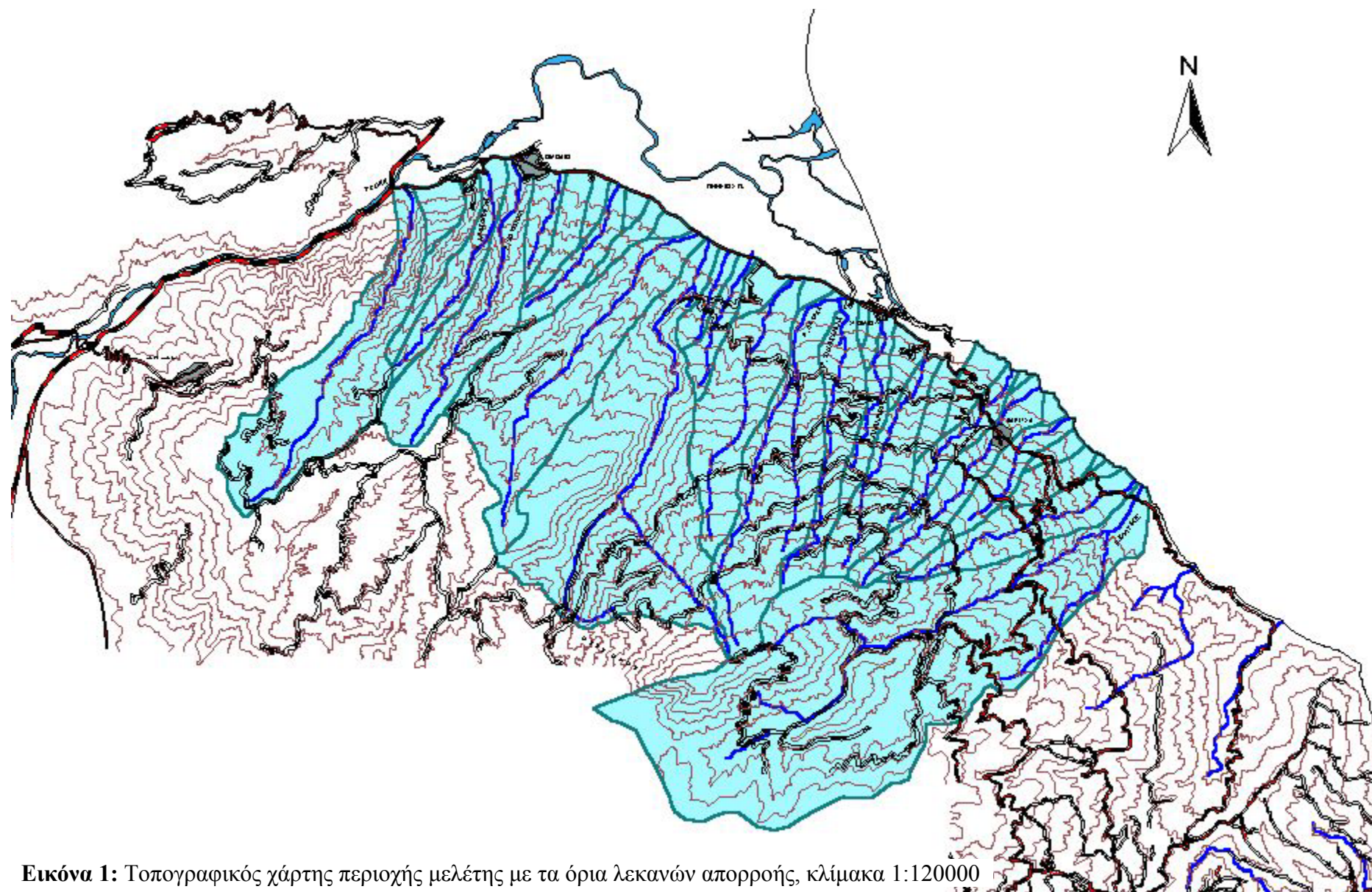
Αναφορικά με τη μέση κλίση των λεκανών, αυτή υπολογίστηκε από την εξίσωση των Gregory & Walling, όπως αναφέρεται από τον Τσακίρη (Τσακίρης, 1995):

$$S_g = \frac{\sum L \cdot D}{E} \quad (2.3)$$

όπου S_g η μέση κλίση της λεκάνης, $\sum L$ το συνολικό μήκος των ισοϋψών καμπυλών, D η ισοδιάσταση των ισοϋψών καμπυλών και E το εμβαδό της λεκάνης απορροής.

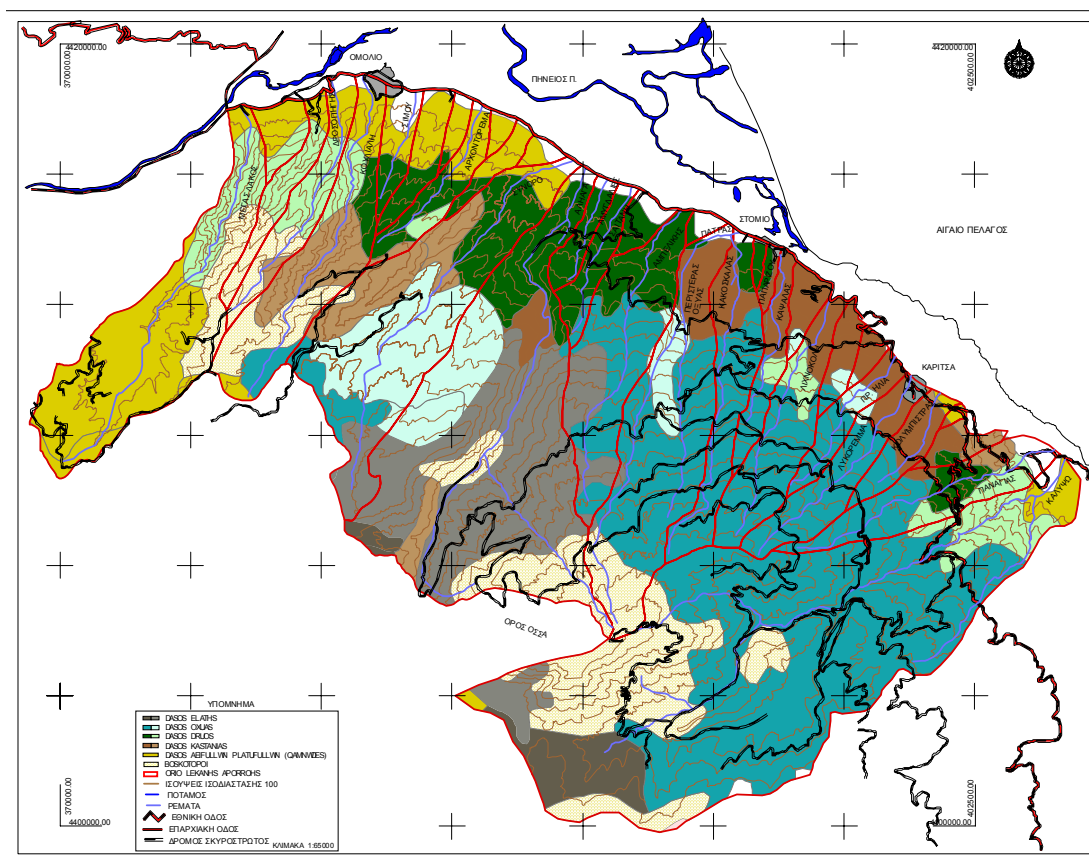
Για την εκτίμηση της απορροής με τη μέθοδο της Soil Conservation Service (SCS) απαιτείται η εκτίμηση του απορροϊκού συντελεστή CN της SCS (SCS, 1972, Wanielista et al., 1997, Κωτσόπουλος, 2006, Τσακίρης, 1995). Ο συντελεστής αυτός δίνεται σε πίνακες ανάλογα με τη χρήση γης, τη διαχείριση ή πρακτική, τις υδρολογικές συνθήκες και τον τύπο του εδάφους (SCS, 1972, Wanielista et al., 1997, Κωτσόπουλος, 2006, Τσακίρης, 1995). Σε περίπτωση που υπάρχουν περισσότερες από μια χρήση γης στην υδρολογική λεκάνη, τότε θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η σταθμισμένη τιμή του απορροϊκού συντελεστή CN_c :

$$CN_c = \frac{\sum CN_i \cdot E_i}{\sum E_i} = \sum_{i=1}^n CN_i \cdot \varepsilon_i \quad (2.4)$$



Εικόνα 1: Τοπογραφικός χάρτης περιοχής μελέτης με τα όρια λεκανών απορροής, κλίμακα 1:120000

όπου CN_i συντελεστής απορροής, E_i η επιφάνεια (εμβαδό) και e_i η σχετική επιφάνεια (κλάσμα) κάθε περιοχής i .



Εικόνα 2. Χάρτης λεκανών απορροής με εδαφοκάλυψη

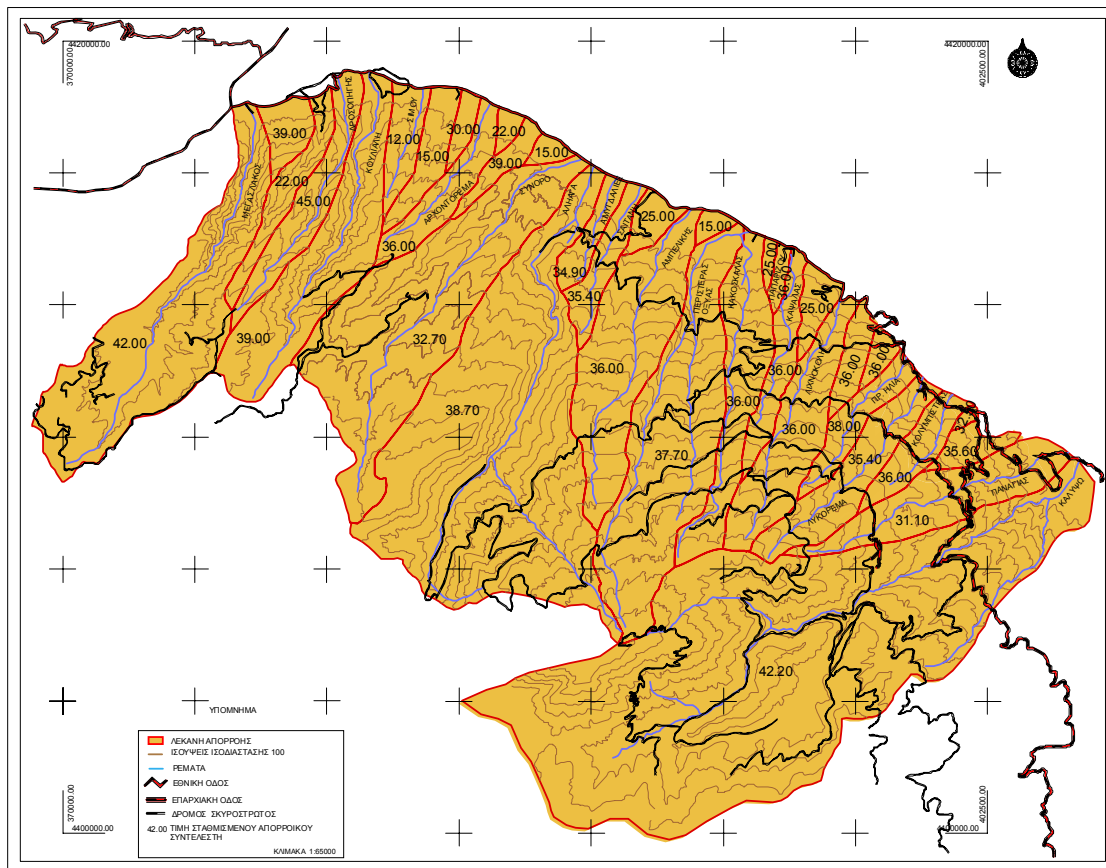
Η σταθμισμένη τιμή του απορροϊκού συντελεστή, CN_c , για κάθε υδρολογική λεκάνη υπολογίστηκε μέσω των ΓΠΣ GIS-ArcView, μετά από τοπολογική επεξεργασία και αφού λήφθηκαν υπόψη οι επί μέρους απορροϊκοί συντελεστές για κάθε κατηγορία εδαφοκάλυψης στο εσωτερικό κάθε λεκάνης. Τα αποτελέσματα της επεξεργασίας παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Για την εκτίμηση των πλημμυρικών παροχών 20 βασικών υδατορρευμάτων (Εικόνα 1, Πίνακας 1) της περιοχής μελέτης χρησιμοποιείται το υδρολογικό μοντέλο HEC-HMS (HEC, 2002) με το οποίο γίνεται η προσομοίωση της απορροής των υδατορρευμάτων αυτών. Για την προσομοίωση χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εισόδου τα χαρακτηριστικά των υδρολογικών λεκανών και των υδατορρευμάτων που τις διαρρέουν καθώς και αυτά των βροχοπτώσεων.

Στην προσομοίωση χρησιμοποιείται η μέθοδος του απορροϊκού συντελεστή CN (Curve Number) και το συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα της SCS (HEC, 1980, 2002).

Βροχομετρικά δεδομένα εισόδου χρησιμοποιούνται αυτά που προέκυψαν από την ανάλυση των βροχομετρικών στοιχείων με τη χρήση της εξ. (2.1) για διάφορες περιόδους επαναφοράς.



Εικόνα 3. Χάρτης σταθμισμένων απορροϊκών συντελεστών CN_c λεκανών απορροής

Για την προσομοίωση των απορροών των υδρολογικών λεκανών χρησιμοποιούνται δεδομένα που αναφέρονται στην έκταση της λεκάνης, στο χρόνο καθυστέρησης, τον σταθμισμένο απορροϊκό συντελεστή κάθε λεκάνης, CN_c (Εικόνα 3), καθώς και παραμέτρους που σχετίζονται με τη γεωμετρία των υδατορρευμάτων που τις διαρρέουν. Τα στοιχεία αυτά προέκυψαν από την τοπολογική επεξεργασία τοπογραφικών, εδαφολογικών, γεωλογικών και στοιχείων φυτοκάλυψης και τη χρήση εξισώσεων (Μαγαλιός, κ.α. 2006, Lokkas et al., 2007) για τις 20 συνολικά βασικές υδρολογικές λεκάνες – υδατορρέυματα της περιοχής μελέτης, όπως εμφανίζονται στη δεύτερη στήλη του Πίνακα 1.

Από την προσομοίωση των υδρολογικών συστημάτων των 20 υδρολογικών λεκανών της περιοχής υπολογίζονται για διάφορες περιόδους επαναφοράς οι πλημμυρικές παροχές των υδατορρευμάτων των λεκανών αυτών και συγκρίνονται με τις αντίστοιχες μέγιστες επιτρεπόμενες, Q_{max} , σε κρίσιμες διατομές υδατορρευμάτων με βάση την εξίσωση Manning.

Στον Πίνακα 1 εμφανίζονται τα αποτελέσματα για περιόδους επαναφοράς 5 και 50 έτη και συγκρίνονται με τις υπολογισμένες μέγιστες επιτρεπόμενες παροχές, Q_{max} .

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων παρουσιάζονται διαγραμματικά στις Εικόνες 4 και 5 και αναφέρονται σε περιόδους επαναφοράς 5 και 50 χρόνια. Στους χάρτες των εικόνων αυτών χωροθετείται η διακινδύνευση των λεκανών απορροής των σημαντικών ρεμάτων της περιοχής. Τα επίπεδα διακινδύνευσης σχετίζονται με τη μέγιστη πλημμυρική παροχή που διέρχεται από κρίσιμες διατομές υδατορρευμάτων ή υπάρχοντα τεχνικά έργα (γέφυρες, οχετοί). Οι κατηγορίες διακινδύνευσης που χαρτογραφούνται στην παρούσα έρευνα είναι 6 [0-25% (κίτρινο), 25-50% (πράσινο), 50-70% (μπλέ), 70-90% (πορτοκαλί), 90-100% (ανοιχτό κόκκινο) και +100% (σκούρο κόκκινο)].

Στις περιοχές με σκούρο κόκκινο τα υπάρχοντα έργα κρίνονται ανεπαρκή για ασφαλή παροχέτευση των πλημμυρικών παροχών και απαιτούνται επιπρόσθετα για το σκοπό αυτό. Τα

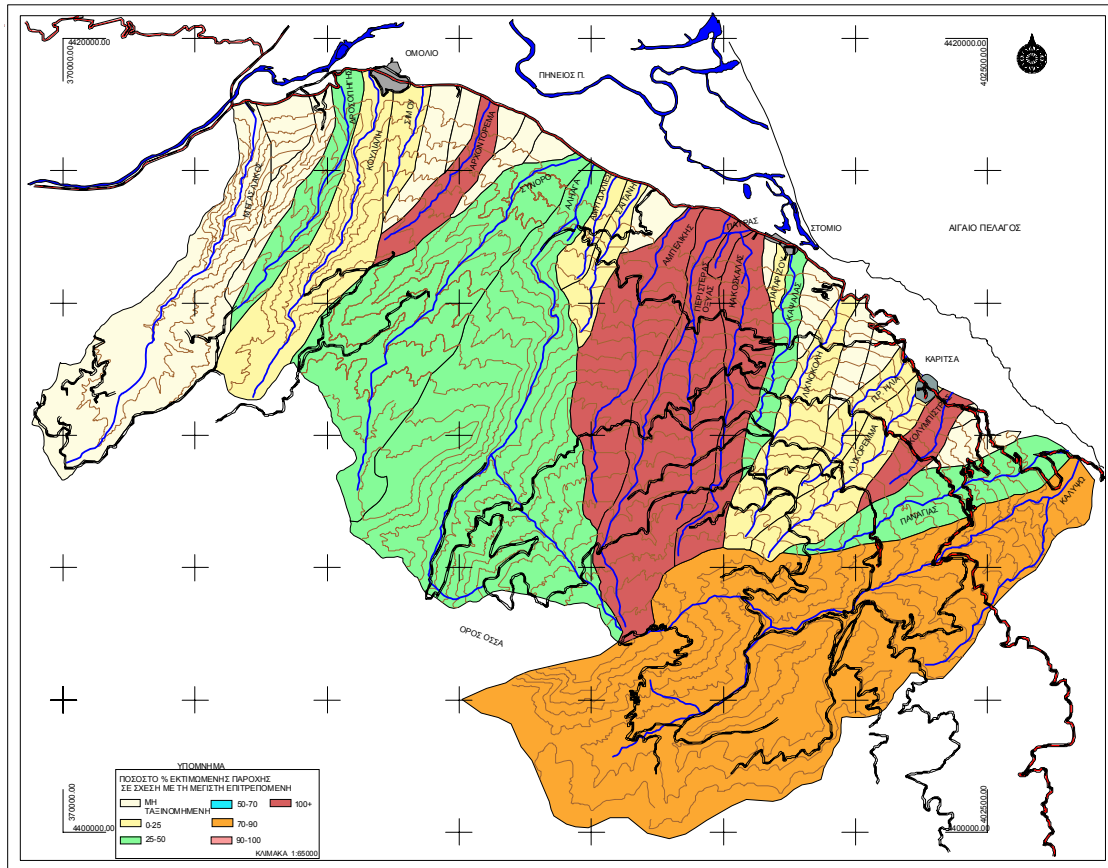
έργα αυτά μπορεί να σχετίζονται με τα υπάρχοντα τεχνικά (γέφυρες, οχετοί), παρεμβάσεις ανάντη στις λεκάνες απορροής (φυτοκάλυψη, διευθέτηση ρεμάτων) ή και στα δύο.

Με βάση την ανάλυση, ακόμα και για μικρές περιόδους επαναφοράς (5 έτη) υπάρχουν περιοχές πολύ αυξημένου κινδύνου (+100%). Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι λεκάνες Αρχοντορέματος, Αμπελικής, Περιστεράς-Οξιάς, Κακοσκάλας και Κολυμπίστρας. Οι περιοχές πολύ αυξημένου κινδύνου επεκτείνονται και σε άλλες λεκάνες καθώς η περίοδος επαναφοράς αυξάνει και σχεδόν το σύνολο της περιοχής γίνεται κόκκινο για περίοδο επαναφοράς 50 έτη (Εικόνα 5).

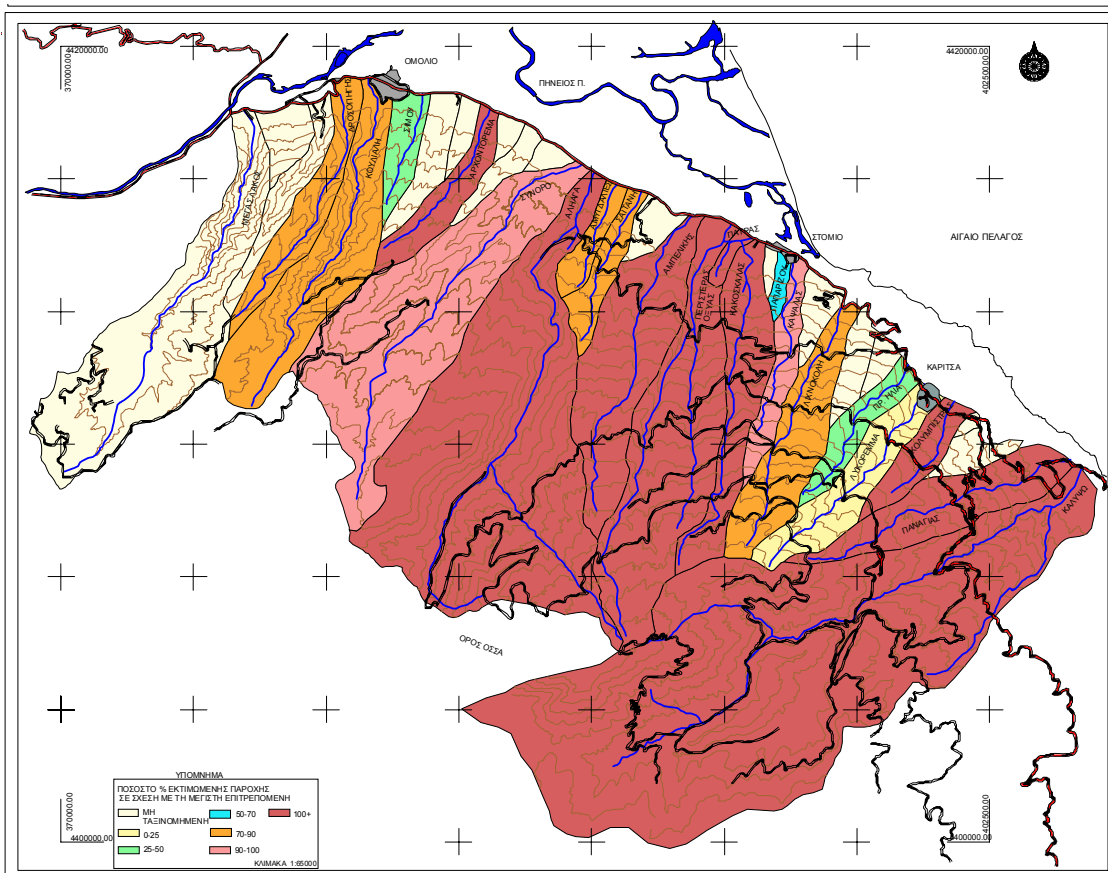
Πίνακας 1. Υπολογισμός παροχών υδατορρευμάτων για περιόδους επαναφοράς 5 και 50 έτη και συσχέτισή τους με τη μέγιστη επιτρεπόμενη, Q_{max} .

	Υδατόρρευμα	Q_{max} (m^3/s)	Παροχές ρεμάτων για περιόδους επαναφοράς		Q_5/Q_{max}	Q_{50}/Q_{max}
			5 έτη	50 έτη	5 έτη	50 έτη
			(m ³ /s)		(%)	
1	Δροσοπηγής	63,7	17,0	55,4	26,7	87,0
2	Κουλιαλή	125,0	29,5	96,5	23,6	77,2
3	Σίμου	15,4	2,0	7,4	13,1	48,3
4	Αρχοντόρεμα	5,4	9,9	33,4	182,5	617,9
5	Σύνορο	142,9	41,9	141,9	29,3	99,3
6	Αλήαγα	204,0	86,9	287,3	42,6	140,8
7	Αμυγδαλιές	23,6	5,2	17,8	22,1	75,3
8	Σαϊτάνη	32,6	7,1	24,2	21,8	74,2
9	Αμπελικής	5,4	26,3	87,5	489,6	1626,8
10	Περιστεράς-Οξιάς	20,9	40,2	133,4	192,3	637,9
11	Κακοσκάλας	10,19	16,7	55,7	163,9	546,2
12	Πάτρας	270,0	56,4	187,4	20,9	69,4
13	Παπαρίζου	9,7	1,9	6,4	19,4	66,1
14	Καυάλας	31,3	8,4	28,4	26,9	90,9
15	Λιχνοκόλη	71,1	16,4	54,2	23,1	76,3
16	Προφ. Ηλία	115,7	10,2	34,1	8,8	29,5
17	Χοχλίθρας-Λυκόρεμα	261,5	16,0	53,3	6,1	20,4
18	Κολυμπίστρας	5,5	10,6	35,8	194,5	657,3
19	Παναγίας	37,4	14,2	48,2	38,1	129,0
20	Καλυψώς	211,7	157,7	513,5	74,5	242,6

Οι χάρτες των Εικόνων 4 και 5 σε συνδυασμό με τον Πίνακα 1 μπορούν να χρησιμοποιηθούν ώστε να γίνει και ιεράρχηση – προγραμματισμός έργων. Με βάση τους παραπάνω υπολογισμούς - μέγεθος της πλημμυρικής παροχής - το πρώτο ρέμα στο οποίο απαιτείται παρέμβαση είναι αυτό της Αμπελικής. Άμεσες παρεμβάσεις επίσης απαιτούνται και στα ρέματα: Αρχοντόρεμα, Περιστεράς-Οξιάς, Κακοσκάλας και Κολυμπίστρας ενώ θα πρέπει να εξεταστεί με προσοχή η επάρκεια των έργων στο �έμα Καλυψώς λόγω του μεγέθους της υδρολογικής λεκάνης την οποία αποστραγγίζει και του γεγονότος ότι βρίσκεται στα όρια του Οικισμού Κόκκινο Νερό.



Εικόνα 4. Χάρτης πλημμυρικής διακινδύνευσης για περίοδο επαναφοράς 5 έτη



Εικόνα 5. Χάρτης πλημμυρικής διακινδύνευσης για περίοδο επαναφοράς 50 έτη

Η καταγραφή των τεχνικών έργων στην περιοχή έδωσε την γενική εικόνα μιας σχετικής ανεπάρκειας παραλαβής των πλημμυρικών παροχών, κυρίως σε ρέματα υψηλών τιμών μέσης κλίσης, που σε συνδυασμό με την μεταφορά φερτών υλών έχει σαν αποτέλεσμα την υπερχειλίση και πρόκληση ζημιών στο αγροτικό αλλά και αστικό περιβάλλον της περιοχής. Τα φαινόμενα αυτά επιτείνονται στις περιπτώσεις που, στο αστικό κυρίως περιβάλλον της περιοχής, έχουν καταγραφεί περιπτώσεις επιχωμάτωσης και μη ορθολογικής διευθέτησης ρεμάτων, ή αντικατάσταση τους με σωληνωτούς αγωγούς ανεπαρκούς διατομής.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών αποδείχθηκαν ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για υδρολογική εφαρμογή στην περιοχή μελέτης των Β και ΒΑ κλιτύων της Όσσας, για την καταγραφή πλήθους χαρτογραφικών δεδομένων (αναγλύφου, υδρογραφικού δικτύου, φυτοκάλυψης-χρήσεων γης, γεωλογικών, εδαφολογικών), για την επεξεργασία και εκτίμηση υδρολογικών παραμέτρων, όπως το εμβαδό και οι κλίσεις των υδρολογικών λεκανών, οι κλίσεις, τα μήκη και οι διατομές των υδατορρευμάτων και ο απορροϊκός συντελεστής *CN* της SCS.

Από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων προκύπτει ότι αναμένεται να υπάρχουν σημαντικά και συχνά προβλήματα λόγω υπερχειλίσης αρκετών υδατορρευμάτων της περιοχής.

Ιδιαίτερα προβλήματα αναμένονται στα ρέματα: Αμπελικής, Αρχοντόρεμα, Περιστεράς-Οξιάς, Κακοσκάλας και Κολουμπίστρας ενώ θα πρέπει να εξεταστεί με προσοχή η επάρκεια των έργων στο ρέμα Καλυπούς λόγω του μεγέθους της υδρολογικής λεκάνης την οποία αποστραγγίζει και του γεγονότος ότι βρίσκεται στα όρια του οικισμού Κόκκινο Νερό.

Η χωρική απεικόνιση των αποτελεσμάτων μπορεί να αξιοποιηθεί για ιεράρχηση επεμβάσεων στην περιοχή και τον προγραμματισμό έργων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Burrough, P. A. 1986. *Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment*, Clarendon Press, Oxford.
- Chow V. T., Maidment D. R. and Mays L. W., 1988. *Applied Hydrology*. McGraw-Hill International Book Company, N.Y., U.S.A.
- Haan C. T. 1977. *Statistical Methods in Hydrology*, Iowa State University Press, Ames, Iowa.
- Hydrologic Engineering Center 1980. *HEC-1, Flood Hydrograph Package*, US Army Corps of Engineers, Davis, CA, USA.
- Hydrologic Engineering Center 2002. *Hydrologic Modeling System HEC-HMS, Applications Guide*, US Army Corps of Engineers, Davis, CA, USA.
- Kalfountzos, D., Alexiou, I., Magalios, S. and Vyrlas, P. 1998. *Integrated water resources management using GIS: A case study in TOEB Pinios*, Proc. Int. Conf. Protection and Restoration of the Environment IV, Halkidiki, Macedonia, Greece, pp. 83-90.
- Kalfountzos, D., Vyrlas, P., Kotsopoulos, S., Alexiou, I. and Panagopoulos, A. 2002. *Irrigation management using GIS in Aisonia District*, Proc. Intl. Conf. Protection and Restoration of the Environment VI, Skiathos, Greece, Vol. III, pp. 1689-1696.
- Kite G. W., 1977. *Frequency and Risk Analyses in Hydrology*. Water Resources Publications, Colorado, USA.
- Lokkas, P., Kotsopoulos, S., Alexiou, I., Gravanis, G., Vassiloglou, V., Magalios, S., and Kassos, V. 2007. *The influence of hydrological parameters on the stream floods of a mountainous area in Thessaly, Greece*. Proc. of the 9th WSEAS Int. Conf. on Mathematical

- and Computational Methods in Science and Engineering. Trinidad and Tobago, November 5-7, 200, 167-171.
- Mays, L., 1996. *Water Resources Handbook*. McGraw-Hill International Book Company, N.Y., USA.
- Soil Conservation Service 1972. *National Engineering Handbook*, Washington DC, Section 4, Hydrology.
- Wanielista, M., Kerten R. and Eaglin, R. 1997. *Hydrology: Water Quantity and Quality Control*, J. Wiley & Sons, NY.
- Κωτσόπουλος Σ. 2006. *Υδρολογία*, Εκδόσεις Ίων, Αθήνα.
- Μαγαλιός, Σ., Κωτσόπουλος, Σ., Αλεξίου Ι., Γραβάνης Γ., Λόκκας, Φ. και Μπασδάνης, Β. 2006. *Χωρική μεταβολή υδρολογικών παραμέτρων προς εκτίμηση πλημμυρικών παροχών ρεμάτων της Όσσας*, Πρακτικά του 10^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου της ΕΥΕ, Ξάνθη, 13-16 Δεκεμβρίου 2006, σελ. 103-110.
- Μιμίκου, Μ. Α., 1994. *Τεχνολογία Υδατικών Πόρων*. Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα.
- Παπαμιχαήλ, Δ., Μπαμπατζιμόπουλος, Χ., Κωτσόπουλος, Σ., Γεωργίου, Π. και Τερζίδης, Γ. 1995. *Διερεύνηση των σχέσεων βροχής - απορροής της λεκάνης της Αλμωπίας με τη βοήθεια του HEC1*, 2^ο Εθνικό Συνέδριο ΕΕΔΥΠ, Ολοκληρωμένες Επεμβάσεις για τη Μείωση του Κινδύνου από τις Πλημμύρες, Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- Τσακίρης Γ. 1995. *Υδατικοί Πόροι, Ι. Τεχνική Υδρολογία*, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα.

ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ ΚΑΙ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΥΔΡΟΔΟΤΗΣΗ

Μαργαρίτης Βαφειάδης*, Θωμάς Σπάχος, Κωνσταντίνος Κατσιφάρκης

Τομέας Υδραυλικής και Τεχνικής Περιβάλλοντος

Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, 54124, Α.Π.Θ.

*Επικοινωνία: Μαργαρίτης Βαφειάδης, vmarios@civil.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Παρουσιάζεται η σημερινή κατάσταση της έρευνας και της επιστημονικής γνώσεως σχετικά με την ενδεχόμενη κλιματική αλλαγή και την επίφοβη λειψυδρία, με βάση τις εργασίες που έγιναν στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού Προγράμματος CC-WaterS (Κλιματική Αλλαγή και Επιπτώσεις στην Υδροδότηση, 1/5/2009-30/4-2012). Το ενδιαφέρον της εργασίας έγκειται 1^{ον}) στο ότι παρουσιάζονται οι πραγματικές δυνατότητες για εκτίμηση της εξέλιξης του κλίματος και των υδατικών πόρων και 2^{ον}) οι έμμεσες αλλά και ανεξάρτητες του κλίματος αλλαγές σε όλους τους παράγοντες που αφορούν την ζήτηση και παροχή πόσιμου νερού και όχι μόνο καθαρά τα κλιματολογικά και υδρολογικά προβλήματα.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Κλιματική αλλαγή, υδροδότηση, λειψυδρία, CC-WaterS

CLIMATIC CHANGE AND IMPACT IN WATER SUPPLY

Margaritis Vafeiadis*, Thomas Spachos, Konstantinos Katsifarakis

Division of Hydraulics and Environmental Engineering

Department of Civil Engineering, 54124, A.U.Th.

*Correspondence: Margaritis Vafeiadis, vmarios@civil.auth.gr

ABSTRACT

In this paper is presented the current situation of research and scientific knowledge with regard to the potential climatic change and the probable water shortage, based on the activities of European Program CC - WaterS (Climatic Change and Impacts in Water Supply, 1/5/2009-30/4-2012). The interest of this work consist in that 1) the real possibilities to estimate the evolution of climate change and water resources and 2) the indirect, but also independent of the climate change factors that influence the demand and supply of potable water and their combination to the direct climatic and hydrologic problems, are presented.

KEY WORDS: Climate change, water supply, water shortage, CC-WaterS

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το πρόγραμμα CC-WaterS ("Κλιματική Αλλαγή και οι επιπτώσεις στην υδροδότηση") ήταν ένα μεγάλο Ευρωπαϊκό πρόγραμμα τριετούς διάρκειας που ολοκληρώθηκε τον Απρίλιο του 2012. Στο πρόγραμμα αυτό συμμετείχαν 18 εταίροι από 9 χώρες (Αυστρία, Ιταλία, Σλοβενία, Ουγγαρία, Ρουμανία, Βουλγαρία, Ελλάδα, Κροατία και Σερβία) από τη νοτιοανατολική Ευρώπη (Σχ.1). Επικεφαλής Εταίρος ήταν ο Δήμος της Βιέννης (Υπηρεσία M31 Έργα Νερού, Αυστρία). Οι λοιποί εταίροι είναι από διάφορους τομείς, όπως κυβερνητικοί οργανισμοί, πάροχοι ύδατος και ερευνητικά ιδρύματα. Οι φορείς αυτοί συνεργάστηκαν στενά ώστε η νέα γνώση και τα συμπεράσματα που προέκυψαν να μπορούν να εφαρμοστούν στην πράξη στην υδροδότηση. Ο κύριος στόχος ήταν η εξασφάλιση της διαθεσιμότητας μιας βιώσιμης παροχής νερού για τους πολίτες στις διαφορετικές περιοχές για αρκετές δεκαετίες, κάτω από την επιρροή των αλλαγών χρήσης του εδάφους σαν αποτέλεσμα κλιματικής αλλαγής. Από την Ελλάδα συμμετείχαν το Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (AUT), η Εταιρία Ύδρευσης Αποχέτευσης Θεσσαλονίκης ΑΕ (ΕΥΑΤΗ) και η Αναπτυξιακή Δημοτική Επιχείρηση Πάτρας (ΑΔΕΠ).



Σχήμα 1. Χώρες, φορείς και πειραματικές περιοχές (αρκτικόλεξα)

Οι δραστηριότητες του προγράμματος υποστηρίχθηκαν και εποπτεύθηκαν από την οργανωτική επιτροπή και την επιστημονική συμβουλευτική επιτροπή (ένας αντιπρόσωπος από κάθε χώρα).

Το πρόγραμμα περιελάμβανε επτά ενότητες. Οι δύο πρώτες αφορούσαν την διαχείριση και τον συντονισμό σε εθνικό και διεθνές επίπεδο, καθώς και την επικοινωνία και διάχυση των αποτελεσμάτων των διαφόρων δράσεων. Οι άλλες 5 ενότητες είναι καθαρά τεχνικές και άμεσα διασυνδεδεμένες. Συνολικά επιλέχθηκαν 25 πειραματικές περιοχές με διαφορετικό κλίμα, μορφολογικές, υδρολογικές και γεωλογικές συνθήκες για την εφαρμογή της καθορισμένης μεθοδολογίας. Στην Ελλάδα μελετήθηκαν δύο περιοχές: Οι πηγές Αραβησσού (AUT-ΕΥΑΤΗ) που παρέχουν σήμερα στην Θεσσαλονίκη το 40% της απαιτούμενης ποσότητας νερού για ύδρευση και η λεκάνη του Γλαύκου στην Πάτρα (ΑΔΕΠ). Οι εκτιμώμενες κλιματικές αλλαγές και συνεπώς η διαθεσιμότητα ύδατος, καθώς και ο σχεδιασμός για μελλοντικές χρήσεις γης ήταν η βάση πάνω στην οποία αναζητήθηκαν επαρκείς απαντήσεις και διοικητικά μέτρα για να μειωθούν οι αρνητικές επιδράσεις στην παροχή νερού.

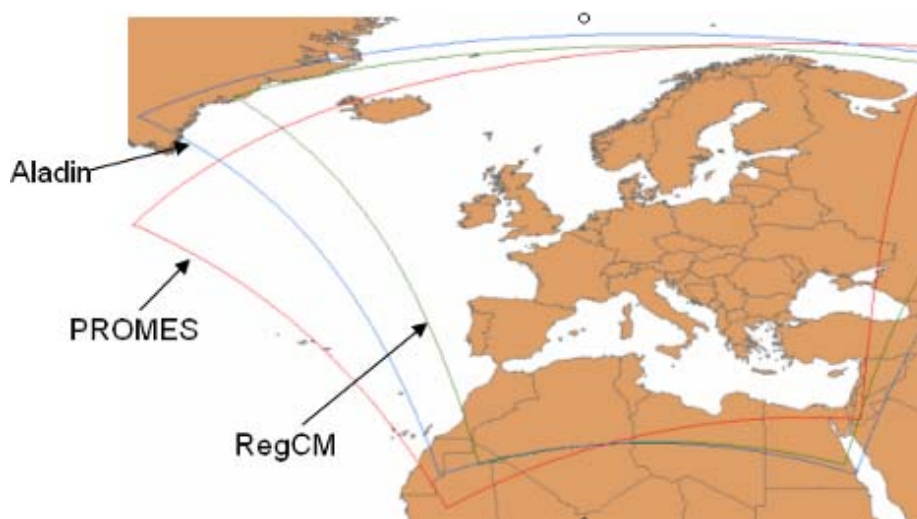
Οι περισσότερες δραστηριότητες δεν ήταν απλά μία σειρά από εθνικές δραστηριότητες, αλλά είχαν αυθεντικό διακρατικό χαρακτήρα, δεδομένου ότι πολλές μεθοδολογίες

αναπτύχθηκαν από κοινού. Το CC-WaterS εφάρμοσε την πληροφορία παρέχοντας σταθερές λύσεις, ανέπτυξε εργαλεία και όργανα για την υποστήριξη της δημόσιας παροχής νερού και πρότεινε την εφαρμογή μέτρων προστασίας.

Η στρατηγική της διάχυσης της γνώσης διασφαλίζει, την μεταφορά των διαχρονικών αποτελεσμάτων του CC-WaterS στους αντίστοιχους χρήστες.

2. ΕΝΟΤΗΤΑ 3 «ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ»

Η πρώτη επιστημονική δράση του έργου αφορούσε, όπως είναι φυσικό, την εκτίμηση της μορφής και της εκτάσεως της ενδεχόμενης μελλοντικής αλλαγής. Για τον σκοπό αυτό μετά από αρχικές δοκιμές επιλέχθηκε μια κοινή μεθοδολογία για την επιλογή των σχετικών δεδομένων και των μεθόδων υποβιβασμού της κλίμακας για την ατμοσφαιρική κυκλοφορία, τις κατακρημνίσεις και τις θερμοκρασίες. Επιλέχθηκε ένα σενάριο εκπομπής αερίων θερμοκηπίου, το A1B, ως κοινό σενάριο για όλες τις αναλύσεις (IPCC, 2007). Ο σημαντικότερος λόγος για μόνο ένα σενάριο ήταν ότι τα στοιχεία από διάφορα RCM (Regional Climate Model, κλιματικά μοντέλα περιοχής) που χρησιμοποιούν αυτό το σενάριο είναι διαθέσιμα από το πρόγραμμα ENSEMBLES. Τα μοντέλα αυτά παρέχουν χωρική ανάλυση της τάξεως των 25 Km. Τα τρία επιλεγμένα RCMs, ήταν το Aladin που βασίζεται στο GCM ARPEGE General Circulation Model, Μοντέλο γενικής κυκλοφορίας), το RCM PROMES που βασίζεται στο GCM HadCM3Q0 και το RCM RegCM που βασίζεται στο GCM Echam5-r3 (Σχήμα 2).



Σχήμα 2. Χωρική κάλυψη των μοντέλων Aladin, PROMES και RegCM που χρησιμοποιήθηκαν στο CCWaterS

Αναπτύχθηκε μια διακρατική βάση κλιματικών δεδομένων και κλιματικών σεναρίων Έγινε ανάπτυξη, βαθμονόμηση και επικύρωση εσωτερικής, μεθοδολογίας υποβιβασμού κλίμακας και εκτίμηση αβεβαιοτήτων στα μοντέλα.

Αφού προσαρμόστηκαν τα μοντέλα στις συγκεκριμένες πειραματικές περιοχές, παρήχθησαν μελλοντικά κλιματικά δεδομένα και έγινε εκτίμηση των σχετικών αβεβαιοτήτων.

Για μια ακόμη φορά αποδείχτηκε ότι τα σημερινά κλιματικά μοντέλα παρουσιάζουν αρκετές αποκλίσεις και αδυναμίες στην αναπαραγωγή των χαρακτηριστικών των πραγματικών δεδομένων. Οι ίδιες αποκλίσεις παρουσιάζονται και στις μελλοντικές προβλέψεις τους, και οι δυνατότητές τους για πραγματική επιχειρησιακή εφαρμογή είναι αμφισβητήσιμη. Ωστόσο μπορεί κανείς να θεωρήσει κάποιες δυσμενείς προβλέψεις τους σαν

σενάρια για την εκτίμηση των παρά πέρα επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής, μένοντας στην πλευρά της ασφαλείας.

3. ΕΝΟΤΗΤΑ 4 «ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

Το κύριο αντικείμενο ενδιαφέροντος του προγράμματος ήταν η διαθεσιμότητα των διαφόρων μορφών υδατικών πόρων κάτω από τις ενδεχόμενες δυσμενείς συνθήκες ανανεώσεώς των λόγω κλιματικής αλλαγής. Το θέμα αυτό αντιμετωπίστηκε στην 4^η ενότητα με τις ακόλουθες δράσεις:

- Δημιουργία μιας διεθνούς βάσης δεδομένων υδρολογίας και διαχείρισης ύδατος
- Εκτίμηση των υπόγειων υδατικών πόρων
- Αξιολόγηση των μεταβολών που μπορούν να προκληθούν στους των υδατικούς πόρους λόγω κλιματικής αλλαγής.

Οι αναμενόμενες κύριες αρνητικές επιδράσεις της κλιματικής αλλαγής (σύμφωνα με τις προβλέψεις που προέκυψαν στην ενότητα 3) είναι η μείωση της απορροής ή του εμπλουτισμού των υπόγειων νερών, και η ένταση των φαινομένων ξηρασίας. Η έκταση και η σημασία αυτών των επιδράσεων μπορεί να ποικίλουν από περιοχή σε περιοχή. Η διαθεσιμότητα ύδατος αξιολογείται στις πειραματικές περιοχές, προκειμένου να δοθεί μια γενική εικόνα αλλά και έμφαση στις ευαίσθητες περιοχές. Προσδιορίστηκε μια κοινή μεθοδολογία και οργάνωση για τον καθορισμό των διαθέσιμων υδάτινων πόρων, που βασίζονται στην αρχή της οδηγίας πλαισίου ύδατος της ΕΕ σύμφωνα με την οποία οι ανανεώσιμοι υδατικοί πόροι μειώνονται από την απαίτηση ύδατος των οικοσυστημάτων.

Συνοπτικά, έγιναν τα παρακάτω:

Για την δημιουργία της διεθνούς βάσης δεδομένων:

- ενσωμάτωση δεδομένων των τελευταίων 50-60 ετών σειρών ημερησίων δεδομένων μετεωρολογικών και υδρολογικών παραμέτρων.
- Εκτίμηση αβεβαιοτήτων των υδρολογικών παραμέτρων.

Για τον έλεγχο της υπάρχουσας διαθεσιμότητας των υπόγειων υδατικών αποθεμάτων:

- Ανάπτυξη κοινών μεθόδων υδατικών ισοζυγίων, χρησιμοποιώντας διαθέσιμα μοντέλα και λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις της οδηγίας-πλαίσιο της Ε.Ε. για το νερό.

Για την μελλοντική διαθεσιμότητα υδατικών αποθεμάτων σε σχέση με την κλιματική αλλαγή.

- Εκτίμηση της ευαισθησίας της κάθε περιφέρειας της Νοτιοανατολικής Ευρώπης στην κλιματική αλλαγή.

4. ΕΝΟΤΗΤΑ 5 «ΧΡΗΣΕΙΣ ΓΗΣ ΚΑΙ ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΥΔΑΤΩΝ»

Οι χρήσεις γης και οι μεταβολές τους στην διάρκεια του χρόνου αποτελούν τον δεύτερο σημαντικό παράγοντα που προσδιορίζει το υδρολογικό καθεστώς μιας περιοχής και επηρεάζει άμεσα το ισοζύγιο και την διαθεσιμότητα του νερού. Προκειμένου να αξιολογηθεί και ποσοτικοποιηθεί αυτός ο παράγων έγιναν οι ακόλουθες δράσεις:

- Καταγραφή των υπαρχουσών χρήσεων γης και των επιδράσεών τους στην ποιότητα του νερού σε επίπεδο λεκάνης απορροής.
- Εκτίμηση των επιρροών που προσδιορίζουν τις ανάγκες και την διαμόρφωση των χρήσεων γης. Η αστικοποίηση, το κυκλοφοριακό και η βιομηχανία εξαρτώνται κυρίως από την περιφερειακή ανάπτυξη, αλλά και έμμεσα από την κλιματική αλλαγή. Η γεωργία, η δασοκομία και ο τουρισμός είναι άμεσα συνδεδεμένες με τις κλιματικές αλλαγές.

Εκτίμηση των αλλαγών στις χρήσεις γης που προκαλούνται από την κλιματική αλλαγή.

- Ανάπτυξη κοινής μεθοδολογίας για τον υπολογισμό των αλλαγών στις χρήσεις γης που προκαλούνται από την κλιματική αλλαγή.

Εκτίμηση των επιπτώσεων από μελλοντικές αλλαγές στις χρήσεις γης στα υδατικά αποθέματα.

- Εκτίμηση των μελλοντικών χρήσεων γης σύμφωνα με σενάρια μεταβολής του κλίματος. Το παραπάνω είναι κρίσιμο για την προσαρμογή των στρατηγικών με στόχο τη δημόσια παροχή νερού στην κλιματική αλλαγή.

5. ΕΝΟΤΗΤΑ 6 «ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗ»

Στην ενότητα αυτή έγινε εκτίμηση των μελλοντικών επιπτώσεων της διαθεσιμότητας στην ασφάλεια της δημόσιας παροχής νερού και εξετάστηκαν τα ακόλουθα:

- Συνδυασμός μελλοντικών δημογραφικών δεδομένων για τη ζήτηση νερού με τη μελλοντική διαθεσιμότητά του για ύδρευση. Υπολογισμός των αναδυόμενων επιπτώσεων και δαπανών.
- Εκτίμηση των οικονομικών επιπτώσεων της μελλοντικής διαθεσιμότητας και ασφάλειας της δημόσιας παροχής νερού.
- Εκτίμηση οικονομικών απωλειών ή κερδών λόγω αλλαγών στη διαθεσιμότητα ή στην ασφάλεια.
- Εκτίμηση των αναδυόμενων ανισορροπιών μεταξύ διαφορετικών απαιτήσεων.
- Εκτίμηση ανταγωνισμών και απαιτήσεων διαφόρων τομέων για ασφαλή αποθέματα νερού.
- Περιβαλλοντική διάσταση των τιμών του νερού.
- Οικονομική ανάλυση της διαχείρισης του νερού και των αλλαγών των χρήσεων γης, για διαφορετικά σενάρια, στους διαχειριστές υδάτων.

6. ΕΝΟΤΗΤΑ 7 «ΜΕΤΡΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΥΔΡΕΥΣΗΣ»

Η ενότητα αυτή αποτελεί την κατακλείδα του προγράμματος όπου συντίθενται και λαμβάνουν μορφή εφαρμογής στην πράξη όλες οι αναλύσεις και τα επί μέρους συμπεράσματα των προηγούμενων ενοτήτων του προγράμματος. Επίσης έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων με τους στόχους του προγράμματος.

Η ενότητα αυτή κατέληξε στις ακόλουθες προτάσεις:

- Αλλαγή στρατηγικής στον χωροταξικό σχεδιασμό.
- Νέες στρατηγικές για τη διαχείριση των κινδύνων που σχετίζονται με τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής πρέπει να χαρακτηρίζονται από διατομεακή προσέγγιση.
- Προώθηση (νέων) νομοθετικών κανόνων και κατευθυντήριων γραμμών.
- Προετοιμασία νομοθετικής βάσης για το μετριασμό πιθανών αρνητικών επιδράσεων των αλλαγών του κλίματος και των χρήσεων γης στη διαχείριση της διάθεσης νερού.
- Προσαρμογή του συστήματος διαχείρισης της ύδρευσης.
- Ανάπτυξη κατάλληλων τεχνικών και οργανωτικών μέτρων.
- Υπηρεσία επίλυσης διαφορών μεταξύ ανταγωνιστικών τομέων και απαιτήσεων.
- Συνεχής κύκλος ανατροφοδότησης των παραπάνω με νέα δεδομένα και εκτιμήσεις.

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα κύρια συμπεράσματα που προέκυψαν από την μελέτη «Επιπτώσεις στην Ύδρευση από Ενδεχόμενη Κλιματική Αλλαγή», είναι τα ακόλουθα:

Τα φαινόμενα της φυσικής κλιματικής μεταβλητότητας είναι ενδεχόμενο να ενταθούν κάτω από την ανθρωπογενή αύξηση του CO₂ στην ατμόσφαιρα και τις μεταβολές στην

ατμοσφαιρική κυκλοφορία. Τα σημερινά μοντέλα γενικής κυκλοφορίας (GCM) δεν είναι αξιόπιστα, δεν συμφωνούν μεταξύ τους και δεν παρέχουν ικανοποιητικές πληροφορίες σε τοπικό επίπεδο. Η έρευνα συνεχίζεται και τα μοντέλα βελτιώνονται συνεχώς, όμως η χρήση τους για επιχειρησιακούς σκοπούς είναι ακόμη παρακινδυνευμένη. Αυτό που μπορούμε να δεχτούμε ωστόσο είναι διάφορα «κακά» σενάρια σχετικά με αύξηση της θερμοκρασίας ή/και μείωση των βροχοπτώσεων. Αν και τα αποδεκτά ποσοστά μεταβολής αυτών των μετεωρολογικών παραμέτρων είναι γενικώς αυθαίρετα, ωστόσο μπορούν να αποτελέσουν την βάση για μια σειρά σεναρίων του τύπου «εάν...τι θα συμβεί». Αυτά τα σενάρια μπορούν να τροφοδοτήσουν τα υδρολογικά μοντέλα προσομοίωσης και με αυτό τον τρόπο να καταλήξουμε σε μια σειρά σεναρίων σχετικά με την ενδεχόμενη εξέλιξη των υδατικών πόρων.

Όμως η διαθεσιμότητα του νερού εξαρτάται ακόμη περισσότερο από:

1. Τα έμμεσα αποτελέσματα της κλιματικής αλλαγής, όπως τις αλλαγές στη βλάστηση, η οποία εξαρτάται από την αλλαγή των κλιματολογικών όρων.
2. Τα ανεξάρτητα φαινόμενα που θα μπορούσαν να συμβαίνουν ούτως ή άλλως, αλλά και που θα μπορούσαν επίσης να είναι μια ανθρώπινη αντίδραση στην αλλαγή κλίματος, όπως η αλλαγή της νοοτροπίας, των αναγκών και των συνηθειών των ανθρώπων, οι πολιτικές αποφάσεις κλπ.

Γίνεται αποδεκτό ότι τα πιθανά άμεσα αποτελέσματα της κλιματικής αλλαγής θα μπορούσαν να είναι πιο ποικίλα από μια απλή αύξηση θερμοκρασίας ή την συνολική ετήσια μείωση των κατακρημνίσεων. Είναι επόμενο, ότι πολλά εξαρτώμενα φαινόμενα μπορούν να παρουσιάσουν μια αναμενόμενη αλλά και απροσδόκητη επίσης εξέλιξη και μια πολυπλοκότητα, ανάλογα με τη δριμύτητα και τη μορφή των αρχικών αποτελεσμάτων κλιματικής αλλαγής.

Το κύριο πρόβλημα είναι ότι οι σύγχρονες μέθοδοι και τα μοντέλα δεν μπορούν να προβλέψουν οπωσδήποτε, ούτε τα ακριβή φαινόμενα, ούτε την έκταση και τη δριμύτητα αυτών των φαινομένων. Καθένα από τα άμεσα αποτελέσματα της κλιματικής αλλαγής μπορεί να παραγάγει μια σειρά δευτεροβαθμίων ή εμμέσων αποτελεσμάτων που θα επιδεινώσουν την κατάσταση που επηρεάζεται από τα άμεσα αποτελέσματα της κλιματικής αλλαγής:

1. Έμμεσα αποτελέσματα κλιματική αλλαγής:

Αλλαγή στη διάρκεια της θερμής-ξηράς περιόδου του έτους:

1. Μεγαλύτερη τουριστική περίοδος.
2. Μεγαλύτερη αρδευτική περίοδος.
3. Μεγαλύτερη περίοδος έντονης χρήσης ντους και ποτίσματος κήπων.
4. Κοπάδια που μεταφέρονται στα υψηλότερα ύψη για πιο μεγάλη περίοδο.
5. Μεγαλύτερη περίοδος με έντονη χρήση κλιματισμού.

Προβλήματα:

Μεγαλύτερη περίοδος μεγάλης κατανάλωσης ύδατος

Αλλαγή στην εξατμισοδιαπνοή:

1. Περισσότερες απώλειες ύδατος στους ταμιευτήρες.
2. Απώλειες ύδατος από την βλάστηση και το έδαφος
3. Περισσότερη άρδευση.

Προβλήματα:

Αυξημένη κατανάλωση ύδατος

Αλλαγή στη χλωρίδα:

1. Τοπική μετατόπιση ειδών προς τα βόρεια.
2. Τοπική μετατόπιση ειδών προς μεγαλύτερα υψόμετρα.
3. Απώλεια μερικών τοπικών ειδών.
4. Εμφάνιση νέων ειδών χλωρίδας.
5. Αλλαγή σε χρήσεις εδάφους.
6. Αλλαγή στις καλλιέργειες.
7. Αύξηση δασικών πυρκαγιών.

Προβλήματα:

Άμεση αλλαγή του συντελεστή απορροής και του ισοζυγίου ύδατος.

Αλλαγή στην πανίδα, αλλαγή στα παράσιτα:

1. Περισσότερο ευνοϊκό περιβάλλον για μερικά είδη.
2. Τοπική μετατόπιση ειδών προς μεγαλύτερα υψόμετρα.
3. Μερικά τοπικά είδη χάνονται.
4. Νέα είδη παρασίτων εμφανίζονται.

Προβλήματα:

Αλλαγές στην ανάπτυξη χλωρίδας, τον συντελεστή απορροής και το ισοζύγιο ύδατος.

Αποτελέσματα της κλιματικής αλλαγής στη δριμύτητα και τη συχνότητα των ακραίων γεγονότων:

Αλλαγή σε:

1. Θύελλες
2. Κατακρημνίσεις
3. Χιονοπτώσεις
4. Πλημμύρες.
5. Ξηρασίες

Προβλήματα:

1. Αυξάνει η ευπάθεια σε πλημμύρες μεγάλων περιοχών.
2. Κατολισθήσεις και καθιζήσεις εδάφους.
3. Αλλαγές στην διαίτα και την κοίτη των ποταμών.
4. Αλλαγές στα δέλτα ποταμών και τις παράκτιες περιοχές.

2. Διάφοροι παράγοντες ανεξάρτητοι από την ενδεχόμενη κλιματική αλλαγή μπορεί να έχουν αποφασιστικές επιπτώσεις σε οποιαδήποτε εξέλιξη των τοπικών αποτελεσμάτων της κλιματικής αλλαγής:

Αλλαγή χρήσεων γης:

1. Εγκατάσταση πληθυσμού.
2. Οικονομικοί παράγοντες.
3. Πολιτικές αποφάσεις.
4. Κακές διοικητικές πρακτικές.

Αλλαγή τεχνολογίας:

1. Νέα ισορροπία μεταξύ της ενέργειας και της κατανάλωσης ύδατος.
2. Ρυθμός αλλαγής του εξοπλισμού με νέο τεχνολογικά βελτιωμένο.

3. Πολιτική ανάπτυξης τεχνολογίας

Τα ειδικά συμπεράσματα για τις πηγές της Αραβησσού (παραγωγή) και την Θεσσαλονίκη (κατανάλωση) είναι τα ακόλουθα:

- Η παραγωγικότητα των πηγών Αραβησσού εξαρτάται άμεσα και αποκλειστικά από τις κατακρημνίσεις. Αυτό οφείλεται στον ιδιαίτερο τρόπο λειτουργίας του καρστ του υδροφορέα των πηγών αυτών. Ενδεχόμενη αύξηση της θερμοκρασίας και της εξατμισοδιαπνοής δεν θα επηρεάσουν σημαντικά την παροχή των πηγών, ενώ κάθε μείωση στις κατακρημνίσεις θα είναι άμεσα αισθητή.
- Η αντιμετώπιση ενδεχόμενης μελλοντικής λειψυδρίας μπορεί να γίνει μόνο με εναλλακτικές πηγές τροφοδοσίας, επαναχρησιμοποίηση του νερού (για αρδεύσεις) από τις εγκαταστάσεις καθαρισμού λυμάτων, χρήση τοπικών γεωτρήσεων μέσα στην πόλη για το πότισμα των πάρκων και περιορισμό των απωλειών και των μη τιμολογούμενων ποσοτήτων νερού, της τάξεως του 25% σήμερα.
- Θεωρώντας ότι στην δυσμενέστερη περίπτωση ή μείωση των κατακρημνίσεων στο τέλος του παρόντος αιώνας δεν θα υπερβεί το 20% των μέσων τιμών σήμερα, η Θεσσαλονίκη δεν προβλέπεται να αντιμετωπίσει προβλήματα, εφόσον υλοποιηθούν τα παραπάνω.

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Η άμεση πηγή πληροφοριών για τα παραπάνω ευρίσκεται στην διεύθυνση: www.ccwaters.eu. Στις διάφορες ειδικές εκθέσεις και εργασίες από τις οποίες συντέθηκε η παρούσα εργασία υπάρχουν εξειδικευμένες αναφορές στην διεθνή βιβλιογραφία.

**ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΤΩΝ ΚΛΙΜΑΤΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΩΝ
ΣΤΟ ΥΔΑΤΙΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΤΗΣ ΛΙΜΝΗΣ ΚΑΡΛΑΣ ΤΗΝ
ΠΕΡΙΟΔΟ 2070-2100**

Ιωάννης Τζώρτζης, Ηρακλής Χαλκίδης*

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Γεωπονική Σχολή, Τμήμα Φυτικής Παραγωγής και
Αγροτικού Περιβάλλοντος, Εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής.

*Στοιχεία επικοινωνίας: ichalkidis@uth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο άρθρο αυτό μελετάται το μελλοντικό υδατικό ισοζύγιο της λίμνης Κάρλας για την περίοδο 2070-2100 με βάση τα δεδομένα του περιοχικού κλιματικού μοντέλου RCAO. Συγκρίνονται τα δεδομένα της βροχόπτωσης των μοντέλων HIRHAM, REMO, RCAO της περιόδου 1960-1990 με πραγματικά δεδομένα του μετεωρολογικού σταθμού Λάρισας. Αθροιστικά το ύψος βροχής του RCAO έδωσε συγκρίσιμα αποτελέσματα και εξάγονται εξισώσεις συσχέτισης των τιμών του ανά μήνα με τα πραγματικά δεδομένα. Οι εξισώσεις συσχέτισης χρησιμοποιούνται για τη διόρθωση των τιμών του RCAO για την περίοδο 2070-2100. Τελικά για την εκτίμηση του υδατικού ισοζυγίου της λίμνης χρησιμοποιούνται οι απευθείας και οι διορθωμένες τιμές του RCAO. Παρατηρείται ότι η λειτουργία του ταμιευτήρα είναι ομαλή και υπάρχει περίσσεια νερού για περαιτέρω χρήση, εφόσον πραγματοποιηθούν τα προβλεπόμενα έργα.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Ισοζύγιο, Λίμνη Κάρλα, Κλιματικές Αλλαγές, PRUDENCE, RCM's

**STUDY OF CLIMATE CHANGES IMPACT ON WATER
BALANCE OF LAKE KARLA FOR THE PERIOD 2070-2100**

John Tzortzis, Iraklis Chalkidis*

Department of Agriculture, Crop Production and Rural Environment, University
of Thessaly. Fytokou Street, N. Ionia, GR-384 46, Volos, Greece

*Corresponding author: ichalkidis@uth.gr

ABSTRACT

This paper studies the future water balance of Lake Karla for the period 2070-2100 based on data from the regional climate model RCAO. The rainfall data from regional models HIRHAM, REMO, RCAO for the period 1960-1990 are compared with actual rainfall data from the weather station in Larissa. Cumulative rainfall from the RCAO gave comparable results and the equations linking the model's values per month with the actual data were extracted. The correlation equations are used to correct the values of the RCAO for the period 2070-2100. Finally, to assess the water balance of the lake, directly and corrected values of RCAO are used. It is observed that the function of the lake is normal and there is excess water for further use if the planned projects take place.

KEY WORDS: Water Balance, Lake Karla, Climate Changes, PRUDENCE, RCM's

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το πλούσιο σε γεγονότα γεωλογικό παρελθόν του πλανήτη μας, συνέβαλε να γνωρίσει η Γη μας πολλές κλιματικές αλλαγές. Το κλίμα της γης αλλάζει συνεχώς. Βιώνοντας μόνο μια πολύ μικρή περίοδο σε σχέση με την ηλικία της Γής αλλά και την χρονική διάρκεια των αλλαγών που γίνονται σε αυτή, δυσκολευόμαστε πολλές φορές να αντιληφθούμε τις μεγάλες αλλαγές του κλίματος. Το κλίμα της Γης χαρακτηρίζεται από πολλές περιόδους παγετώνων, οι οποίες διακόπτονται από σύντομα διαλείμματα ζέστης και ακμάζουσας ζωής. Το κλίμα που βιώνουμε είναι αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης εκατοντάδων μεταβλητών οι οποίες έχουν σχέση με την κύρια πηγή ενέργειας του πλανήτη καθώς και με τις γήινες παραμέτρους που το διαμορφώνουν (σύσταση της ατμόσφαιρας, άνεμοι και θαλάσσια ρεύματα, τοπογραφία, νέφη και υετός, ηφαιστειακές εκρήξεις, κτλ). Οποιαδήποτε αλλαγή γίνει σε αυτές τις παραμέτρους είτε από κάποιο φυσικό παράγοντα είτε από κάποια ανθρώπινη δραστηριότητα, θα επιφέρει μεταβολή και στο κλίμα. Οι αλλαγές που συμβαίνουν στο παγκόσμιο κλίμα είναι σχετικά δύσκολο να ανιχνευτούν την περίοδο που συμβαίνουν καθώς δεν υπάρχουν καθαρές ενδείξεις. Ωστόσο οι μελέτες δείχνουν ότι τα τελευταία χρόνια με την αύξηση της συγκέντρωσης των ρυπογόνων ουσιών στην ατμόσφαιρα εξαιτίας των ανθρώπινων δραστηριοτήτων, υπάρχει μια διαταραχή του κλίματος.

Οι επιστήμονες προσπαθούν να προβλέψουν το τι θα συμβεί στο κλίμα το επόμενο διάστημα αλλά και σε μια περίοδο 100 ετών, ώστε να παρθούν κάποια μέτρα από τώρα για να αποτραπούν οι καταστροφικές συνέπειες. Στην Ευρώπη δημιουργήθηκε μια ερευνητική ομάδα που αποτελούνταν από πολλά μετεωρολογικά ινστιτούτα και πανεπιστήμια και χρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση. Το πρόγραμμα αυτό ονομάστηκε PRUDENCE. Στο πλαίσιο του προγράμματος αυτού κατασκευάστηκαν κάποια λογισμικά, τα παγκόσμια κλιματικά μοντέλα (Global Climate Models, GCM's), τα οποία χρησιμοποιώντας τις μεταβλητές που επηρεάζουν το κλίμα και τις προβλεπόμενες μελλοντικές τους τιμές, δίνουν κάποια στοιχεία του μελλοντικού κλίματος όπως βροχόπτωση θερμοκρασία κτλ για όλες τις περιοχές του πλανήτη. Στη συνέχεια αναπτύχθηκαν τα περιοχικά μοντέλα (Regional Climate Models, RCM's) τα οποία προβλέπουν τα μετεωρολογικά δεδομένα σε μια συγκεκριμένη περιοχή και η ανάλυσή του (grid) είναι σαφώς μεγαλύτερη. Τα RCM's χρησιμοποιούν ως τιμές εισόδου τα δεδομένα των GCM's.

Όλα τα μοντέλα συγκλίνουν σε ένα αποτέλεσμα. Ότι σε γενικές γραμμές θα υπάρχει αύξηση της μέσης θερμοκρασίας της Γής και σε ορισμένες περιοχές θα είναι ιδιαίτερα μεγάλη καθώς και ότι θα μειωθεί η συχνότητα της βροχόπτωσης σε κάποια μέρη. Η ανάλυση των περιοχικών μοντέλων είναι ικανοποιητική αλλά για την μελέτη των επιπτώσεων στο υδατικό ισοζύγιο μιας περιοχής χρειάζεται περαιτέρω βελτίωσή της.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση των επιπτώσεων των κλιματικών αλλαγών στο υδατικό ισοζύγιο της Λίμνης Κάρλας σύμφωνα με τις κλιματικές προβλέψεις της περιόδου 2070-2100.

Βασικοί στόχοι της διερεύνησης αυτής αποτελούν: 1) η προσαρμοστικότητα διαφόρων μοντέλων πρόβλεψης με τα τοπικά κλιματικά χαρακτηριστικά της περιοχής διερεύνησης. 2) Η προσαρμοστικότητα των μελλοντικών δεδομένων στις τοπικές συνθήκες της περιοχής διερεύνησης 3) Ο υπολογισμός του υδατικού ισοζυγίου της λίμνης με διάφορα πιθανά σενάρια λειτουργίας της λίμνης.

Το υδατικό ισοζύγιο της Λίμνης Κάρλας και η διερεύνηση της επίδρασης των κλιματικών αλλαγών έχει αποτελέσει θέμα διερεύνησης από πολλούς ερευνητές με πιο

σημαντικά τα άρθρα των Λουκά, Πατσώνα και Βασιλειάδης (Loukas et.al 2009, Πατσώνας και άλλοι 2009). Επίσης με την προσομοίωση της λίμνης Κάρλας ασχολήθηκαν οι Λουκάς, Ν. Μυλόπουλος, Γ. Μυλόπουλος και Ε. Μουστάκα (Λουκάς και άλλοι 2005).

2. ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΤΙΜΩΝ ΤΗΣ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΔΟΥ 1960-1990 ΚΑΙ 2070-2100 ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ RCAO

2.1 ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΔΟ 2070- 2100 ΑΠΟ ΤΑ ΜΟΝΤΕΛΑ RCAO, HIRHAM, REMO

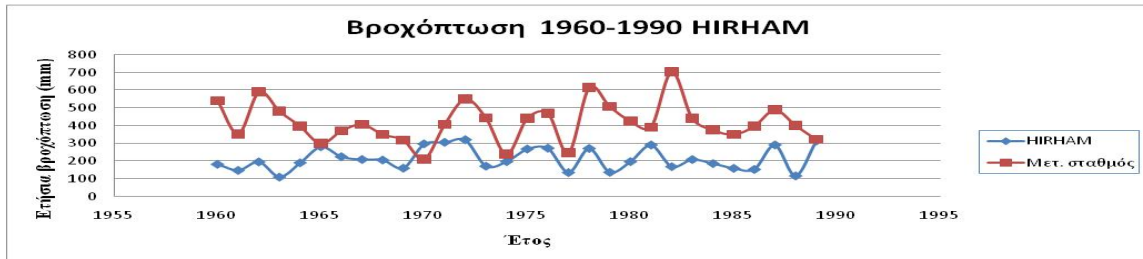
Στη μελέτη του υδατικού ισοζυγίου της λίμνης Κάρλας χρησιμοποιούνται τα μελλοντικά δεδομένα της περιόδου 2070-2100 που προέρχονται από μοντέλα πρόγνωσης των κλιματικών αλλαγών. Η επιλογή αυτή έγινε ανάμεσα από τρία RCM's, το RCAO (Doscher R., Willen U., Jones C.,2002), το HIRHAM (Christensen J., Christensen O., Lopez P., 1996), και το REMO (Jacob D., Podzun R.,1996). Αρχικά έπρεπε να βρεθούν οι συντεταγμένες της περιοχής της Κάρλας σε κάθε μοντέλο ξεχωριστά. Οι συντεταγμένες rlon-rlat της περιοχής διαφέρουν από μοντέλο σε μοντέλο εξαιτίας της περιστροφής και της καμπυλότητας της Γης, αλλά και των μεταβλητών με τις οποίες γίνονται οι υπολογισμοί του μοντέλου (Javier G. Corrêio, 2000). Με βάση αυτές τις διαφορές του περιστρεφόμενου πλέγματος (rotated grid), αρχικά βρέθηκαν οι πίνακες μετασχηματισμού από γεωγραφικές συντεταγμένες lon-lat σε κυλινδρικές rlon-rlat. Αφού έγινε η λήψη των πινάκων rlon-rlat για το κάθε μοντέλο στη συνέχεια με τη χρήση των γεωγραφικών συντεταγμένων 39° 32'N, 22° 42'E έγινε η αντιστοίχιση στις περιστρεφόμενες συντεταγμένες που αντιστοιχούν στο κελί του πλέγματος που βρίσκεται η λίμνη. Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται οι συντεταγμένες του κάθε μοντέλου ξεχωριστά.

Πίνακας 1. Συντεταγμένες rlon-rlat των μοντέλων

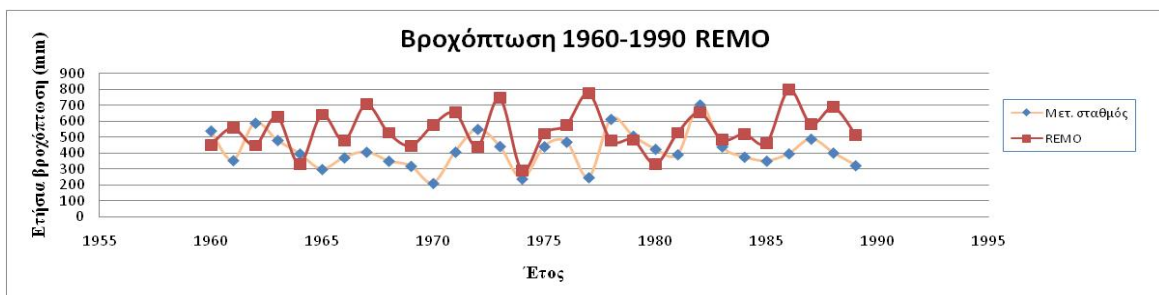
Μοντέλο	rlon	lon	lon σταθμού E.M.Y.	rlat	lat	lat σταθμού E.M.Y.
RCAO	60	39,32	39,39	11	22,42	22,27
HIRHAM	56			11		
REMO	51			25		

Με βάση τις συντεταγμένες των RCM's έγινε η λήψη των μηνιαίων τιμών της βροχόπτωσης του κάθε μοντέλου τόσο για την περίοδο 1960-1990 οι οποίες χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο και διόρθωση του μοντέλου όσο και οι μελλοντικές τιμές των ετών 2070-2100. Οι τιμές των μοντέλων αντιστοιχούν στο σενάριο A2, που σημαίνει «Μέτρια αύξηση του μέσου παγκόσμιου κατά κεφαλήν εισοδήματος. Ιδιαίτερα έντονη κατανάλωση ενέργειας. Ραγδαία αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού. Αργή και τμηματική τεχνολογική ανάπτυξη και μέτριες έως μεγάλες αλλαγές στη χρήση γης. Ραγδαία αύξηση της συγκέντρωσης του CO₂ στην ατμόσφαιρα η οποία θα φτάσει τα 850 ppm το 2100» (Τράπεζα της Ελλάδος, 2011). Αρχικά υπολογίστηκαν οι ετήσιες τιμές της βροχόπτωσης των μοντέλων και του μετεωρολογικού σταθμού Λάρισας της περιόδου 1960-1990 με σκοπό να μπορέσει να γίνει μια σύγκριση των τιμών και να γίνει η επιλογή του μοντέλου που θα χρησιμοποιηθεί. Χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα του σταθμού Λάρισας επειδή ήταν η μοναδική πλήρης χρονοσειρά

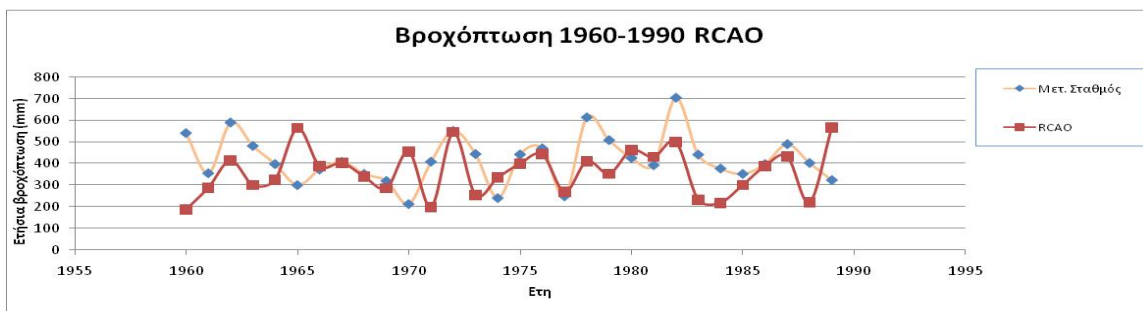
βροχόπτωσης που κατέστη δυνατό να βρεθεί και επειδή αντιπροσωπεύει το χαμηλότερο τμήμα της υδρολογικής λεκάνης άρα και τη δυσμενέστερη υπόθεση βροχόπτωσης της λεκάνης της Κάρλας. Τα Διαγράμματα 1,2 και 3 παρουσιάζουν τις χρονοσειρές των μοντέλων και του μετεωρολογικού σταθμού.



Διάγραμμα 1. Ετήσια βροχόπτωση μοντέλου HIRHAM



Διάγραμμα 2. Ετήσια βροχόπτωση μοντέλου REMO



Διάγραμμα 3. Ετήσια βροχόπτωση μοντέλου RCAO

Από τις χρονοσειρές της βροχόπτωσης των τριών αυτών μοντέλων παρατηρούμε ότι για τα δυο πρώτα μοντέλα, το HIRHAM και το REMO υπάρχουν μεγάλες αποκλίσεις από τις μετρήσεις του μετεωρολογικού σταθμού. Σε μερικές περιπτώσεις αυτή η απόκλιση μπορεί να προσεγγίζει και τα 600 mm ετησίως (HIRHAM 1982). Τα στατιστικά κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν για την προσαρμοστικότητα των μοντέλων με τα πραγματικά δεδομένα είναι κατά Feyen *et al.* (2000), το σχετικό μέσο τετραγωνικό σφάλμα (Relative Root Mean Square Error, RRMSE), ο συντελεστής προσδιορισμού* (Coefficient of Determination $CD \neq R^2$ *), ο συντελεστής απόδοσης (the Coefficient of Efficiency R^2 κατά Nash and Shutcliff, (1970) ή EF κατά Feyen *et al.* (2000) καθώς και με το μέσο απόλυτο σφάλμα (Mean Absolute Error MAE) τα αποτελέσματα των οποίων δίνονται αντίστοιχα στον παρακάτω Πίνακα 2.

$$* CD = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2} \text{ με } 0 < CD \leq +\infty, \text{ όπου } P_i \text{ είναι η } i \text{ τιμή της προσομοίωσης, } O_i$$

είναι η i τιμή των πραγματικών δεδομένων, \bar{O} είναι η μέση τιμή των παρατηρούμενων τιμών, n είναι ο αριθμός των παρατηρήσεων της εξεταζόμενης περιόδου. Προσοχή πρέπει να δίνεται, ωστόσο, όταν χρησιμοποιείται ο δείκτης αυτός, δεδομένου ότι ο όρος "συντελεστής προσδιορισμού" αναφέρεται επίσης και στην ποιότητα προσαρμογής της γραμμικής παλινδρόμησης τύπου Pearson που συμβολίζεται ως R^2 . (Legates and McCabe, 1999 και Vazquez et. al. 2002).

Πίνακας 2. Συσχέτιση δεδομένων μετεωρολογικού σταθμού Λάρισας με τις υπολογισμένες τιμές των μοντέλων RCAO, HIRHAM και REMO

	RCAO	HIRHAM	REMO	Κριτήριο
EF	-0,47	-0,54	-1,23	$(-\infty < EF \leq 1)$
CD	0,98	1,87	0,79	$0 < CD \leq +\infty$
RRMSE	0,95	0,69	1,06	$0 \leq RRMSE$
MAE (mm)	27,45	28,21	35,46	$0 \leq MAE$

Παρατηρώντας τις τιμές του RCAO σε σχέση με τις πραγματικές βλέπουμε ότι οι τιμές είναι σχετικά κοντά και το πιο σημαντικό είναι ότι συμπίπτουν σε ικανοποιητικό βαθμό τα τοπικά μέγιστα και τα τοπικά ελάχιστα των δυο αυτών καμπυλών. Αυτό που είναι ενδιαφέρον είναι ότι η συνολική βροχόπτωση της περιόδου 1960-1990 του μοντέλου σε σχέση με την πραγματική έχει μια διαφορά της τάξης του 13%. Η τιμή του μοντέλου είναι 10.908 mm ενώ οι μετρήσεις του σταθμού είναι 12.575mm. Με βάση αυτό συμπεραίνουμε ότι οι μηνιαίες τιμές του μοντέλου μπορεί να έχουν μια διακύμανση σε σχέση με τις πραγματικές αλλά η συνολική βροχόπτωση όλων των ετών παραμένει σχεδόν αμετάβλητη. Για τους παραπάνω λόγους οι τιμές που επιλέχθηκαν να χρησιμοποιηθούν στην παρούσα εργασία είναι του RCM RCAO.

2.2 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΤΙΜΩΝ ΤΗΣ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΔΟ 1960-1990 ΑΠΟ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ RCAO

Οι μηνιαίες τιμές της βροχόπτωσης της περιόδου 1960-1990 του RCAO, στη συνέχεια ταξινομήθηκαν ανά μήνα και ανά έτος. Βρέθηκε ο μέσος όρος του κάθε μήνα για τη διάρκεια των 30 ετών τόσο του RCAO όσο και του μετεωρολογικού σταθμού. Παρατηρούμε ότι τους καλοκαιρινούς μήνες το μοντέλο μας δίνει αρκετά χαμηλότερο μέσο όρο σε σχέση με τις πραγματικές τιμές (Πίν. 3). Επίσης όσον αφορά τους υπόλοιπους μήνες υπάρχουν κάποιες διακυμάνσεις αλλά είναι σχετικά μικρότερες. Μπορούμε να πούμε ότι το μοντέλο τους χειμερινούς-ανοιξιάτικους μήνες έχει τιμές βροχόπτωσης σχετικά μεγαλύτερες από τις πραγματικές.

Στη συνέχεια έγινε προσπάθεια να αναπτυχθούν σχέσεις για τη μηνιαία βροχόπτωση της περιόδου 1960-1990 ανάμεσα στις εκτιμήσεις του RCAO και στις πραγματικές τιμές του σταθμού Λάρισας.

Πίνακας 3. Μέσοι όροι ανά μήνα την περίοδο 1960-1990

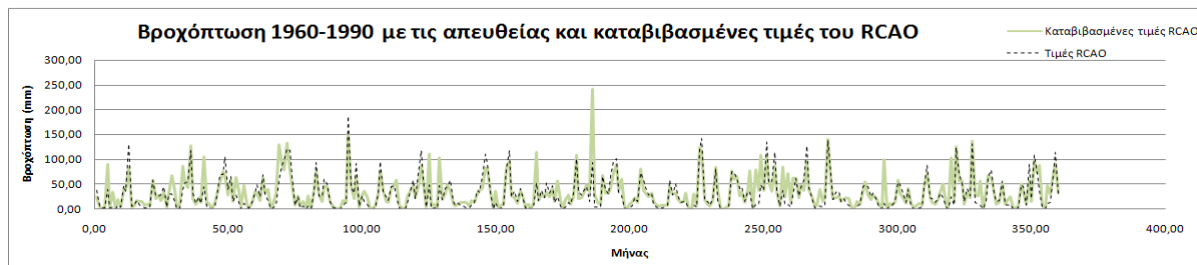
Μήνας	RCAO(mm)	Μετ. σταθμός(mm)
ΙΑΝ	50,0	31,73
ΦΕΒ	44,3	35,88
ΜΑΡ	36,5	37,76
ΑΠΡ	29,9	29,37
ΜΑΪ	18,1	38,19
ΙΟΥΝ	7,8	24,33
ΙΟΥΛ	2,0	18,60
ΑΥΓ	3,6	13,73
ΣΕΠ	14,2	31,69
ΟΚΤ	45,7	46,51
ΝΟΕ	67,4	56,31
ΔΕΚ	44,1	55,03

Στόχος ήταν να βρεθεί μια γραμμική συνάρτηση διόρθωσης ώστε να καταστεί δυνατή η βελτίωση των τιμών του RCAO για την περίοδο 1960-1990 σε σχέση με τις πραγματικές και στη συνέχεια αυτή η διόρθωση να επεκταθεί και στις μελλοντικές τιμές της βροχόπτωσης του RCAO για την περίοδο 2070-2100. Για να πραγματοποιηθεί αυτό έγινε χρήση της διπλής αθροιστικής καμπύλης σε κάθε μήνα ξεχωριστά (Μιμίκου, 1994). Υπολογίστηκε η αθροιστική των πραγματικών δεδομένων και των τιμών του RCAO ξεχωριστά και στη συνέχεια με τη κατασκευή του διαγράμματος, όπου στον άξονα x είναι οι τιμές της αθροιστικής του RCAO και στον y οι αντίστοιχες τιμές του μετεωρολογικού σταθμού, βρέθηκε η μεταξύ τους γραμμική συσχέτιση μέσω της ευθείας ελαχίστων τετραγώνων καθώς και η τιμή του συντελεστή R^2 που μας δείχνει το ποσοστό στο οποίο ανταποκρίνεται η ευθεία αυτή στην καμπύλη της διπλής αθροιστικής. Από την στατιστική επεξεργασία των δεδομένων προέκυψε ότι υπάρχει μια πολύ καλή συσχέτιση ανάμεσα στις τιμές του μοντέλου και του σταθμού για όλους τους μήνες εκτός από τον Ιούλιο. Οι τιμές του R^2 τον μήνα Ιούλιο είναι 70% ενώ για όλους τους υπόλοιπους σταθερά πάνω από 93%. Με βάση τις συναρτήσεις του κάθε μήνα ξεχωριστά υπάρχει η δυνατότητα να διορθωθούν οι μελλοντικές τιμές του RCAO και να ανταποκρίνονται καλύτερα στα δεδομένα της περιοχής της λίμνης. Οι γραμμικές εξισώσεις για κάθε μήνα ξεχωριστά δίνονται στον Πίνακα 4 που ακολουθεί.

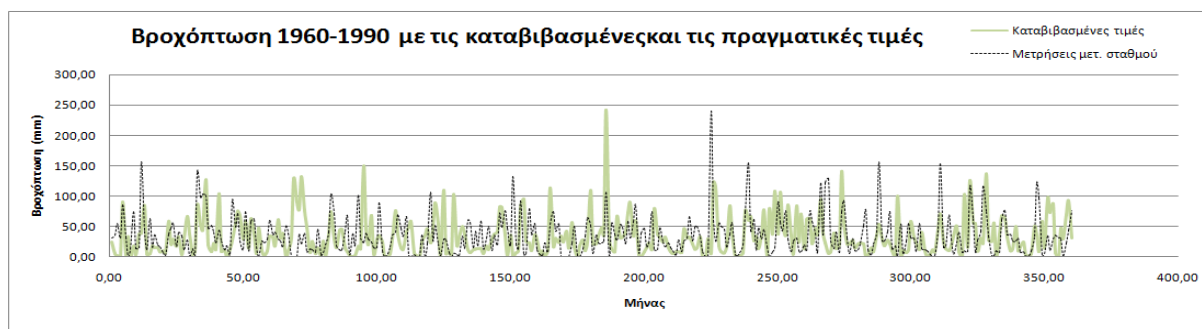
Πίνακας 4. Εξισώσεις διόρθωσης και R^2 των τιμών βροχόπτωσης του RCAO ανά μήνα

Μήνας	R^2	Εξίσωση
ΙΑΝ	0.982	$Y=0.647x-55.66$
ΦΕΒ	0.988	$Y=0.749x+30.75$
ΜΑΡ	0.976	$Y=0.89x+124$
ΑΠΡ	0.977	$Y=1.045x+1.056$
ΜΑΪ	0.985	$Y=2.286x-56.36$
ΙΟΥΝ	0.952	$Y=2.598x+74.59$
ΙΟΥΛ	0.695	$Y=8.186x+114.3$
ΑΥΓ	0.93	$Y=4.269x-22.63$
ΣΕΠ	0.944	$Y=2.206x+64.20$
ΟΚΤ	0.991	$Y=1.022x+59.74$
ΝΟΕ	0.947	$Y=0.799x-54.24$
ΔΕΚ	0.987	$Y=1.085x+112.8$

Στη συνέχεια δίνονται οι χρονοσειρές της βροχόπτωσης τόσο των πραγματικών δεδομένων όσο και οι καταβιβασμένες και μη τιμές του RCAO για την περίοδο 1960-1990. Τα στατιστικά μέτρα σύγκρισης που χρησιμοποιούνται είναι ο συντελεστής προσδιορισμού (Coefficient of Determination CD) με άριστη την τιμή 1, αλλά και η επί % διαφορά του συνολικού ύψους βροχής.



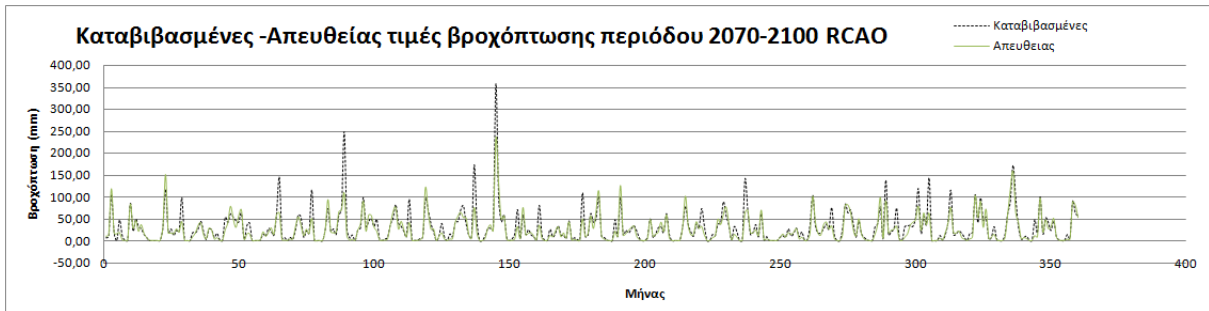
Διάγραμμα 4. Καταβιβασμένες και μη μηνιαίες τιμές βροχόπτωσης περιόδου 1960-1990 του μοντέλου RCAO (CD= 0.977 και 13% διαφορά από πραγματικό αθροιστικό ύψος βροχής)



Διάγραμμα 5. Διορθωμένες και πραγματικές μηνιαίες τιμές βροχόπτωσης περιόδου 1960-1990 (CD= 1.013 και 3,76% διαφορά από πραγματικό αθροιστικό ύψος βροχής)

2.3 ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΤΩΝ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΤΙΜΩΝ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ ΤΟΥ RCAO ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΛΙΜΝΗΣ ΚΑΡΛΑΣ

Στην προηγούμενη ενότητα μέσω στατιστικών διεργασιών έγινε δυνατό να παραχθούν εξισώσεις διόρθωσης των τιμών του μοντέλου ανά μήνα. Τώρα με τη χρήση αυτών των εξισώσεων, έχοντας τα δεδομένα της βροχόπτωσης της περιόδου 2070-2100 του μοντέλου, θα βρεθούν οι διορθωμένες τιμές της περιοχής. Στη θέση της μεταβλητής x των εξισώσεων, όπως είπαμε προηγουμένως, θα τοποθετηθούν οι μελλοντικές τιμές της αθροιστικής του RCAO τον συγκεκριμένο μήνα και μέσω της σχέσης θα μας δοθεί η νέα τιμή της αθροιστικής. Στη συνέχεια με αφαίρεση των διαδοχικών τιμών της αθροιστικής θα αποκτήσουμε τις μεταβολές της, οι οποίες αντιστοιχούν στις καταβιβασμένες τιμές της βροχόπτωσης του κάθε μήνα ξεχωριστά για τα έτη 2070-2100. Η πρώτη τιμή του κάθε μήνα, δηλαδή οι μηνιαίες τιμές του έτους 2070, εξαιτίας του γεγονότος ότι δε μπορούμε να έχουμε την μεταβολή σε σχέση με την προηγούμενη τιμή της αθροιστικής, επιλέχθηκε να είναι ίση με μια σχέση της μορφής $y=ax$ όπου a ο συντελεστής της εξίσωσης διόρθωσης του μήνα και x η αντίστοιχη τιμή του μοντέλου. Παρακάτω δίνονται τα διαγράμματα της βροχόπτωσης της περιόδου 2070-2100 του RCAO και των δεδομένων που έχουν καταβιβαστεί.



Διάγραμμα 6. Καταβιβασμένες και απευθείας μηνιαίες τιμές περιόδου 2070-2100

Παρατηρούμε ότι στις απευθείας τιμές του RCAO για την περίοδο 2070-2100 δίνεται συνολική βροχόπτωση 8960 mm, δηλαδή μια μείωση της τάξης του 29% σε σχέση με τις πραγματικές τιμές της περιόδου 1960-1990 και μια μείωση της τάξης του 18% σε σχέση με τις τιμές του RCAO την ίδια περίοδο. Επίσης οι τιμές του RCAO δίνουν συνολική βροχόπτωση 8960 mm και οι καταβιβασμένες που βρέθηκαν μετά από την επεξεργασία 9754 mm, δηλαδή παρουσιάζουν μια αύξηση της τάξης του 9%. Αυτό που είναι ενδιαφέρον είναι ότι στις μελλοντικές τιμές του RCAO αλλά και στις επεξεργασμένες παρατηρείται πολύ έντονη βροχόπτωση κάποιους μήνες που σε συγκεκριμένες περιπτώσεις, μετά την επεξεργασία, αγγίζει το ποσό των 248 mm ανά μήνα (Μάιος 2077). Τέτοια ξεσπάσματα παρουσιάζονται σχεδόν σε κάθε μήνα, πλην όμως των θερινών. Αυτό σημαίνει ότι η βροχόπτωση θα υποστεί μείωση εκείνη την περίοδο, αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις θα έχουμε ακραία φαινόμενα με μεγάλη ποσότητα νερού την οποία φυσικά θα πρέπει να διαχειριστούμε.

2.4 ΥΔΑΤΙΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΚΑΙ ΣΤΑΘΜΗ ΤΗΣ ΛΙΜΝΗΣ ΚΑΡΛΑΣ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΔΟ 2070-2100

Στην παρούσα εργασία γίνεται μια πρώτη εκτίμηση του υδατικού ισοζυγίου της ανασυσταθείσας λίμνης Κάρλας υπό συνθήκες κλιματικής αλλαγής. Για την εύρεση του υδατικού ισοζυγίου χρησιμοποιείται η εξίσωση, (Τσακίρης, 1995)

$$P+RO\pm\Delta SW-D-ET-I=0 \quad (2.1)$$

είναι ο γενικός τύπος του ισοζυγίου σε ένα υδατικό σύστημα. Στο ισοζύγιο ως μεταβλητές εισόδου νερού στην λίμνη επιλέχθηκαν η επιφανειακή απορροή (RO), η παροχή νερού από τον Πηνειό (Q_{Π}) και η άμεση εισροή νερού στον ταμιευτήρα λόγω βροχόπτωσης (Q_B). Όσον αφορά τις μεταβλητές εξόδου νερού από την λίμνη επιλέχθηκαν η άρδευση (I), η διήθηση (D) και η εξάτμιση (E). Ο υπολογιζόμενος όγκος του νερού τη χρονική στιγμή t είναι ο V_i και ο όγκος την προηγούμενη χρονική στιγμή είναι ο V_{i-1} . Η εξίσωση του όγκου του νερού της λίμνης είναι η:

$$V_i=V_{i-1}+ Q_{\Pi} + RO+ Q_B - I- D- E \quad (2.2)$$

Αντίστοιχη εξίσωση υδατικού ισοζυγίου της λίμνης Κάρλας έδωσαν και οι Λουκάς και άλλοι 2005.

Η υφιστάμενη εισροή από τον Πηνειό, η οποία εισέρχεται στην λίμνη είναι περίπου $8 \times 10^6 \text{ m}^3$ νερό τον μήνα, από Οκτώβριο έως και Μάιο. Σύμφωνα με τις προγραμματισμένες εργασίες, η εισροή νερού από τον Πηνειό μπορεί να αγγίξει και τα

$24 \times 10^6 \text{ m}^3$ νερού τον μήνα (Παπανίκος 2008). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η παροχή του Πηνειού ποταμού πρόκειται να μεταβληθεί υπό συνθήκες κλιματικής αλλαγής, αλλά σε αυτή την εργασία, η οποία αποτελεί μια πρώτη προσέγγιση, χρησιμοποιείται η υφιστάμενη εισροή από τον Πηνειό ποταμό και για την μελλοντική περίοδο. Η επίδραση της κλιματικής αλλαγής λαμβάνεται έμμεσα στα σενάρια απόληψης νερού από τον Πηνειό ποταμό, τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω.

Οι απορροές της λεκάνης της Κάρλας σύμφωνα με την μελέτη επανασύστασης της λίμνης υπολογίζονται σε $43 \text{ mm}/\text{έτος}$ με μέσο όρο βροχόπτωσης τα $558 \text{ mm}/\text{έτος}$, οπότε λαμβάνεται ως δεδομένο ότι ο συντελεστής απορροής είναι περίπου 8% (Παπανίκος 2008). Εφόσον η λεκάνη απορροής της λίμνης είναι 1012 km^2 η εξίσωση που μας δίνει τον όγκο του νερού που εισέρχεται στην λίμνη είναι:

$$RO=1012 \times 10^6 \times 0.08 \times P \text{ σε } \text{m}^3 \quad (2.3)$$

Η άμεση εισροή νερού λόγω βροχόπτωσης στην επιφάνεια της λίμνης υπολογίζεται από τον τύπο:

$$Q_B=E \times P \text{ σε } \text{m}^3 \quad (2.4)$$

όπου $E=38 \times 10^6 \text{ m}^2$ η επιφάνεια της λίμνης.

Εφαρμόζοντας την μέθοδο Thornthwaite (Τζιμόπουλος, 1998), για τις μέσες μηνιαίες τιμές θερμοκρασίας της περιόδου 1960-1990 όσο και για τις μέσες μηνιαίες υπολογιζόμενες τιμές της θερμοκρασίας του μοντέλου RCAO την περίοδο 2070-2100, βρέθηκε ότι υπάρχει μια αύξηση της εξάτμισης περίπου 47% . Συνεπώς θεωρείται ότι και οι ανάγκες για άρδευση αλλά και η εξάτμιση από την επιφάνεια της λίμνης θα αυξηθούν ανάλογα.

Οι απαιτήσεις για άρδευση στην περιοχή είναι $13 \times 10^6 \text{ m}^3$ ανά μήνα για τους μήνες Μάιο-Αύγουστο και $7 \times 10^6 \text{ m}^3$ τον Σεπτέμβριο. Με βάση την αύξηση της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας οι απαιτήσεις ανέρχονται σε $19,11 \times 10^6 \text{ m}^3$ ανά μήνα για τους μήνες Μάιο-Αύγουστο και $10,29 \times 10^6 \text{ m}^3$ τον Σεπτέμβριο. Όσον αφορά την διήθηση λαμβάνεται ο μέσος όρος που είναι $1,5 \times 10^6 \text{ m}^3$ ανά μήνα. Η εξάτμιση ανέρχεται σε $7,35 \times 10^6 \text{ m}^3$ ανά μήνα τους μήνες Μάιο έως Σεπτέμβριο και $2,7 \times 10^6 \text{ m}^3$ ανά μήνα τους υπόλοιπους μήνες. Αθροιστικά το ποσό της εξάτμισης όλου του έτους προσεγγίζει τα 1470 mm .

Η εξίσωση που δίνει την μεταβολή της στάθμης της λίμνης σε σχέση με την μεταβολή του όγκου είναι η (Παπανίκος 2008):

$$\Sigma Y(t)=0.0308 \times Y(t)+44.343 \quad (2.5)$$

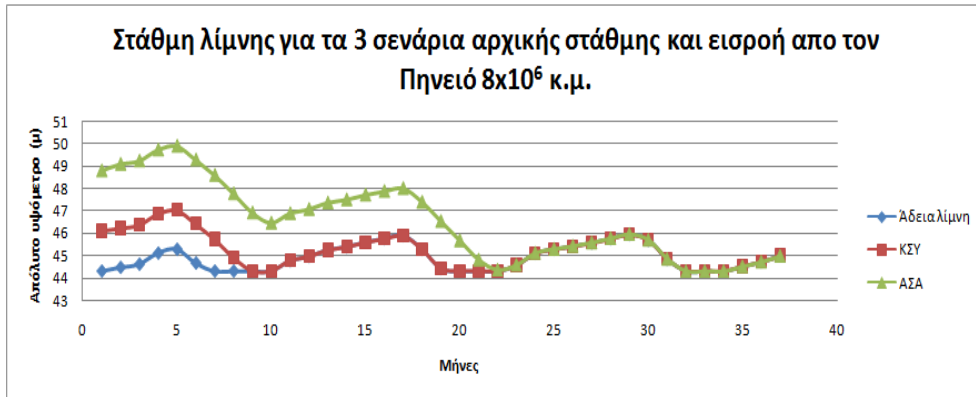
όπου $Y(t)$ ο όγκος της λίμνης μια χρονική στιγμή.

Με βάση την εξίσωση του ισοζυγίου και τις τιμές που προκύπτουν αλλά και με τη χρήση της εξίσωσης 2.5 υπολογίστηκε η στάθμη της λίμνης για την τριετία 2070-2072 κάνοντας χρήση των καταβιβασμένων τιμών βροχόπτωσης. Χρησιμοποιήθηκαν τρία σενάρια αρχικής κατάστασης της λίμνης τα οποία είναι:

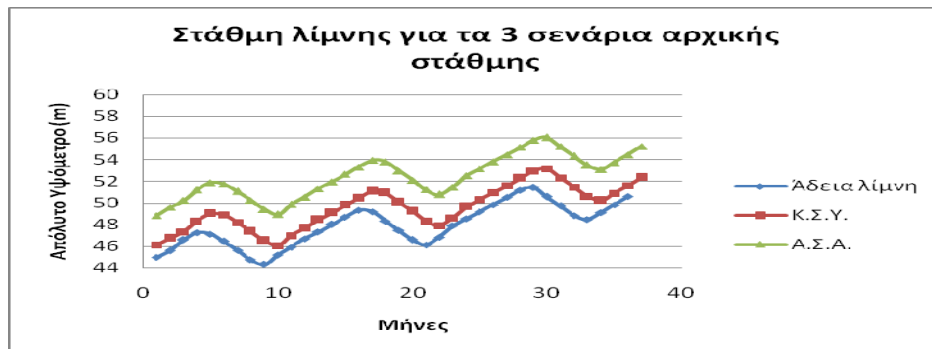
- Απόλυτο υψόμετρο $44,8$ μέτρα (άδεια λίμνη).
- Απόλυτο υψόμετρο $46,4$ μέτρα (Κατώτατη στάθμη ύδατος, Κ.Σ.Υ.).
- Απόλυτο υψόμετρο $48,8$ μέτρα (Ανώτατη στάθμη άρδευσης, Α.Σ.Α.).

Επίσης χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα μελλοντικά σενάρια για την ποσότητα νερού που εισέρχεται από τον Πηνειό στη λίμνη Κάρλα, τα οποία είναι τα εξής:

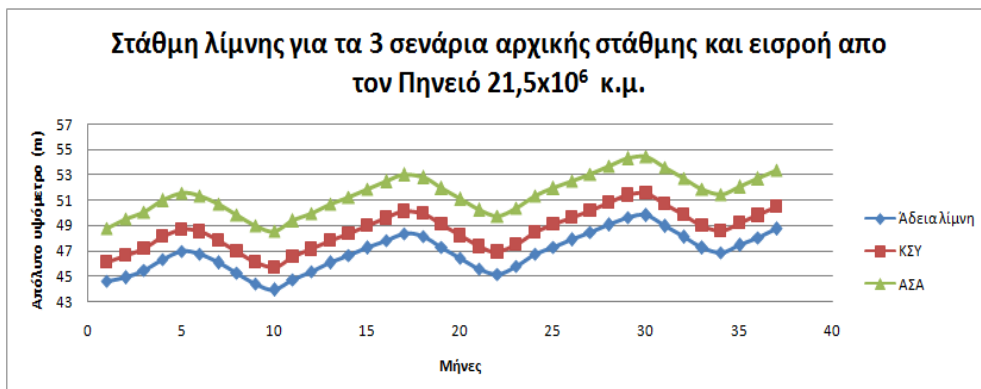
- Η μηνιαία ποσότητα εισροής να είναι η υφιστάμενη, δηλαδή $8 \times 10^6 \text{ m}^3$
- Η μηνιαία ποσότητα εισροής να είναι η μέγιστη δυνατή, δηλαδή $24 \times 10^6 \text{ m}^3$
- Η μηνιαία ποσότητα εισροής να είναι το 90% της μέγιστης, δηλαδή $21,5 \times 10^6 \text{ m}^3$
- Η μηνιαία ποσότητα εισροής να είναι το 50% της μέγιστης, δηλαδή $12 \times 10^6 \text{ m}^3$



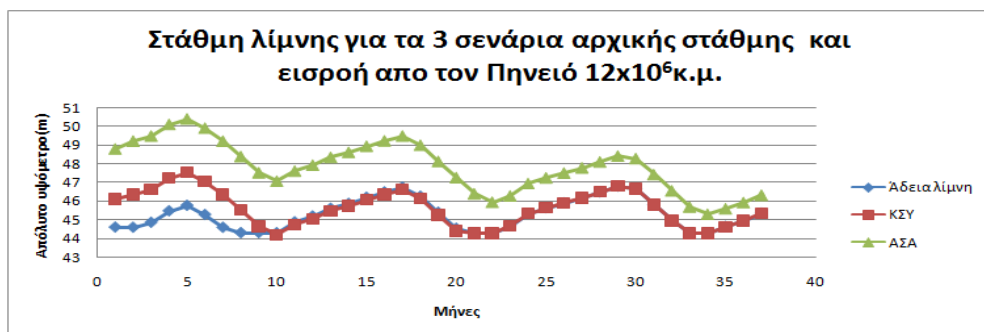
Διάγραμμα 7. Στάθμη της λίμνης τα έτη 2070-2072, με την υφιστάμενη εισροή από τον Πηνειό



Διάγραμμα 8. Στάθμη της λίμνης τα έτη 2070-2072, με μέγιστη εισροή από τον Πηνειό



Διάγραμμα 9. Στάθμη της λίμνης τα έτη 2070-2072, με εισροή από τον Πηνειό ίση με το 90% της μέγιστης δυνατής εισροής ($21,5 \times 10^6 \text{ m}^3$)



Διάγραμμα 10. Στάθμη της λίμνης τα έτη 2070-2072, με εισροή από τον Πηνεϊό ίση με το 50% της μέγιστης δυνατής εισροής ($12 \times 10^6 \text{ m}^3$)

3. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο άρθρο αυτό διερευνάται το υδατικό ισοζύγιο της λίμνης Κάρλας σύμφωνα με τις ενδεχόμενες κλιματικές αλλαγές της περιόδου 2070 – 2100. Αρχικά επιλέχθηκε το καταλληλότερο για την περιοχή μοντέλο RCM μεταξύ των HIRHAM, REMO και RCAO που παρουσιάστηκαν από το ευρωπαϊκό πρόγραμμα PRUDENCE. Από τη σύγκριση των δεδομένων ελέγχου της περιόδου 1960-1990 και με εφαρμογή τεσσάρων στατιστικών κριτηρίων (EF, CD, RRMSE και MAE) προέκυψε ότι το μοντέλο RCAO υπερτερεί έναντι των REMO και HIRHAM. Αξιοσημείωτο είναι το ότι στη χρονοσειρά της βροχόπτωσης του RCAO και του μετεωρολογικού σταθμού έχουμε πολύ καλή ανταπόκριση των τοπικών ελαχίστων και μεγίστων των καμπύλων που σε πολλές περιπτώσεις ταυτίζονται. Επίσης η συνολική βροχόπτωση της 30ετίας για τα διάφορα μοντέλα είναι 6.353mm για το HIRHAM, 16.321mm για το REMO και 10.908 mm για το RCAO όταν η πραγματική βροχόπτωση της 30ετίας είναι 12.575 mm. Τα αντίστοιχα ποσοστά απόκλισης είναι -50% για το HIRHAM, +30% για το REMO και -13% για το RCAO. Όσον αφορά τις μηνιαίες τιμές του RCAO φαίνεται η «τάση» να υπολογίζει πολύ χαμηλές ή μηδενικές τιμές βροχόπτωσης τους μήνες Ιούνιο-Ιούλιο-Αύγουστο με σπάνια περιστατικά βροχόπτωσης με τιμές που αγγίζουν περίπου τα 24 mm. Αντιθέτως οι πραγματικές τιμές δεν είναι τόσο χαμηλές καθώς παρουσιάζονται και σπάνια περιστατικά βροχόπτωσης έως και 131 mm (Ιούλιος 1972). Στο ίδιο συμπέρασμα καταλήγουμε και με τη διερεύνηση των μηνιαίων μέσων όρων όπου οι τιμές του μοντέλου υποεκτιμούν τους καλοκαιρινούς μήνες και υπερεκτιμούν τους χειμερινούς. Τους ανοιξιάτικους και φθινοπωρινούς μήνες οι τιμές του μοντέλου και των δεδομένων είναι αρκετά κοντά.

Με βάση τις παραπάνω παρατηρήσεις πραγματοποιήθηκε διερεύνηση συσχετίσεων των τιμών του RCAO με τα πραγματικά δεδομένα για κάθε μήνα ξεχωριστά με τη χρήση της διπλής αθροιστικής καμπύλης. Από τις καμπύλες της διπλής αθροιστικής εξήχθησαν οι εξισώσεις των γραμμών τάσης οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν ως εξισώσεις συσχέτισης των πραγματικών τιμών με αυτές του RCAO. Για όλους τους μήνες οι συντελεστές προσδιορισμού (R^2) είναι μεταξύ 0,93 και 0,991 εκτός από τον μήνα Ιούλιο στον οποίο $R^2=0,695$. Στη συνέχεια βρέθηκαν οι νέες τιμές που προκύπτουν με τη χρήση των εξισώσεων. Αν συγκρίνουμε τις τιμές του RCAO με αυτές που προκύπτουν μετά τον καταβιβασμό για την περίοδο 1960-1990 παρατηρούμε ότι οι νέες τιμές είναι μεγαλύτερες τους χειμερινούς μήνες, μικρότερες τους θερινούς και σχετικά αμετάβλητες τους υπόλοιπους μήνες.

Στη συνέχεια καταβιβάστηκαν οι μελλοντικές τιμές βροχόπτωσης του RCAO χρησιμοποιώντας τις προηγούμενες εξισώσεις. Συγκρίνοντας τις νέες τιμές με τις τιμές του μοντέλου παρατηρούμε ότι η γενική τάση είναι μια ελαφρά μείωση του ύψους βροχής τους μήνες Ιανουάριο, Μάιο και Νοέμβριο και αύξηση όλους τους υπόλοιπους. Τόσο στις νέες τιμές αλλά και στις αρχικές, το καλοκαίρι η βροχόπτωση είναι πολύ χαμηλή και ορισμένες χρονιές μηδενική κατά την διάρκεια του καλοκαιριού. Αυτό έχει σαν συνέπεια, την αισθητή πτώση της στάθμης της λίμνης στο τέλος της περιόδου άρδευσης. Επίσης σημαντική είναι η εμφάνιση των διαφόρων ακραίων φαινομένων που προβλέπονται, ιδιαίτως τους χειμερινούς-εαρινούς μήνες με μεγάλα ύψη βροχής. Αυτό σημαίνει ότι λόγω της ιδιαίτερης έλλειψης νερού εκείνης της περιόδου, πρέπει να βρεθούν τρόποι αποθήκευσης του. Όσον αφορά τη συνολική βροχόπτωση της 30ετίας οι αρχικές τιμές του RCAO είναι 8.959 mm και οι διορθωμένες 9.754 mm δηλαδή μια αύξηση του 8,5%.

Χρησιμοποιώντας τις καταβιβασμένες τιμές βροχόπτωσης υπολογίστηκαν οι μηνιαίες τιμές της απορροής και της άμεσης εισροής νερού. Ως ένα μέσο ποσοστό απορροής ελήφθη το 8% όπως προτείνεται από την μελέτη επανασύστασης της λίμνης ενώ αυτό το ποσοστό αυξάνεται ή μειώνεται κυρίως ανάλογα με το ύψος της βροχής. Πάντως η μεταβολή του ποσοστού δεν παίζει σημαντικό ρόλο στο υδατικό ισοζύγιο καθώς οι διαφορές στην απορροή είναι σχετικά μικρές σε σχέση με την εισροή νερού από τον Πηνεϊό ή την εκροή νερού για άρδευση. Λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές των εισροών νερού στην λίμνη καθώς και τις τιμές της άρδευσης και της εξάτμισης βρέθηκε η στάθμη της λίμνης για τρεις αρχικές στάθμες και για διάφορες τιμές εισροών από τον Πηνεϊό. Επίσης βρέθηκε η αύξηση κατά 47% της εξατμισοδιαπνοής εκείνης της περιόδου με την μέθοδο Thornthwaite.

Στο σενάριο 1 παρατηρείται ότι με τις μελλοντικές ανάγκες για άρδευση και τις αυξανόμενες τιμές της εξάτμισης και την υφιστάμενη εισροή νερού στη λίμνη από τον Πηνεϊό, υπάρχει σοβαρό πρόβλημα στην ομαλή λειτουργία της λίμνης και στο οικοσύστημά της ανεξαρτήτως της αρχικής της στάθμης.

Στο σενάριο 2, αφού έχουμε την μέγιστη εισροή από τον Πηνεϊό, η λίμνη βρίσκεται συνέχεια στην ανώτατη στάθμη και η περίσσεια νερού που προκύπτει μπορεί να χρησιμοποιηθεί για άλλους σκοπούς.

Στο σενάριο 3, η στάθμη και η λειτουργία της λίμνης είναι κανονική. Στα σενάρια της Α.Σ.Α. και της Κ.Σ.Υ. που είναι και τα πιο ρεαλιστικά για εκείνη την περίοδο, η στάθμη είναι ικανοποιητική και επίσης έχουμε περίσσεια νερού.

Στο σενάριο 4, παρατηρούμε μια πτωτική τάση της στάθμης με την πάροδο του χρόνου ώσπου να καταλήξει στην κατώτατη στάθμη. Αυτό σημαίνει ότι δεν επαρκεί το ποσό του νερού από τον Πηνεϊό και αν λάβουμε υπόψη το γεγονός ότι υπάρχει ανώτατο όριο στάθμης στη λίμνη, πρέπει οπωσδήποτε να γίνουν έργα αποθήκευσης του νερού από τον Πηνεϊό κατά τους χειμερινούς μήνες όταν η στάθμη έχει φτάσει το ανώτατο στάδιο και να χρησιμοποιηθεί τους μήνες άρδευσης.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Christensen J., Christensen O., Lopez P. 1996. *The HIRHAM4, Regional atmospheric climate model*, DMI, Copenhagen, Denmark.
- Doscher R., Willen U., Jones C. 2002. *The development of the regional coupled ocean-atmosphere model RCAO*, Rossby Centre, Sweden.

- Feyen, L., R. Vazquez, K. Christianes, O. Sels and J. Feyen. 2000. *Application of a distributed physically-based hydrological model to a medium size catchment*. Hydrology & Earth System Sciences, 4(1): p.47-63.
- Jacob D., Podzun R. 1996. *Sensitivity studies with the regional climate model REMO*. Max Plank Insistute for meteorology, Hamburg, Germany.
- Javier G. Corripio 2000. *An open source IDL script to transform Geographical longitude and latitude to coordinates of rotated grids for visualization and data extraction of Climatic Model outputs using GRADS or FERRET* , DMI, Denmark
- Legates, D.R. and G.J. McCabe. 1999. *Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimate model validation*. Water Resources Research 35(1): 233-241
- Loukas,A., G. Patsonas and L. Vasiliades. 2009. *Evaluation of the future operation of the restored lake Karla reservoir under climate change*. 7th International conference of EWRA “ Water resources Conservancy and risk reduction under climatic instability”, Limassol, Cyprus, 25-27 June 2009, pp.627-634.
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V. 1970. *Riverflow forecasting through conceptual models. Part 1: a discussion of principles*. Journal of Hydrology, 10: 282-290.
- Vazquez R.F., L. Feyen, J. Feyen and J.C Refsgaard. 2002. *Effect of grid size on effective parameters and model performance of the MIKE-SHE code*. Hydrological Processes.16:355-372
- Λουκάς, Α., Ν. Μυλόπουλος, Γ.Μυλόπουλος και Ε. Μουστάκα, 2005. Προσομοίωση και αποτίμηση της λειτουργίας του ταμιευτήρα της Κάρλας. 5ο Εθνικό Συνέδριο της ΕΕΔΥΠ “Ολοκληρωμένη διαχείριση Υδατικών Πόρων με βάση τη λεκάνη απορροής”, Ξάνθη,6-9 Απριλίου 2005, σελ. 267-274.
- Μιμίκου, Μαρία 1994. *Τεχνολογία υδατικών πόρων*. Παπασωτηρίου, Αθήνα, 564 σελ.
- Παπανίκος, Ν. 2008. *Ολοκληρωμένη διαχείριση των υδατικών πόρων στην υπο επανασύσταση λίμνη Κάρλα Θεσσαλίας*, Μεταπτυχιακή διατριβή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 285 σελ.
- Πατσώνας, Γ., Α. Λουκάς και Λ. Βασιλειάδης. 2009. *Στοχαστική προσομοίωση και αποτίμηση της λειτουργίας του ταμιευτήρα της λίμνης Κάρλας*. Κοινό Συνέδριο ΕΥΕ-ΕΕΔΥΠ. “Ολοκληρωμένη διαχείριση υδατικών πόρων σε συνθήκες κλιματικών αλλαγών”, Βόλος, 27-30 Μαΐου 2009, σελ. 51-58.
- Τζιμόπουλος, Χ. .1998. *Γεωργική υδραυλική*. Τόμος 1, Εκδόσεις: Υπηρεσία δημοσιευμάτων ΑΠΘ, σελ .33-35.
- Τράπεζας της Ελλάδος. 2011. *Επιτροπή Μελέτης Επιπτώσεων κλιματικής αλλαγής. Σενάρια ανθρωπογενούς Παρέμβασης στην Κλιματική Αλλαγή και τα Προγράμματα Prudence και Ensembles*, Αθήνα, σελ, 1-11.
- Τσακίρης, Γ. 1995. *Υδατικοί πόροι: Τεχνική υδρολογία*, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα, 675 σελ.

**Ο ΡΟΛΟΣ ΤΗΣ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑΣ ΣΤΗΝ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ
ΑΡΔΕΥΣΗΣ: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ “ENORASIS”**

Ανδρέας Καζαντζίδης*, Ιωάννης Κιουτσιούκης, Αθανάσιος Αργυρίου

Εργαστήριο Φυσικής της Ατμόσφαιρας, Τμήμα Φυσικής
Πανεπιστήμιο Πατρών, 26500, ΠΑΤΡΑ, *akaza@upatras.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διαχείριση της άρδευσης αφορά τον χρονικό ορίζοντα και την ποσότητα νερού που πρέπει να χρησιμοποιηθεί σε περιοχές όπου η βροχόπτωση δε είναι επαρκής για την ανάπτυξη των καλλιεργειών. Το πρόβλημα της σωστής διαχείρισης αποτελεί πρόκληση, αφού οι αγρότες προσπαθούν να μειώσουν το κόστος της άρδευσης ενώ παράλληλα να κρατήσουν στα απαραίτητα επίπεδα την υγρασία του εδάφους. Συμπληρωματικά, η αβεβαιότητα των μετεωρολογικών προγνώσεων και των προβλεπόμενων κλιματικών αλλαγών, καθιστά τη λύση του προβλήματος ακόμη πιο δύσκολη. Στα πλαίσια του ευρωπαϊκού προγράμματος ENORASIS (www.enorasis.eu) αναπτύσσεται ένα σύνολο νέων τεχνολογιών, μεθόδων και μοντέλων στον τομέα της πρόγνωσης του καιρού με την συνεργιστική χρήση δορυφορικών δεδομένων.

**THE ROLE OF METEOROLOGY IN THE ENVIRONMENTAL
OPTIMIZATION OF IRRIGATION MANAGEMENT IN THE
FRAME OF “ENORASIS” PROJECT**

Andreas Kazantzidis*, Ioannis Kioutsioukis, Athanasios A. Argiriou

Laboratory of Atmospheric Physics, Physics Department
University of Patras, 26500, Patras, Greece, *akaza@upatras.gr

ABSTRACT

Irrigation scheduling pertains to the timing and amount of irrigation applied to regions with insufficient rainfall for adequate crop growth. The scheduling problem can be challenging, as farmers try to minimize irrigation costs while maintaining adequate moisture in the soil to avoid crop yield reduction. This is further complicated with the use of uncertain weather forecasts and climate predictions to guide farmers with decision making. ENORASIS (ENvironmental Optimization of IRrigation Management with the combined uSe and Integration of High PrecisIon Satellite Data, Advanced Modelling, Process Control and Business Innovation, www.enorasis.eu) project develops and integrate a bouquet of advanced technologies, methodologies and models in the field of weather prediction systems that exploit satellite observations.

1. INTRODUCTION

For irrigation scheduling, both the forecast quality and the length of forecast time horizon matter. Several past studies have incorporated short-term forecasts (Allen and Lambert 1971; Rochester and Busch 1972; Swaney et al. 1983; Rogers and Elliot 1989; Wilks and Wolfe 1998; Gowinga and Ejieji 2001) and long-term predictions (Venäläinen et al. 2005; Ingram et al. 2002) to assess their contributions for enhancing irrigation profits.

Agriculture consumes the largest amount of water globally, accounting for the 70% of the total consumption, while in most European countries the respective figures range between 30% and 60%. Worldwide, more than 40% of food required for nutrition is provided from irrigated areas. Irrigation is broadly recognized as a significant environmental challenge, especially in South European countries. It is addressed in the EU Common Agricultural Policy (CAP), which puts the environment among the top priorities of farming policy. By linking subsidies with strict environmental standards in the so-called Cross Compliance Scheme (CCS), farmers face cuts in their subsidy levels unless they meet these requirements. In addition, the combined application of the Water Framework Directive (WFD) along with the CCS of CAP brings in dramatic changes in irrigation practices, as they aim at the rationalization of water consumption. The foreseen solution is based upon the principle that “the user pays” while inefficient or inappropriate use of water is penalized with subsidy cuts.

In this context, ENORASIS perceives the resolution of this short-term “conflict” as a challenge for environmental optimization of irrigation management systems and relevant agricultural practices in line with the EU legislation and the needs and incentives of the involved stakeholders. This challenge can be addressed by integrating meteorological forecasts and satellite data for high quality into coherent business and operational models that incorporate personalized value-added services while empowering all stakeholders with decision making rights.

2. PROJECT CONCEPT

In the light of the real need to practically improve the environmental performance of irrigation systems and prevent the misuse of water, the overall aim of ENORASIS is to develop an intelligent, integrated Decision Support System (ENORASIS Service Platform and Components) for environmentally optimized and thus, sustainable irrigation management by farmers and water management organizations. ENORASIS system will actually target to motivate irrigation farmers to optimize the use of water, whereas it will also provide to (irrigation) water management organizations intelligent tools and services to effectively forecast and manage irrigation water resources, cover irrigation demand and charge customers (farmers) on the basis of an intelligent system of motives and incentives that exploits irrigation demand side fluctuations.

To achieve so, ENORASIS will develop and integrate a bouquet of advanced technologies, methodologies and models in the fields of: (i) weather prediction systems that exploit satellite observations and advanced hydrology models; (ii) irrigation optimization techniques and (iii) smart card irrigation systems in order to arrive at a solution that will be easy to use for farmers and that will be flexible and robust enough for its use by irrigation water management organizations; and (iv) wireless sensor networks (functioning with solar energy) as key enabling technology for field measurements and monitoring conditions. Such an intelligent irrigation management

and charging system is expected to have a major impact towards the adoption of more sustainable irrigation water management practices in agriculture and thus, increased environmental protection and costs savings for all stakeholders involved in agricultural economy. Overall, ENORASIS is expected not only to integrate but also to significantly push forward all above-mentioned technologies/methodologies/approaches by offering to the two core target groups of the proposed solution a broad range of value added services, summarized in figure 1.

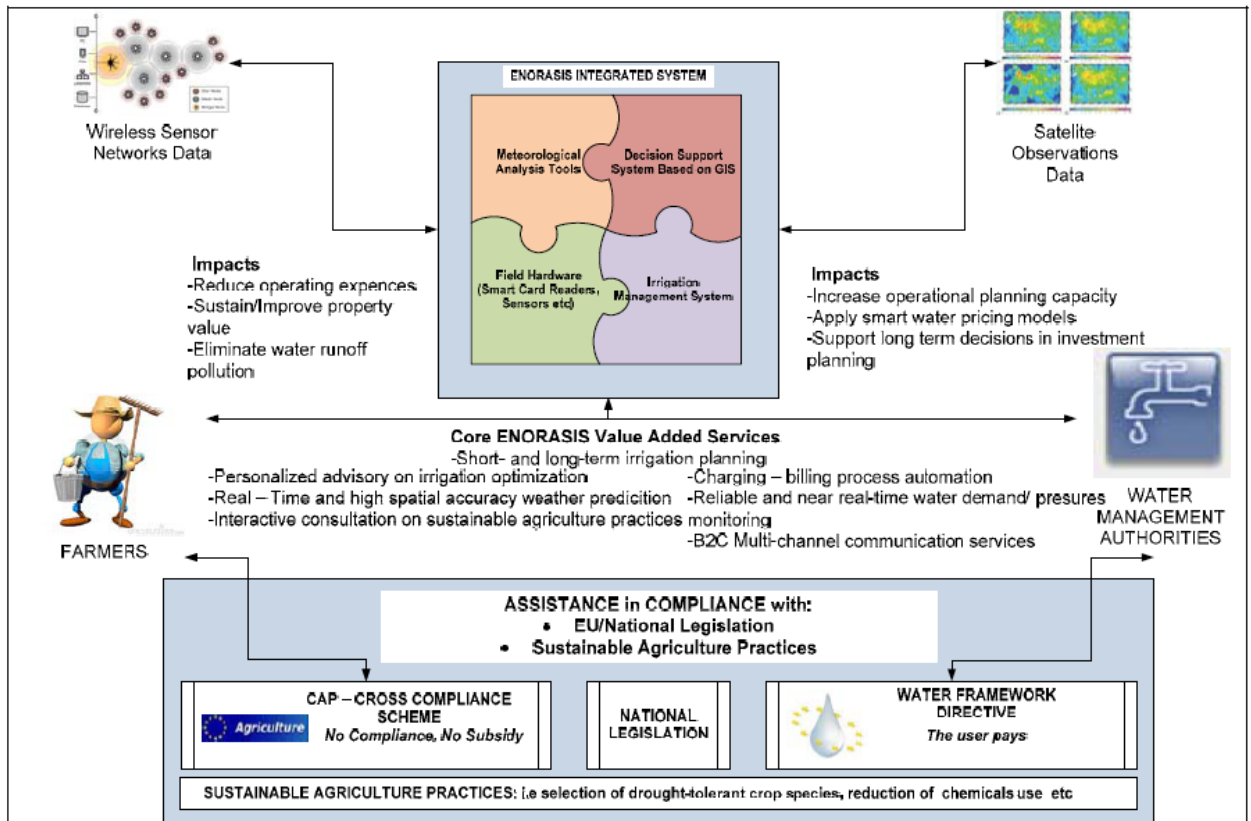


Figure 1: ENORASIS concept and value added services

Respectively, the ENORASIS key enabling technologies as well as data flows and interactions between the various components and actors are illustrated in figure 2. ENORASIS will gather data both from satellite observations and field equipment (wireless sensor networks) and exploit next-generation mesoscale numerical weather prediction models and basinscale, continuous-time hydrological models to provide high spatial accuracy estimations for irrigation water needs, by taking into account information on specific crops and other factors affecting the irrigation process. The Irrigation Management System will transform these estimations in optimal irrigation rules (using FAO56 model) that will be communicated to farmers via multiple channels, both in the field (smart card system) and through ICT (web, mobile). Accordingly, farmers will use this real-time information to schedule irrigation activities in interaction with other cultivation tasks that might be affected by irrigation and monitor water consumption both in terms of quantity and cost. Water Management Authorities will use water consumption monitoring data to estimate short and long term pressures on water reservoirs, set water prices as drivers for sustainable irrigation, charge users

automatically and apply pricing schemes that incorporate the real costs of water (in accordance with WFD).

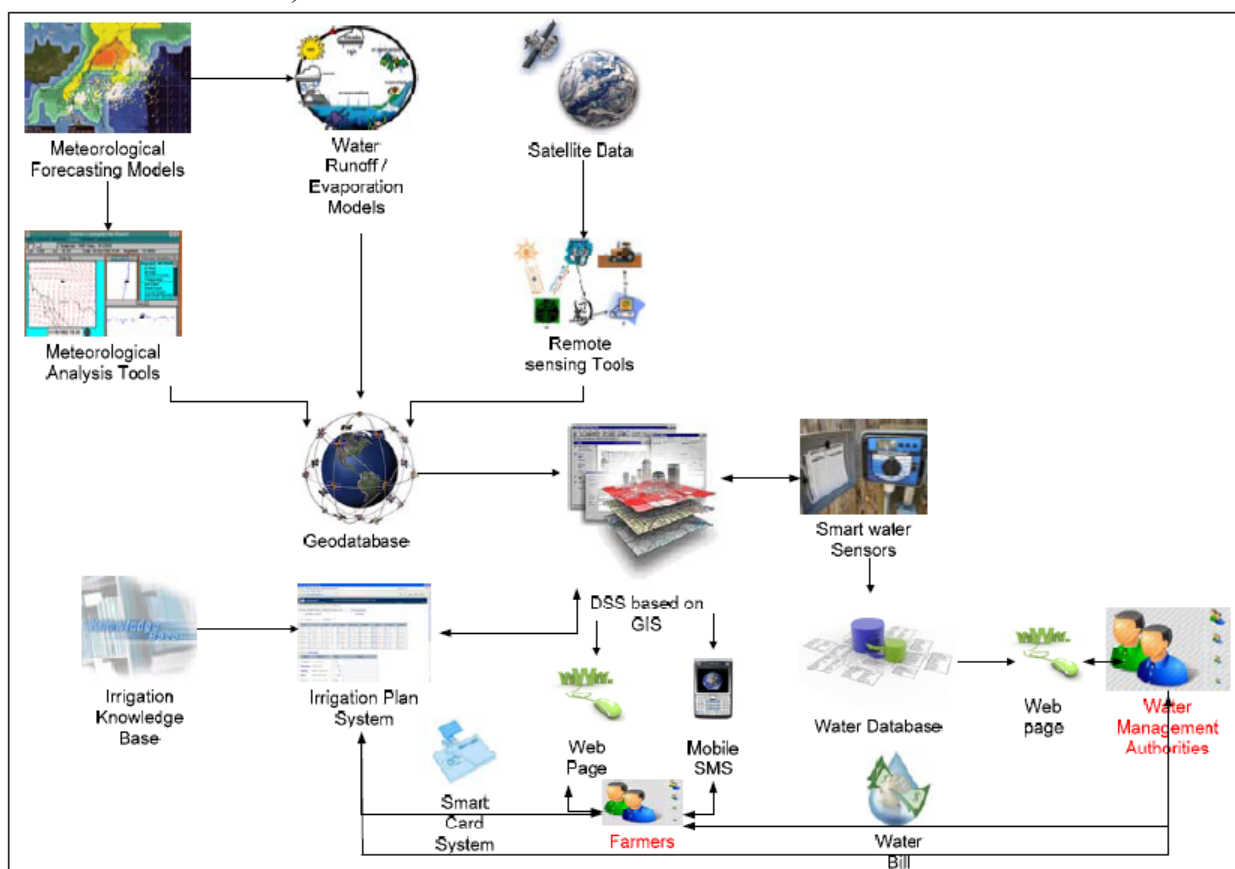


Figure 2: ENORASIS key enabling technologies, data flows and interactions between components and key actors (farmers, water management organizations)

3. THE ROLE OF METEOROLOGY

Numerical weather prediction (NWP) models are comprehensive representations of the state of the atmosphere. Such models, based on possibly tens of millions of degrees of freedom, are used routinely to make forecasts of weather on daily timescales (Holton 1992).

From the perspective of scientific determinism, an accurate forecast of the weather can be made given sufficient knowledge of the atmospheric initial conditions and sufficient means of integrating the known equations of motion. The numerical integration of the atmospheric equations of motion raises the need to represent the physical processes that are not explicitly resolved in the discretization grid. Hence, weather predictions are uncertain, not only because of uncertainty in the forecast initial conditions but also because of inaccuracies (approximate simulations of atmospheric processes) in the model (e.g. subgrid parameterizations). These two sources of uncertainties (initial conditions, model) limit the skill of single, deterministic forecasts in an unpredictable way, with days of high/poor quality forecasts randomly followed by days of high/poor quality forecasts (Lorenz, 1993).

Because of the underlying nonlinearity of the equations of motion, the growth of inevitable uncertainties in forecast initial conditions is flow dependent. To estimate such

flow-dependent predictability, it is now commonplace to run ensembles of weather models from a set of initial conditions, each element of which is consistent with the initial. Ensemble prediction is a feasible method to integrate a single, deterministic forecast with an estimate of the probability distribution function of forecast states. In particular, ensemble can provide forecasters with an objective way to predict the skill of single deterministic forecasts, or, in other words, to forecast the forecast skill. Representations of model uncertainty must also be included in ensemble prediction systems so that ensemble-based forecast probability distributions are not underdispersive or over-confident (Buiza, 2003).

To address the need for uncertainty – quantified rainfall forecasts for water management purposes within the ENORASIS project, high-resolution rainfall forecasts will be adopted in a probabilistic manner using the state-of-the-art NWP model WRF (figure 3). The Weather Research and Forecasting (WRF) Model is a next-generation mesoscale forecast model and data-assimilation system designed to serve both operational forecasting and atmospheric research needs. The effort to develop WRF has been a collaborative partnership among many government agencies and universities, including the National Center for Atmospheric Research (NCAR), the National Center for Environmental Prediction (NCEP) and the Forecast Systems Laboratory (FSL). The WRF model is state-of-the-art, transportable and efficient in a massively parallel computing environment. It offers numerous physics options, thus tapping into the experience of the broad modeling community.

Advanced data assimilation systems are being developed and tested in tandem with the model. The WRF model is well suited for a wide range of applications, from idealized research simulations to operational forecasting, and has the flexibility to accommodate future enhancements. Although the model is designed to improve forecast accuracy across scales ranging from cloud to synoptic (i.e. from meters to thousands of kilometres), the priority emphasis on horizontal grid resolutions of 1-10 kilometers makes WRF particularly well suited for newly emerging Numerical Weather Prediction (NWP) applications in the non-hydrostatic regime (<http://wrf-model.org/index.php>).

Published work on precipitation forecast skill using WRF has demonstrated that simulations using convection-allowing resolution (CAR; $dx < 4$ km) have a better representation of the spatial and temporal statistical properties of convective precipitation than coarser models using convective parameterizations. In addition, higher resolution should lead to greater ensemble spread as smaller scales of motion are resolved. Thus, CAR ensembles should provide more accurate and reliable probabilistic forecasts than parameterized-convection resolution (PCR) ensembles. Limited published results imply that the skill gained by increasing to CAR outweighs the skill lost by decreasing the ensemble size (to compensate the computational expense). Thus, when computational capabilities become available, it is highly desirable to increase the ensemble resolution from PCR to CAR, even if the size of the ensemble has to be reduced (Clark & Gallus, 2009). Furthermore, for short-range prediction, it is extremely important to have accurate initial conditions for better model performance. Evidence gained from published results indicate that there is a clear improvement in the quantitative measures of the rainfall skill scores (lower bias, lower false alarms, higher probability of detection) for the model runs which have assimilated satellite observations. Large improvement in documented WRF rainfall prediction is due to the assimilation of spectral sensor microwave imager wind speed and total precipitable

water. A list of candidate satellite products for rainfall forecasting is given in the appendix (Randir & Joshi, 2010 and Xu et al, 2009).

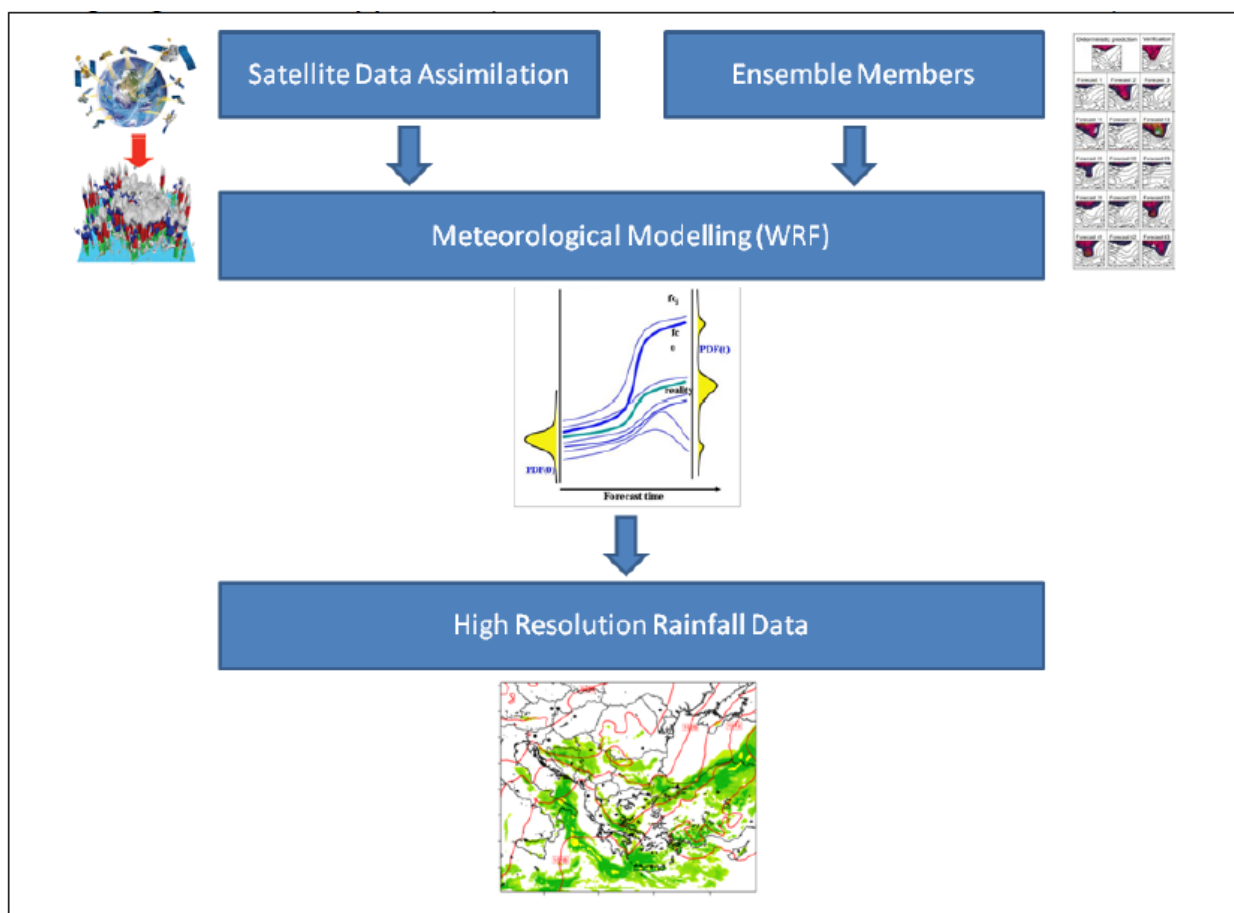


Figure 3: The Weather Research and Forecasting (WRF) Model

4. CONCLUSIONS

In existing implemented systems, information on weather is delivered by weather stations and predictions are based on historical data rather than prediction models using satellite images.

In the frame of ENORASIS, a WRF ensemble data assimilation system is being developed to bring together information from satellite precipitation data, data assimilation techniques, ensemble forecasting and cloud-resolving models to dynamically downscale precipitation data. The proposed process is considered highly valuable as it will transfer the quantitative information about the uncertainty of the rainfall forecast to the hydrological model and, thus, to the irrigation management system.

The use of Weather Research & Forecasting (WRF) prediction model is a step beyond the state of the art in irrigation management. This approach is expected to deliver value-for-money weather forecasting, enhancing ENORASIS services affordability.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work has been supported by FP7-ENV project ENORASIS (www.enorasis.eu, Grant Agreement 282949). The contribution of all ENORASIS partners is highly acknowledged.

REFERENCES

- Allen, W. H., and Lambert, J. R., 1971. *Application of calculated risk to scheduling of supplemental irrigation. I. Concepts*. Agric. Meteorol., 8, 193–201.
- Buizza R., 2003. *Weather Prediction: Ensemble Prediction*. In: Encyclopaedia of Atmospheric Sciences, edited by Jim Holton, John Pyle and Judy Curry, Academic Press, London.
- Clark A.J. and Gallus W.A., 2009. *A Comparison of Precipitation Forecast Skill between Small Convection-Allowing and Large Convection-Parameterizing Ensembles*. Weather and Forecasting, 24: 1121-1140.
- Holton JR., 1992. *An Introduction to Dynamic Meteorology*. Academic Press Inc., 511pp.
- Gowing, J. W., and Ejieji, C. J., 2001. *Real-time scheduling of supplemental irrigation for potatoes using a decision model and short-term weather forecasts*” Agric. Water Manage., 47(2), 137–153.
- Ingram, K. T., Roncoli, M. C., and Kirshen, P. H., 2002. *Opportunities and constraints for farmers of West Africa to use seasonal precipitation forecasts with Burkina Faso as a case study*. Agric. Syst., 74(3), 331–349.
- Lorenz E.N., 1993. *The essence of Chaos*. University College London (UCL) Press. 227 pp.
- Randhir S and Joshi P., 2010. *Intercomparison of the performance of MM5/WRF with and without satellite data assimilation in short-range forecast applications over the Indian region*. Meteorology and Atmospheric Physics, 105: 133-155.
- Rochester, E.W., and Busch, C. D., 1972. *An irrigation scheduling model which incorporates rainfall predictions*. Water Resour. Bull., 8(3), 608–613.
- Rogers, D. H., and Elliot, R. L., 1989. *Irrigation scheduling using crop growth simulation, risk analysis and weather forecasts*. Trans. Am. Soc. Agric. Eng., 32, 1669–1677.
- Swaney, D. P., Mishoe, J. W., Jones, J. W., and Boggess, W. G., 1983. *Using crop models for management: Impact of weather characteristics on irrigation decisions on soybeans*. Trans. Am. Soc. Agric. Eng., 26, 1808–1813.
- Venäläinen, A., Salo, T., and Fortelius, C., 2005. *The use of numerical weather forecast model predictions as a source of data for irrigation modelling*. Meteorol. Appl., 12(4), 307–318.
- Wilks, D. S., and Wolfe, D.W. (1998). “Optimal use and economic value of weather forecasts for lettuce irrigation in a humid climate.” Agric. For. Meteorol., 89(2), 115–129.

Weather Research and Forecasting (WRF) Model. About the Weather Research & Forecasting Model. <http://wrf-model.org/index.php>, last access: 19 April 2011.

Xu, J., Rugg S., Byerle L., Liu Z., 2009. *Weather Forecasts by the WRF-ARW Model with the GSI Data Assimilation System in the Complex Terrain Areas of Southwest Asia*. *Weather and Forecasting*, 24, 987–1008.

**ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ
ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΕΩΝ ΣΕ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΕΣ
ΛΕΚΑΝΕΣ ΜΕ ΕΝΑΝ ΒΡΟΧΟΜΕΤΡΙΚΟ ΣΤΑΘΜΟ ΚΑΙ ΧΡΗΣΗ
ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΑΠΟΡΡΟΗΣ**

Ανδρέας Λαγγούσης, Βασίλειος Καλέρης

Εργαστήριο Υδραυλικής Μηχανικής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών
Πανεπιστήμιο Πατρών, 26500, ΠΑΤΡΑ, *andlag@gmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αναπτύσσουμε μία στατιστική μεθοδολογία για την εκτίμηση επιφανειακών βροχοπτώσεων σε λεκάνες απορροής με έναν βροχομετρικό σταθμό (μία αρκετά συχνή περίπτωση για πολλές υδρολογικές λεκάνες στον Ελληνικό χώρο), με ταυτόχρονη αναπαραγωγή τόσο των περιθωρίων όσο και των από κοινού στατιστικών τους χαρακτηριστικών. Τα τελευταία εκτιμώνται βάσει των στατιστικών χαρακτηριστικών της σημειακής βροχοπτώσεως, με χρήση της θεωρίας πολυκλασματικής ομοιοθεσίας (multifractal theory). Η προτεινόμενη μεθοδολογία δύναται α) να διακρίνει ασυμφωνίες μεταξύ των ημερήσιων τιμών βροχόπτωσης και απορροής, και β) να ανάγει τις μετρημένες σημειακές βροχοπτώσεις σε επιφανειακές, ώστε οι τελευταίες να ανταποκρίνονται κατά το δυνατόν περισσότερο στις ημερήσιες μεταβολές της μετρημένης απορροής. Κατά την εφαρμογή του μοντέλου σε χρονοσειρές ημερήσιων βροχοπτώσεων και απορροών μήκους 18 ετών, αποδεικνύεται ότι η αναπτυχθείσα μεθοδολογία δύναται να απομονώσει και να διορθώσει ασυμβατότητες μεταξύ των χρονοσειρών βροχής και απορροής, χωρίς να αλλοιώνει την εποχικότητα και την ιδιότητα των υγρών και ξηρών ημερών να εμφανίζονται κατά ομάδες (clustering).

**A STATISTICAL APPROACH TO ESTIMATE SPATIAL
RAINFALL AVERAGES USING POINT RAINFALL
MEASUREMENTS FROM A SINGLE LOCATION AND RUNOFF
DATA**

Andreas Langousis*, Vassilios Kaleris

Hydraulic Engineering Laboratory, Department of Civil Engineering
University of Patras, 26500, Patras, Greece, *andlag@gmail.com

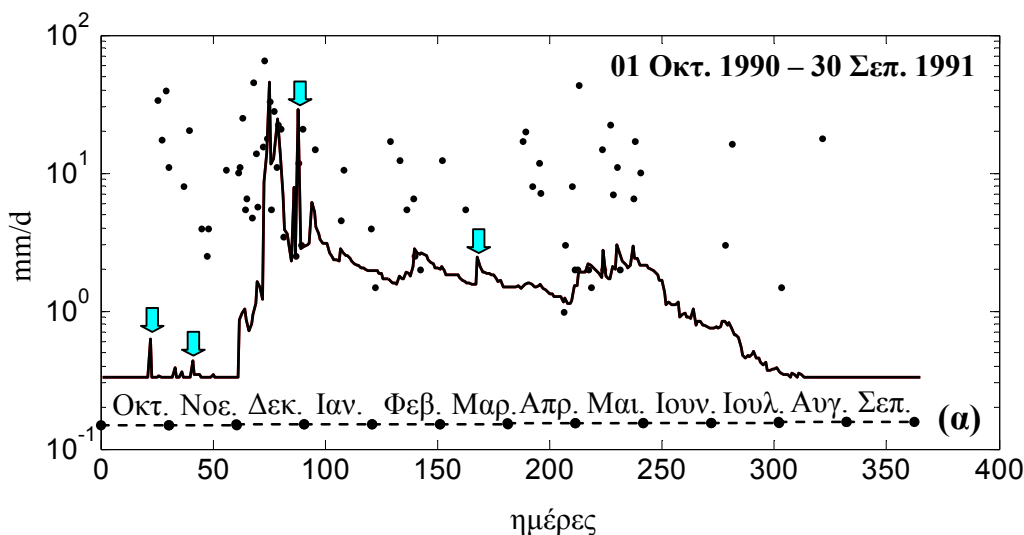
ABSTRACT

We focus on catchments covered by a single rain gauge (i.e. a frequent case for many catchments in Greece), and develop a statistical approach to adjust point rainfall measurements to better resemble the statistical structure of spatial rainfall averages. To do so we use concepts from multifractal theory, and develop statistical tools that a) identify incompatibilities between daily rainfall measurements and river discharges, and b) adjust rainfall measurements to better resemble the observed changes of daily river runoff. In an application study to a 18-year record of daily rainfalls and river discharges, we find that the suggested statistical approach efficiently identifies and resolves rainfall-runoff incompatibilities at daily level, while respecting the seasonal character and the clustered nature of rainfall.

1. ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΑΝΑΠΤΥΧΘΕΝΤΟΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Σε αρκετές υδρολογικές εφαρμογές (βαθμονόμηση υδρολογικών μοντέλων, προσομοίωση απορροών, εκτίμηση πλημμυρικών όγκων κ.λ.π.) απαιτείται ο κατά το δυνατόν ακριβέστερος προσδιορισμός της μέσης επιφανειακής βροχοπτώσεως στην λεκάνη απορροής. Όταν υπάρχει ένα σχετικά πυκνό δίκτυο βροχομετρικών σταθμών εντός της λεκάνης, απλές μέθοδοι επιφανειακής ολοκλήρωσης σημειακών βροχοπτώσεων όπως τα πολύγωνα Thiessen (Thiessen, 1911, και πιο πρόσφατα, Eagleson, 1970, και Chow *et al.*, 1988) και η μέθοδος Kriging (Kriging, 1951, και πιο πρόσφατα, Journel and Huijbregts, 1978, Banerjee *et al.*, 2004, Press *et al.*, 2007, και Koutsoyiannis and Langousis, 2011) μπορούν να χρησιμοποιηθούν επιτυχώς για τον προσδιορισμό της μέσης επιφανειακής βροχοπτώσεως.

Στην περίπτωση λεκανών απορροής με έναν βροχομετρικό σταθμό (μία αρκετά συχνή περίπτωση για πολλές μεσαίες και μεγάλου μεγέθους υδρολογικές λεκάνες στον ελληνικό χώρο), η επιφανειακά μέση βροχοπτώση δεν μπορεί να εκτιμηθεί με συνήθεις μεθόδους, και προσεγγίζεται με απευθείας χρήση της μετρημένης σημειακής βροχοπτώσεως στη θέση του σταθμού. Δεδομένου ότι τα στατιστικά χαρακτηριστικά των χρονοσειρών σημειακών και επιφανειακά μέσων βροχοπτώσεων είναι αρκετά διαφορετικά (βλέπε π.χ. Veneziano and Langousis, 2005 και Veneziano *et al.*, 2006), ανακύπτουν σημαντικά προβλήματα τόσο κατά την βαθμονόμηση υδρολογικών μοντέλων, όσο και κατά τον υπολογισμό ετήσιων ισοζυγίων. Τα εν λόγω προβλήματα μεγεθύνονται από σφάλματα στις μετρήσεις, ελλείψεις στα δεδομένα και πιθανές επιρροές της τοπογραφίας. Για παράδειγμα, στο Σχήμα 1 παρουσιάζονται μετρημένα ημερήσια ύψη βροχής και παροχές στον υδροηλεκτρικό σταθμό του ποταμού Γλαύκου (βλέπε σημείο Υ στο Σχήμα 2) για την περίοδο 01 Οκτωβρίου 1990 – 30 Σεπτεμβρίου 1991.

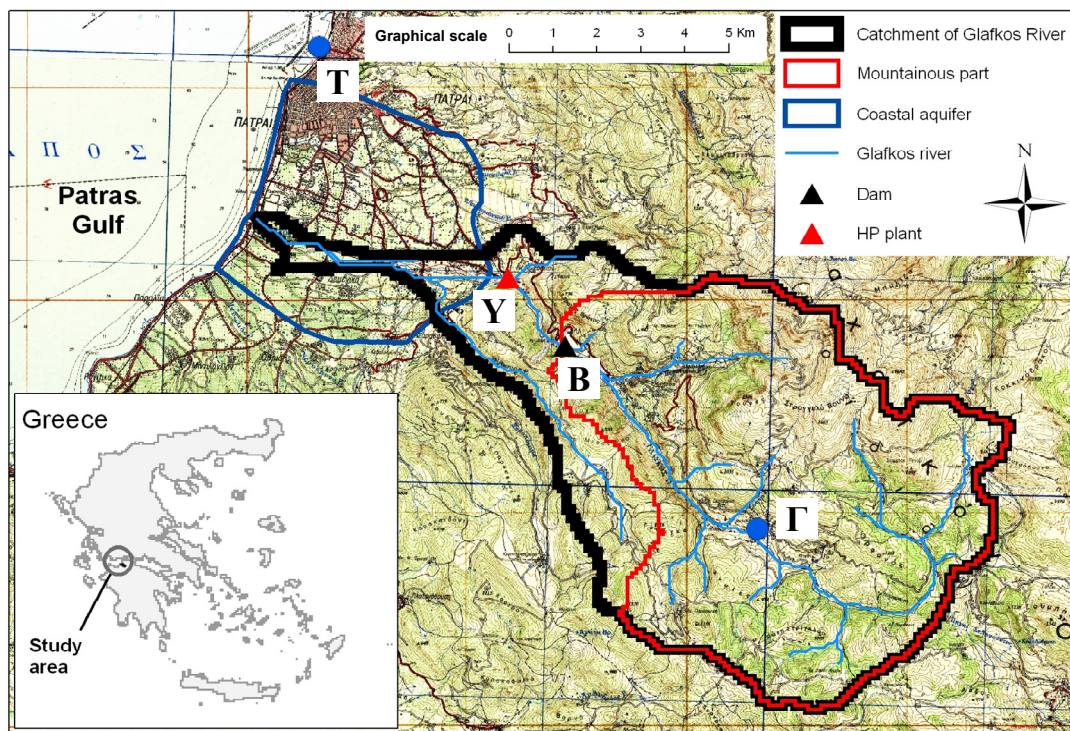


Σχήμα 1: Ημερήσια ύψη βροχής και μετρημένες απορροές (ανά μονάδα έκτασης της λεκάνης) στη θέση του υδροηλεκτρικού σταθμού (σημείο Υ στο Σχήμα 2) για την περίοδο 01 Οκτωβρίου 1990 – 30 Σεπτεμβρίου 1991. Τα βέλη επισημαίνουν έντονες μεταβολές της απορροής κατά την διάρκεια ξηρών ημερών.

Διακυμάνσεις της βασικής απορροής και η τήξη του χιονιού μπορούν να μεταβάλουν σε κάποιο βαθμό την μετρούμενη απορροή στην έξοδο της λεκάνης, αλλά

απότομες και έντονες μεταβολές οφείλονται σε γεγονότα βροχής. Τα βέλη στο Σχήμα 1 επισημαίνουν τέτοιου τύπου μεταβολές κατά τη διάρκεια ξηρών ημερών.

Στην παρούσα εργασία αναπτύσσουμε μία στατιστική μεθοδολογία για την αναγωγή σημειακών βροχοπτώσεων σε επιφανειακές με ταυτόχρονη αναπαραγωγή τόσο των περιθωρίων όσο και των από κοινού στατιστικών χαρακτηριστικών των τελευταίων. Τα τελευταία εκτιμώνται βάσει των στατιστικών χαρακτηριστικών της σημειακής βροχοπτώσεως, με χρήση της θεωρίας πολυκλασματικής ομοιοθεσίας (multifractal theory, βλέπε π.χ. Schertzer and Lovejoy, 1987, Gupta and Waymire, 1993, Veneziano, 1999, Veneziano and Langousis, 2010). Η προτεινόμενη μεθοδολογία δύναται α) να διακρίνει ασυμφωνίες μεταξύ των ημερήσιων τιμών βροχόπτωσης και απορροής, και β) να ανάγει τις μετρημένες σημειακές βροχοπτώσεις σε επιφανειακές, ώστε οι τελευταίες να ανταποκρίνονται κατά το δυνατόν περισσότερο στις ημερήσιες μεταβολές της μετρημένης απορροής. Επισημαίνεται ότι η μετρημένη απορροή εμπεριέχει σημαντική πληροφορία τόσο για την εμφάνιση όσο και για το συνολικό ύψος της μέσης επιφανειακής βροχοπτώσεως στην λεκάνη.

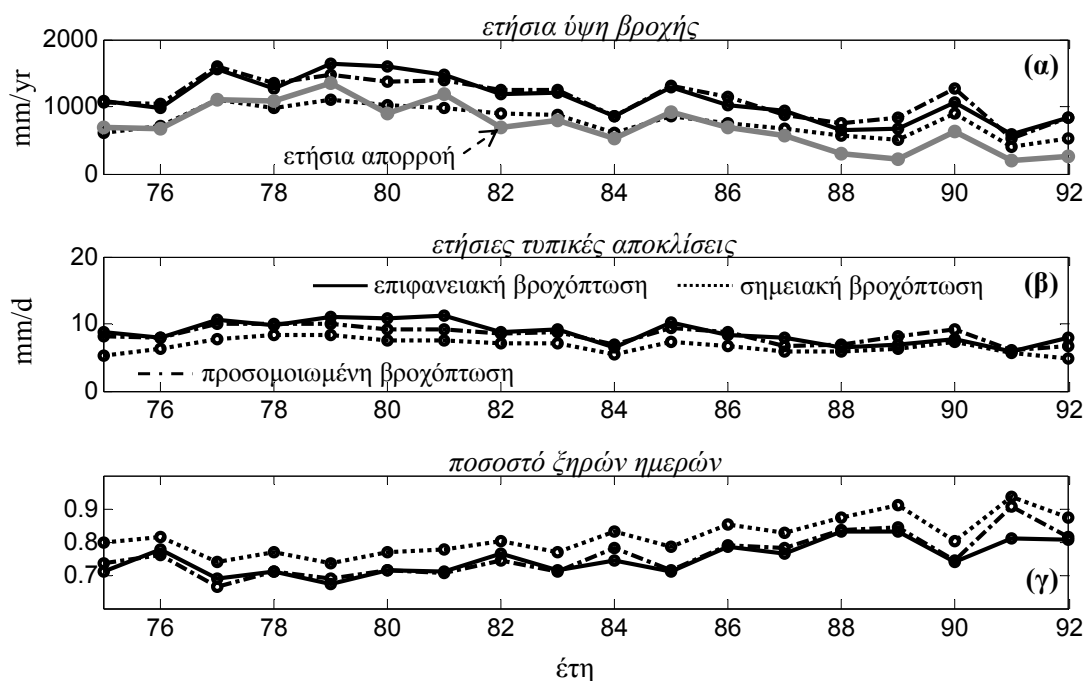


Σχήμα 2: Ορεινό και παραθαλάσσιο τμήμα της λεκάνης απορροής του ποταμού Γλαύκου.

Το αναπτυχθέν στατιστικό μοντέλο ανάγει τις σημειακές βροχοπτώσεις σε επιφανειακές επεμβαίνοντας στο ποσοστό των ξηρών ημερών του έτους, εντός εύρους που συμφωνεί με την δειγματική μεταβλητότητα, ενώ ταυτόχρονα αναπαράγει την κατανομή των ημερήσιων βροχοπτώσεων λαμβάνοντας υπόψη χωρικές ανομοιογένειες (βλέπε π.χ. Gilman, 1964, Smith, 1979, 1993, και Koutsoyiannis and Langousis, 2011) οφειλόμενες κυρίως σε επιρροές της ορογραφίας.

2. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ ΛΕΚΑΝΗ ΑΠΟΡΡΟΗ ΤΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ ΓΛΑΥΚΟΥ

Κατά την εφαρμογή του μοντέλου σε χρονοσειρές ημερήσιων βροχοπτώσεων και απορροών μήκους 18 ετών από την λεκάνη απορροής του ποταμού Γλαύκου, αποδεικνύεται ότι η αναπτυχθείσα μεθοδολογία δύναται: α) να απομονώσει και να διορθώσει ασυμβατότητες μεταξύ των χρονοσειρών βροχής και απορροής, χωρίς να αλλοιώνει την εποχικότητα και την ιδιότητα των υγρών και ξηρών ημερών να εμφανίζονται κατά ομάδες (clustering), και β) να ανάγει τα στατιστικά χαρακτηριστικά της σημειακής βροχοπτώσεως ώστε να συμβαδίζουν με αυτά της επιφανειακής (βλέπε Σχήμα 3). Για περισσότερες λεπτομέρειες πάνω στην αναπτυχθείσα μεθοδολογία, ο αναγνώστης παραπέμπεται στην δημοσίευση (Langousis and Kaleris, 2012).



Σχήμα 3: Ετήσια ύψη βροχής (α), ετήσιες τυπικές αποκλίσεις (β), και ποσοστό ξηρών ημερών (γ) για τις μετρημένες (διακεκομμένες γραμμές) και προσομοιωμένες (εστιγμένες γραμμές) χρονοσειρές βροχής. Οι τελευταίες έχουν προσομοιωθεί με εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας στην χρονοσειρά σημειακών βροχοπτώσεων από τον υδροηλεκτρικού σταθμού (σημείο Υ στο Σχήμα 2). Τα εν λόγω στατιστικά χαρακτηριστικά συγκρίνονται με αυτά των επιφανειακών βροχοπτώσεων (συνεχείς γραμμές), τα οποία εκτιμήθηκαν από τις χρονοσειρές σημειακών βροχοπτώσεων στα σημεία Β (φράγμα) και Γ (Μοίρα), με χρήση πολυγώνων Thiessen. Ενδεικτικά, στο Σχήμα (α) παρουσιάζεται η ετήσια απορροή ανα μονάδα επιφάνειας της λεκάνης (συνεχής γκρι γραμμή).

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η πρόταση υλοποιείται στο πλαίσιο της Δράσης «Ενίσχυση Μεταδιδασκτόρων Ερευνητών/τριών» του ΕΠΕΔΒΜ με Δικαιούχο την Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας και συγχρηματοδοτείται από το Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο (ΕΚΤ) και από Εθνικούς Πόρους. Επιπρόσθετα, ο δεύτερος εκ των συγγραφέων ευχαριστεί το ερευνητικό κέντρο Helmholtz-Zentrum fuer Umweltforschung GmbH – UFZ [Contract: UFZ-02/2009 (RA-3205/09)] για την ενίσχυση σε προηγούμενα στάδια της εν λόγω ερευνητικής προσπάθειας.

REFERENCES

- Banerjee, S., B.P. Carlin, and A.E. Gelfand (2004) *Hierarchical Modeling and Analysis for Spatial Data*, Chapman and Hall/CRC Press, Taylor and Francis Group.
- Chow, V.T., D.R. Maidment, and L.W. Mays (1988) *Applied Hydrology*, McGraw-Hill, New York.
- Eagleson, P.S. (1970), *Dynamic Hydrology*, McGraw-Hill, New York.
- Gilman, C.S. (1964) Rainfall, In: *Handbook of Applied Hydrology*, Ed. Chow V.T., Section 9, pp. 9-1 - 9-68, McGraw – Hill, U.S.A.
- Gupta, V.K. and E.C. Waymire (1993) A statistical analysis of mesoscale rainfall as a random cascade, *J. Appl. Meteor.*, **32**, 251-267.
- Journel, A.G. and C. J. Huijbregts (1978) *Mining Geostatistics*, Academic Press London.
- Koutsoyiannis, D. and A. Langousis (2011) Precipitation, In: *Treaties on Water Sciences: Hydrology*, Vol. 2, Edts: P. Wilderer (in chief) and S. Uhlenbrook, Academic Press, Oxford, pp. 27–78.
- Krige, D.G (1951) *A statistical approach to some mine valuations and allied problems at the Witwatersrand*, MSc thesis of the University of Witwatersrand.
- Langousis, A. and V. Kaleris (2012) Theoretical Framework to Estimate Spatially Averaged Rainfalls Conditional on River Discharges and Point rainfall Measurements from a Single Location: An Application to Western Greece, (in preparation).
- Press, W.H., S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling, and B.P. Flannery (2007) Interpolation by Kriging, Section 3.7.4, *Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing*, 3rd edition, New York, Cambridge University Press.
- Schertzer, D. and S. Lovejoy (1987) Physical modeling and analysis of rain and clouds by anisotropic scaling of multiplicative processes, *J. Geophys. Res.*, **92**: 9693-9714.
- Smith, J.A. (1993) Precipitation, In: *Handbook of Applied Hydrology*, Ed. Maidment D.A., Ch. 3, pp. 3.1-3.47, McGraw-Hill, New York.
- Smith, R.B. (1979) The influence of mountains on the atmosphere, *Adv. In Geophys.*, **21**, 87-230.
- Thiessen, A.H. (1911) Precipitation for large areas, *Mon. Weath. Rev.*, **19**, 1082-1084.
- Veneziano D. and A. Langousis (2010) Scaling and fractals in hydrology, In: *Advances in Data-based Approaches for Hydrologic Modeling and Forecasting*, Edited by: B. Sivakumar and R. Berndtsson, World Scientific, 145p.
- Veneziano, D. (1999) Basic properties and characterization of stochastically self-similar processes in R^D , *Fractals*, **7**(1), 59-78.
- Veneziano, D. and A. Langousis (2005) The areal reduction factor a multifractal analysis, *Wat. Resour. Res.*, **41**, doi:10.1029/2004WR003765.
- Veneziano, D., A. Langousis, and P. Furcolo (2006) Multifractality and rainfall extremes: A review, *Wat. Resour. Res.*, **42**, doi:10.1029/2005WR004716.

B

**ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ
ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ**

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ **Δημήτριος Α. Χρυσοχοΐδης, Ιωάννης Β. Σούλης, Δημήτριος Κ. Φυτανίδης**

Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης,
67100, Ξάνθη,
Τηλ. +302541079617, e-mail: soulis@civil.duth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Πραγματοποιείται υπολογιστική ανάλυση προκύπτοντος πλημμυρικού κύματος από θραύση φράγματος. Η ροή προσομοιώθηκε με χρήση της μεθόδου πεπερασμένων όγκων και οι εξισώσεις ροής, Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS), επιλύθηκαν με χρήση του επιλυτή ANSYS Fluent. Για τον προσδιορισμό της ελεύθερης επιφάνειας του πλημμυρικού κύματος χρησιμοποιήθηκε το πολυφασικό μοντέλο Volume of Fluid (VOF). Αναλύθηκαν τα αποτελέσματα της πίεσης, της ταχύτητας και του ύψους ύδατος σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές και σε συγκεκριμένες θέσεις κάνοντας χρήση της γεωμετρίας του ανοικτού συγκλίνοντος-αποκλίνοντος αγωγού του Εργαστηρίου Υδραυλικής του Δ.Π.Θ. Τέλος, τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με αυτά άλλων επιστημονικών εργασιών, παρουσιάζοντας ικανοποιητική σύγκριση.

COMPUTATIONAL ANALYSIS OF FLOOD-WAVES **Dimitrios A. Chrysochoidis, Johannes V. Soulis, Dimitrios K. Fytanidis**

Civil Engineering Department, Demokrition University of Thrace,
67100, Xanthi, Hellas,
Tel. ++302541079617, e-mail: soulis@civil.duth.gr

ABSTRACT

A computational analysis of flood-wave propagation resulted from instantaneous dam-break is performed. The flow was simulated using finite volume approach, whereas the governing equations, Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS), solved using commercial solver ANSYS Fluent. The capturing of flood wave free-surface was performed using the multiphase model "Volume of Fluid" (VOF). A set of numerical experiments were performed using the open convergent-divergent geometry of the Hydraulics Laboratory, Δ.Π.Θ. Results of the pressure, velocity, water depth analyzed for various positions across the channel and for selected time instants. Finally, the predicted results were compared with previous research works results and the comparison is satisfactory.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα πλημμυρικά κύματα που προκαλούνται από θραύση φράγματος (dam-break) ενεργοποιούνται από την αστοχία ή/και την υπερχειλίση ενός φράγματος και μπορεί να προκαλέσουν τεράστιες υλικές ζημιές αλλά και απώλειες ανθρωπίνων ζωών. Τα τελευταία χρόνια, είναι υποχρεωτικό από την νομοθεσία σε κάθε μελέτη φράγματος να γίνεται και μελέτη διόδευσης του πλημμυρικού κύματος σε περίπτωση θραύσης του. Με αυτόν τον τρόπο, υπολογίζεται ο χρόνος διόδευσης του πλημμυρικού κύματος προς κατοικημένες περιοχές, ώστε να προσδιοριστεί ο διαθέσιμος χρόνος για την εγκατάλειψη των πληγεισών από την πλημμύρα περιοχών, από τους κατοίκους.

Πλήθος πειραματικών και υπολογιστικών εργασιών είναι διαθέσιμες στην βιβλιογραφία σχετικά με το φαινόμενο της διόδευσης του πλημμυρικού κύματος μετά από θραύση φράγματος, ενδεικτικά αναφέρονται οι εργασίες των Bellos et al. (1990, 1992), Soulis (1992), (Vileau and Issa 2006), (Ling et al. 2009), (Biscani et al. 2010), (Donoghue 2010), (Epicum 2010), (Lhomme et al. 2010) και (Wenli et al. 2010).

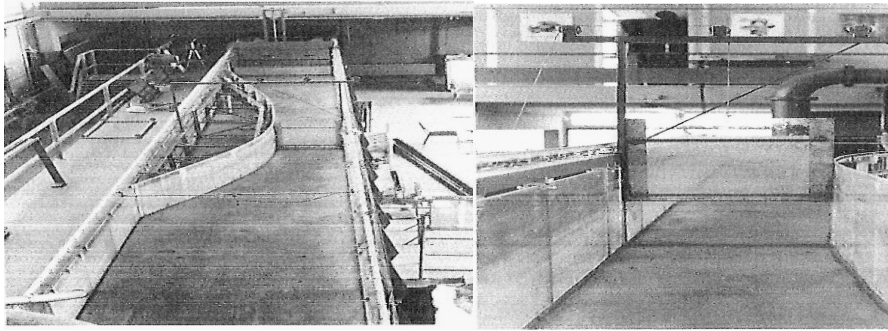
Στην παρούσα εργασία αναλύεται υπολογιστικά η διόδευση πλημμυρικού κύματος μετά από ακαριαία θραύση φράγματος με χρήση τεχνικών Υπολογιστικής Μηχανικής Ρευστών (Computational Fluid Dynamics, CFD). Η διόδευση του πλημμυρικού κύματος μελετάται σε εργαστηριακή κλίμακα. Γίνεται προσομοίωση της γεωμετρίας ενός συγκλίνοντος-αποκλίνοντος αγωγού στο Εργαστήριο Υδραυλικής Μηχανικής του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Δ.Π.Θ. (Bellos et al. 1990, Soulis 1992) στον οποίο έχει τοποθετηθεί θυρόφραγμα στο στενότερο αυτού σημείο. Η σύγκριση των υπολογισμών με τις προηγούμενες μετρήσεις θα θεμελιώσει την αξιοπιστία των υπολογισμών σε παρόμοιες εφαρμογές.

2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ

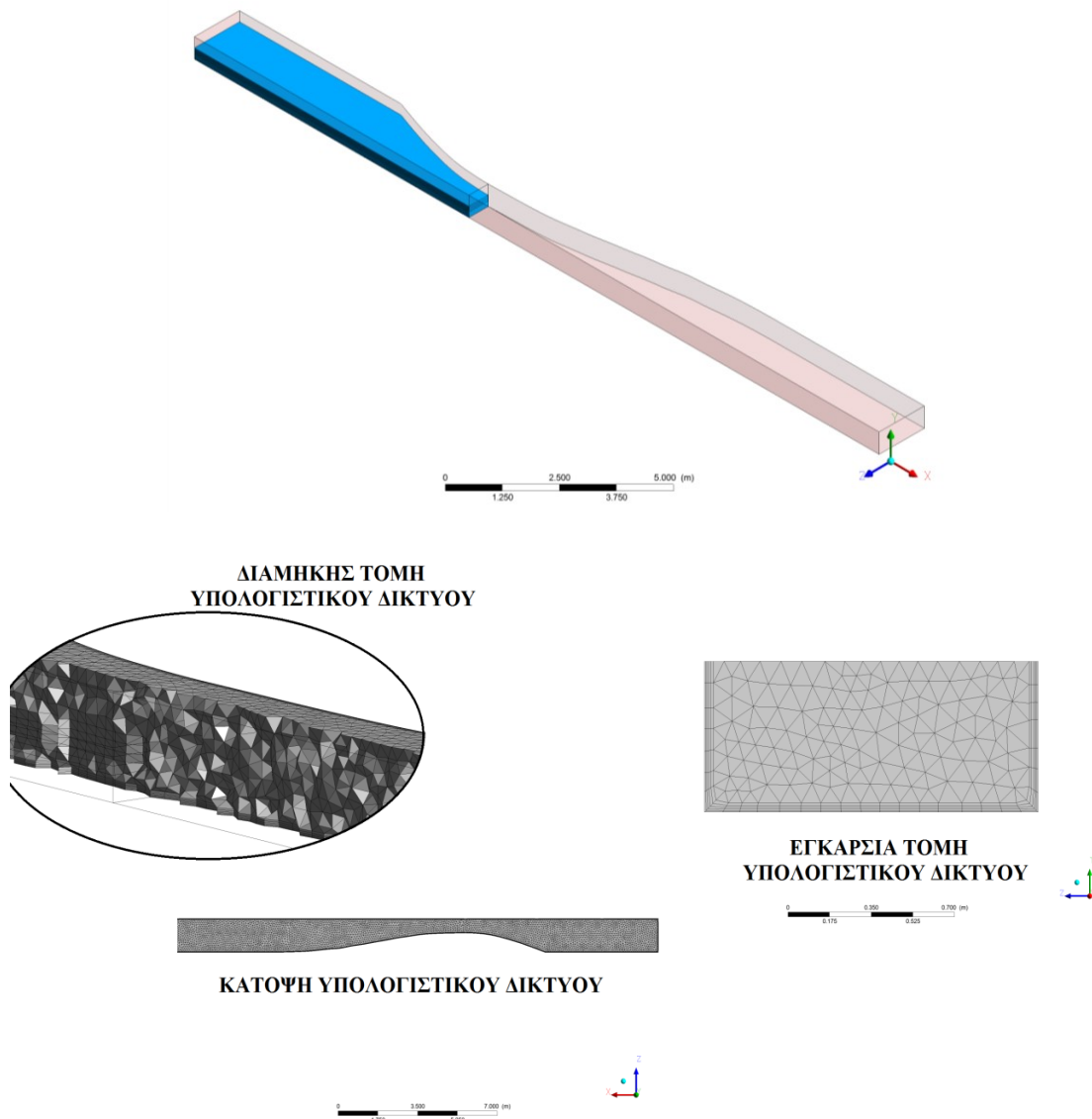
Η πειραματική διάταξη η οποία μελετήθηκε στην παρούσα εργασία είναι αυτή του συγκλίνοντος-αποκλίνοντος αγωγού, Σχήμα 1. Ο αγωγός έχει μήκος 21.0 m, πλάτος 1.40 m και βάθος 0.60 m. Έχει επίσης την δυνατότητα να στέφεται γύρω από τον κεντρικό εγκάρσιο άξονά του με μέγιστη κλίση 10.0 %. Σε απόσταση 8.5 m από το ένα ανάντη άκρο του υπάρχει ένα θυρόφραγμα, το οποίο δύναται να ανοίγει και να προς τα πάνω προκειμένου να προσομοιώνεται η ρήξη του φράγματος. Το φράγμα θεωρείται ότι βρίσκεται στην μεγαλύτερη στένωση του καμπύλου τμήματος του τοιχώματος του αγωγού. Στο μέσο της στένωσης το πλάτος του καναλιού είναι 0.60 m. Αναλυτική περιγραφή των συντεταγμένων του καμπύλου τμήματος το οποίο προσομοιώνει την στένωση του αγωγού μπορεί να βρεθεί στην εργασία, (Bellos et al. 1992).

Για την κατασκευή του υπολογιστικού δικτύου η γεωμετρία του Σχήματος 1, σχεδιάστηκε σε περιβάλλον CAD. Κατόπιν το ψηφιακό αυτό υπόβαθρο εισάγεται στο πρόγραμμα πλεγματοποίησης ANSYS Meshing το οποίο συμπεριλαμβάνεται στο ANSYS Workbench. Το παραγόμενο υπολογιστικό πλέγμα είναι μη-δομημένο και κατασκευάστηκε από τετράεδρα και πρίσματα. Στις τομές του υπολογιστικού πλέγματος που παρουσιάζονται στο Σχήμα 2, είναι εμφανής η πύκνωση των πρισματικών κελιών στην περιοχή του αγωγού που βρίσκεται πλησίον των τοιχωμάτων, ώστε να γίνει δυνατός ο ακριβέστερος υπολογισμός των διάφορων μεγεθών κοντά στο τοίχωμα, όπως κλίση ταχύτητας, διατμητική τάση κτλ. Κατά την διαδικασία της πλεγματοποίησης, κατασκευάστηκαν τρία διαφορετικού αριθμού κελιών υπολογιστικά δίκτυα, προκειμένου να ελεγχθεί η ανεξαρτησία της λύσης από το μέγεθος των υπολογιστικών κελιών. Έτσι δημιουργήθηκαν ένα αραιό υπολογιστικό δίκτυο (378095 υπολογιστικά κελιά), ένα μέτριο (673411 υπολογιστικά κελιά) και ένα πυκνό (967006 υπολογιστικά κελιά). Για λόγους ακρίβειας αλλά και οικονομίας υπολογιστικού χρόνου,

μετά από ανάλυση και επεξεργασία των αποτελεσμάτων και των τριών δικτύων, επιλέχθηκε να αναλυθεί και να παρουσιασθεί το πρόβλημα της θραύσεως φράγματος με το μέτριο πλέγμα.



Σχήμα 1. Γεωμετρία συγκλίνοντος-αποκλίνοντος αγωγού. Αριστερά η γεωμετρία του αγωγού. Δεξιά το θυρόφραγμα τοποθετημένο στο στενότερο σημείο του αγωγού



Σχήμα 2. Τρισδιάστατη γεωμετρία και το υπολογιστικό δίκτυο του συγκλίνοντος - αποκλίνοντος ανοικτού αγωγού του Εργαστηρίου Υδραυλικής του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Δ.Π.Θ.

3. ΕΙΣΩΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ

Η ροή ύδατος εντός της πειραματικής διάταξης προσομοιώθηκε με χρήση τεχνικών Υπολογιστικής Μηχανικής Ρευστών. Χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των πεπερασμένων όγκων καθώς και οι αλγόριθμοι επίλυσης που εμπεριέχονται στον εμπορικό επίλυτή ANSYS Fluent. Για την μοντελοποίηση της ροής χρησιμοποιήθηκαν οι Reynolds-Averaged Navier-Stokes εξισώσεις, οι οποίες στην γενικότητα τους εκφράζονται ως,

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\overline{\rho u_i u_j}) + \rho g_i \quad (3.2)$$

όπου ρ είναι η πυκνότητα, u_i είναι η μέση ταχύτητα, p είναι η μέση στατική πίεση, μ το ιξώδες του ρευστού, δ_{ij} είναι το δ του Kronecker, g_i είναι η προβολή του διανύσματος της επιτάχυνση της βαρύτητας στον άξονα i και $-\overline{\rho u_i u_j}$ είναι οι τάσεις Reynolds. Η μοντελοποίηση της τύρβης πραγματοποιήθηκε με χρήση του μοντέλου Standard k-ε, προκειμένου να πραγματοποιηθεί το κλείσιμο της Εξίσωσης 3.2, δηλαδή να προκύψει ο ίδιος αριθμός εξισώσεων και αγνώστων μέσω του προσδιορισμού των τάσεων Reynolds. Αναλυτική περιγραφή της επιρροής της επιλογής του μοντέλου τύρβης στην προσομοίωση πλημμυρικών κυμάτων γίνεται στην εργασία των Φυτανίδη και Σούλη (2012).

Σε αντίθεση με προηγούμενες εργασίες, (Bellos et al.1990, Soulis 1992), οι οποίες χρησιμοποιούσαν για την προσομοίωση της διόδευσης πλημμυρικών κυμάτων τις εξισώσεις των ρηγών υδάτων (Shallow Water Equations) ή εξισώσεις Saint-Venant, στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το πολυφασικό μοντέλο Volume of Fluid (VOF) προκειμένου να προσδιορισθεί η ελεύθερη επιφάνεια της ροής. Σύμφωνα με το μοντέλο VOF επιλύονται οι παρακάτω εξισώσεις για τον προσδιορισμό των ογκομετρικών κλασμάτων του νερού και του αέρα σε κάθε υπολογιστικό κελί,

$$\frac{\partial a_w}{\partial t} + \nabla a_w \vec{u} = 0 \quad (3.3)$$

$$a_w + a_{air} = 1 \quad (3.4)$$

όπου a_w και a_{air} είναι το ογκομετρικό κλάσμα (volume fraction) για το νερό και τον αέρα, αντίστοιχα. Ανάλογα με την τιμή που λαμβάνει το ογκομετρικό κλάσμα του νερού a_w σε κάθε υπολογιστικό κελί μπορεί,

- για $a_w=1.0$: το υπολογιστικό κελί είναι πληρωμένο από ύδωρ.
- για $a_w=0.0$: το υπολογιστικό κελί είναι πληρωμένο από αέρα
- για $0.0 < a_w < 1.0$: το υπολογιστικό κελί βρίσκεται στην διεπιφάνεια ύδατος και αέρα (ελεύθερη επιφάνεια).

Οι ιδιότητες που εμφανίζονται στις εξισώσεις των ορμών και της συνέχειας προσδιορίζονται με χρήση των ακόλουθων εξισώσεων:

$$\rho = \alpha_w \rho_w + (1 - \alpha_w) \rho_{air} \quad (3.5)$$

$$\mu = \alpha_w \mu_w + (1 - \alpha_w) \mu_{air} \quad (3.6)$$

Όπου ρ_w και ρ_{air} είναι η πυκνότητα του νερού και του αέρα αντίστοιχα, ενώ όπου μ_w και μ_{air} είναι το ιξώδες του νερού και του αέρα, αντίστοιχα.

Για την ζεύξη πίεσης και ταχύτητας χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος SIMPLE (Patankar 1980) ενώ για την χωρική διακριτοποίηση των υπολογισμών χρησιμοποιήθηκε το “πρώτης τάξης προς τα πίσω σχήμα” (first order upwind scheme) για όλες τις εξισώσεις που επιλέχθηκαν. Για τον υπολογισμό των κλίσεων χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος “Green-Gauss Cell Based”, (ANSYS Fluent 2012).

Οι παραπάνω εξισώσεις επιλύθηκαν με την παραδοχή ότι η ροή είναι τρισδιάστατη (3D), χρονικά μεταβαλλόμενη, ασυμπιεστή, τυρβώδης και ισόθερμη, ενώ η πυκνότητα του ύδατος λήφθηκε ίση με 998.2 kg/m^3 . Το δυναμικό ιξώδες του ύδατος θεωρήθηκε ίσο με 0.001003 kg/m-s . Αντίστοιχα, για τον αέρα η πυκνότητα λήφθηκε ίση με 1.225 kg/m^3 ενώ το δυναμικό ιξώδες $1.7894 \times 10^{-5} \text{ kg/m-s}$. Τέλος, οι οριακές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι εξής,

- α) για το τοίχωμα χρησιμοποιήθηκε η συνθήκη μη-ολίσθησης,
- β) για το άνω ανοικτό μέρος του καναλιού όπως επίσης και για την έξοδο στα κατάντη του καναλιού χρησιμοποιήθηκε η συνθήκη ανοικτού ορίου (pressure outlet)
- γ) για την εισαγωγή του ύδατος δεν χρησιμοποιήθηκε κάποια οριακή συνθήκη εισόδου αλλά ο αρχικός ακίνητος όγκος νερού τοποθετήθηκε στα ανάντη της στένωσης του φράγματος. Το θυρόφραγμα του φράγματος θεωρήθηκε ότι απομακρύνεται στιγμιαία την χρονική $t=0.0 \text{ s}$.

4. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Εξετάστηκαν υπολογιστικά 4 περιπτώσεις με μεταβαλλόμενο το αρχικό ύψος νερού h_o στα ανάντη του θυροφράγματος και την κλίση του πυθμένα, s ‰,

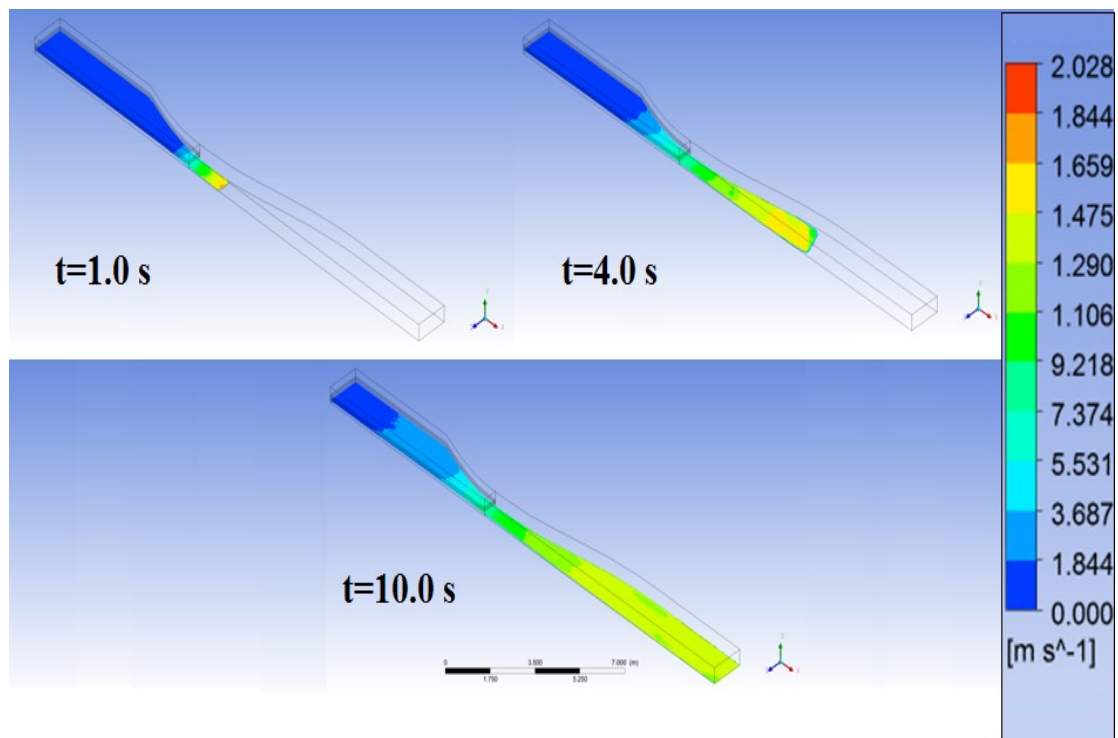
- $h_o=0.15 \text{ m}$, $s=0.0$ ‰, ξηρός πυθμένας κατάντη
- $h_o=0.30 \text{ m}$, $s=0.0$ ‰ ξηρός πυθμένας κατάντη
- $h_o=0.15 \text{ m}$, $s=2.0$ ‰ ξηρός πυθμένας κατάντη
- $h_o=0.15 \text{ m}$, $s=10.0$ ‰ ξηρός πυθμένας κατάντη

Σε κάθε περίπτωση προσομοιώθηκε η ροή του πλημμυρικού κύματος για 60.0 s . Τα αποτελέσματα που ελήφθησαν αφορούν τον προσδιορισμό της ελεύθερης επιφάνειας, τις γραμμές ίσων πιέσεων και ταχυτήτων σε όλο το μήκος του αγωγού. Λόγω του μεγάλου όγκου των προσομοιώσεων που εξετάστηκαν δεν είναι δυνατόν να παρουσιαστούν αναλυτικά τα αποτελέσματα για όλα. Έτσι, παρακάτω παρουσιάζονται ενδεικτικά αποτελέσματα όλων των εξεταζόμενων σεναρίων με στόχο την σύγκριση ανάμεσα τους.

Στα Σχήματα 3 και 4 φαίνεται το μέτωπο (ελεύθερη επιφάνεια) του πλημμυρικού κύματος χρωματισμένο με το μέτρο της ταχύτητας σε διάφορες χρονικές στιγμές $t=1.0$, 4.0 και 10.0 s για τα σενάρια στα οποία το αρχικό ύψος ύδατος του φράγματος την χρονική στιγμή $t=0.0 \text{ s}$ είναι $h_o=0.15 \text{ m}$ και $h_o=0.30 \text{ m}$ αντίστοιχα και η κλίση του πυθμένα s ισούται με 0.0 ‰. Ενδεικτική είναι η αύξηση της ταχύτητας με την αύξηση

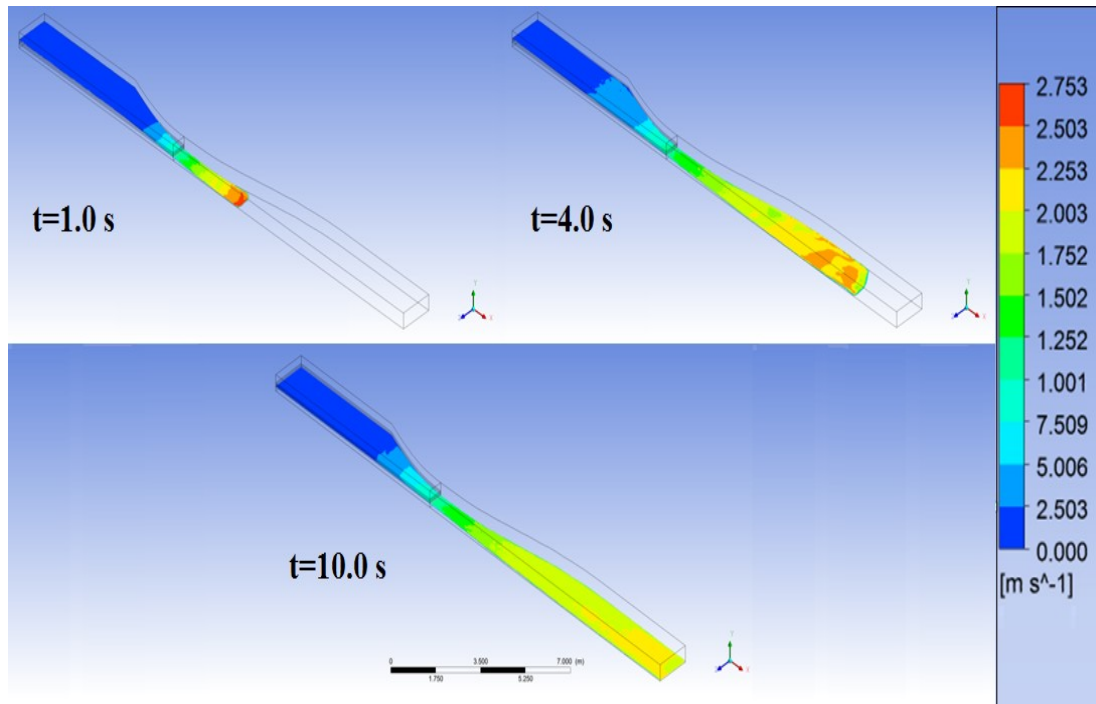
του αρχικού ύψους νερού h_o . Έτσι το πλημμυρικό κύμα για $h_o=0.30$ m φτάνει ταχύτερα στην έξοδο του αγωγού σε σχέση με το αντίστοιχο για $h_o=0.15$ m, παρουσιάζοντας μέγιστη τιμή ταχύτητας, για $t=1.0$ s, ίση με 2.753 m/s όταν η αντίστοιχη τιμή για $h_o=0.15$ m είναι 2.028 m/s.

Στο Σχήμα 5, φαίνονται τα αποτελέσματα της ταχύτητας ροής σε μορφή διανυσμάτων σε διάφορες χρονικές στιγμές, $t=1.0$, 4.0 και 10.0 s για το σενάριο στο οποίο το αρχικό ύψος ύδατος του φράγματος την χρονική στιγμή $t=0.0$ s είναι $h_o=0.15$ m και η κλίση του πυθμένα s ισούται με 2.0 ‰. Ενδεικτικό, λόγω της χρήσης του μοντέλου VOF για τον προσδιορισμό της ελεύθερης επιφάνειας, είναι το γεγονός ότι τα αποτελέσματα της ταχύτητας σε μια τομή εμπεριέχουν τόσο το πεδίο ροής που καλύπτεται από ύδωρ όσο και από αέρα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το μοντέλο VOF επιλύει ένα σύστημα εξισώσεων ορμών τόσο για το νερό όσο και για τον αέρα οι δε ιδιότητες προσεγγίζονται με χρήση των Εξισώσεων 3.5 και 3.6.



Σχήμα 3. Ελεύθερη επιφάνεια ύδατος χρωματισμένη με το μέτρο της ταχύτητας (m/s) για τις χρονικές στιγμές $t=1.0$, 4.0 και 10.0 s, για $h_o=0.15$ m και κλίση $s=0.0$ ‰

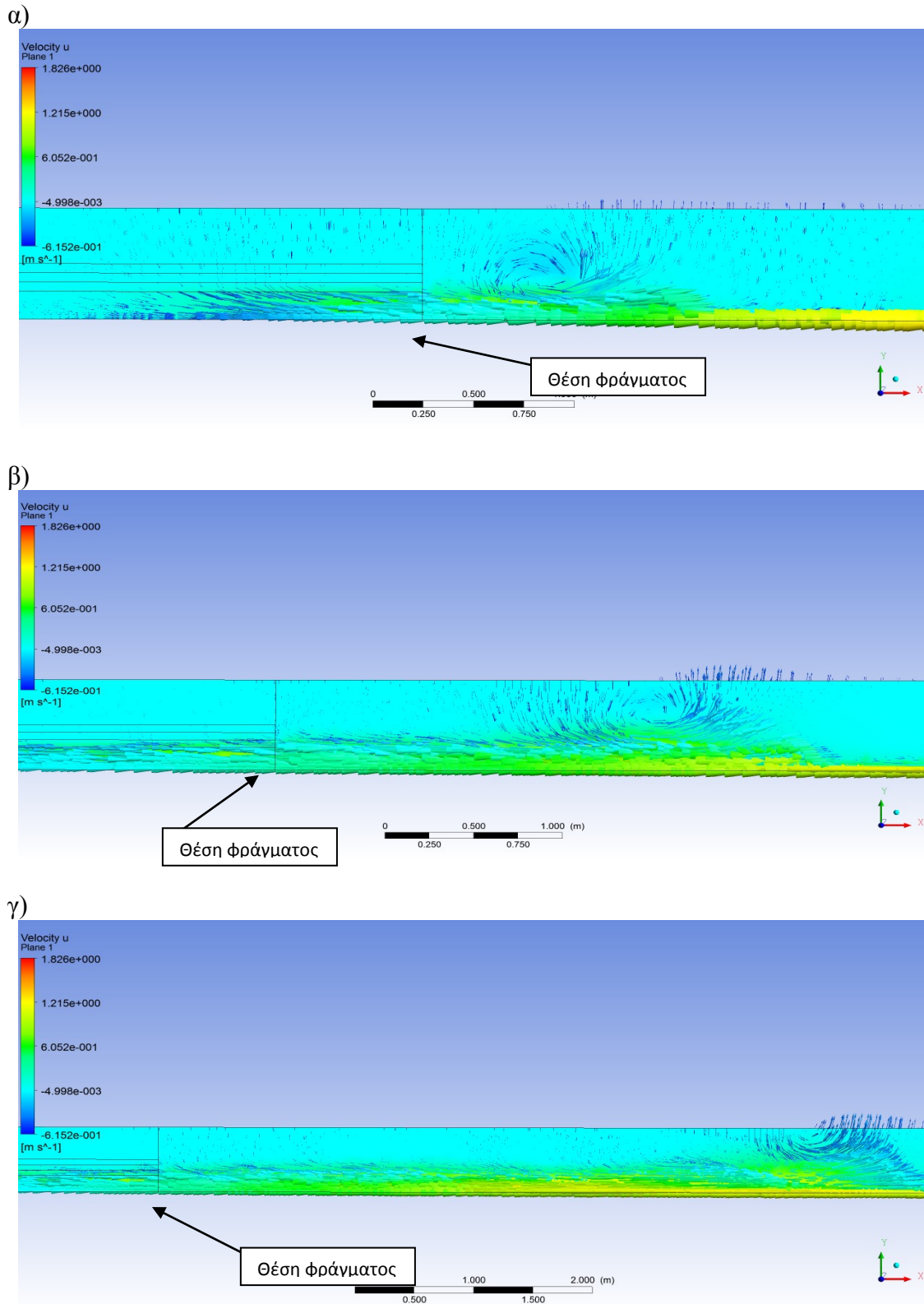
Στο Σχήμα 6, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της σχετικής πίεσης (Pa) τις χρονικές στιγμές, $t=1.0$, 4.0 και 10.0 s για το σενάριο στο οποίο το αρχικό ύψος ύδατος του φράγματος την χρονική στιγμή 0.0 s είναι $h_o=0.15$ m και η κλίση του πυθμένα s ισούται με 2.0 ‰. Παρατηρείται ότι η σχετική στατική πίεση στα τοιχώματα του αγωγού μειώνεται με τον χρόνο.



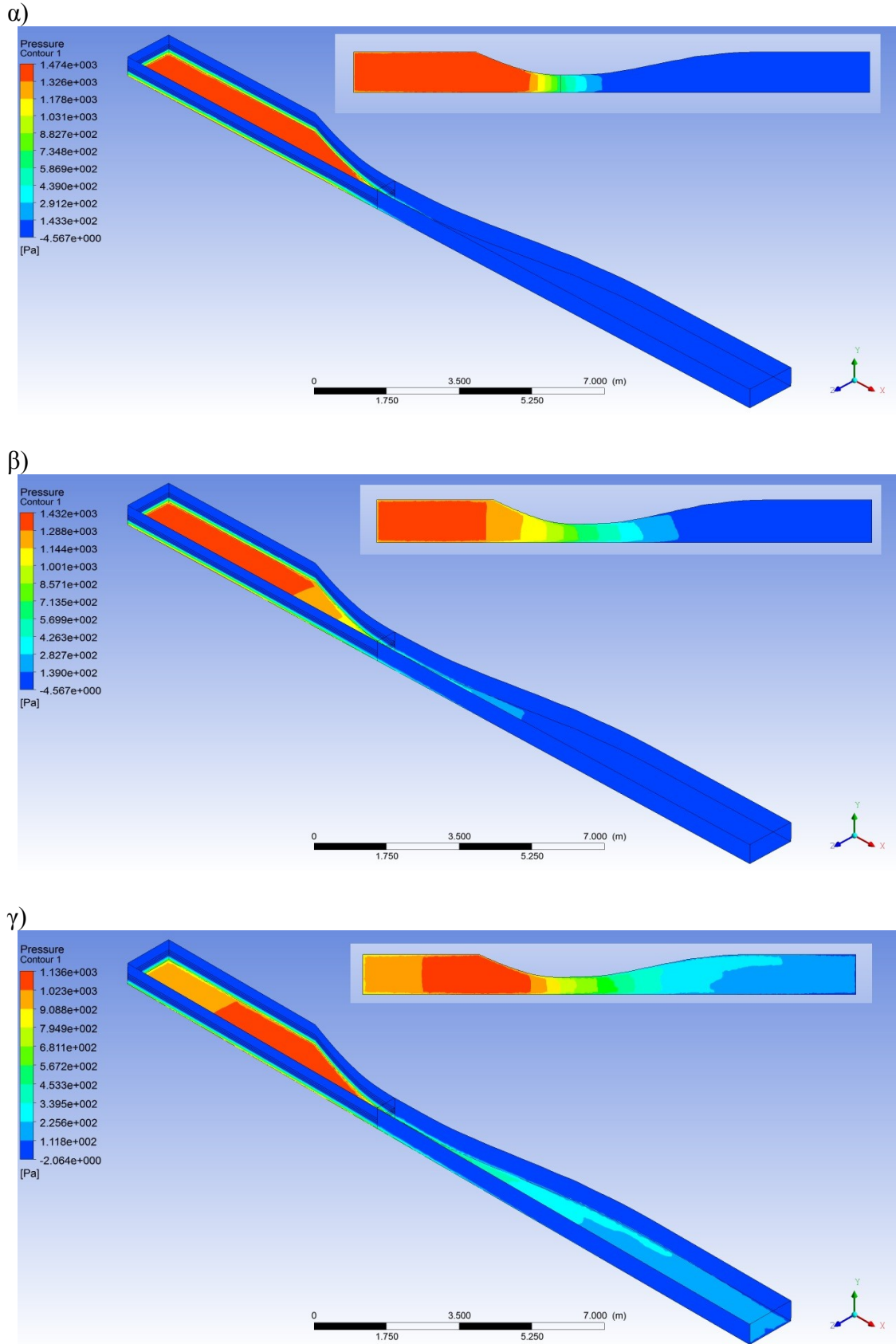
Σχήμα 4. Ελεύθερη επιφάνεια ύδατος χρωματισμένη με το μέτρο της ταχύτητας (m/s) για τις χρονικές στιγμές $t=1.0$, 4.0 και 10.0 s, για $h_o=0.30$ m και κλίση $s=0.0$ ‰

Γίνεται σύγκριση των υπολογιστικών αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας, με μετρήσεις (Bellos et al., 1991 και 1992) και υπολογισμούς που βασίστηκαν στην επίλυση των εξισώσεων Saint-Venant, (Soulis, 1992). Για την παρουσίαση των χρονοσειρών των αποτελεσμάτων του ύψους νερού επιλέχθηκε ένα σημείο ανάντη και ένα κατόντη του φράγματος. Το ανάντη σημείο βρίσκεται σε απόσταση -8.5 m από το φράγμα ενώ το κατόντη σε απόσταση $+5.0$ m από το φράγμα. Τα ως άνω σημεία λήφθηκαν στο μέσο του αντίστοιχου για το καθένα πλάτους του αγωγού.

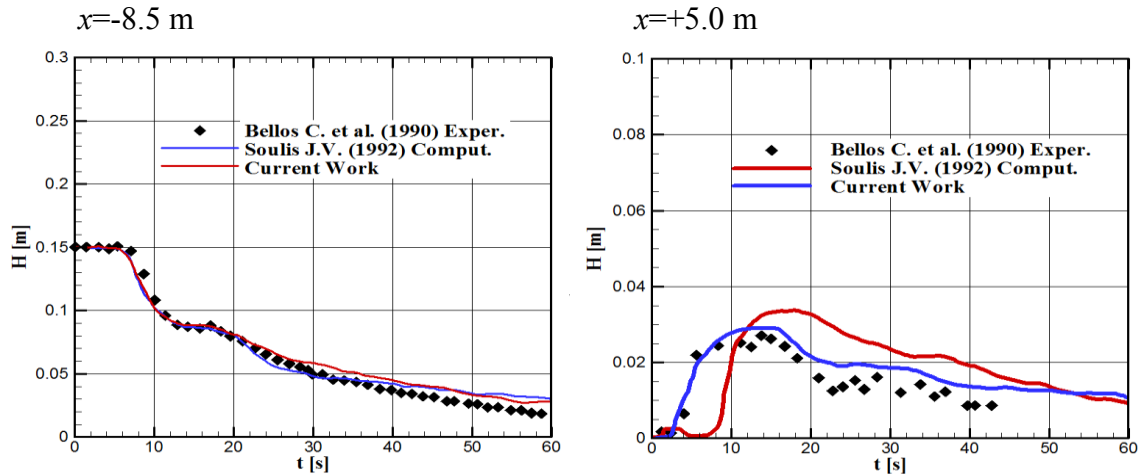
Στο Σχήμα 7 φαίνεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων του ύψους του ύδατος της παρούσας εργασίας στα σημεία $x=-8.5$ m και $x=+5.0$ m συναρτήσει του χρόνου για $h_o=0.15$ m και κλίση $s=0.0$ ‰ με τα αντίστοιχα πειραματικά και υπολογιστικά αποτελέσματα προγενέστερων εργασιών. Η σύγκριση χαρακτηρίζεται ως ικανοποιητική. Για την περίπτωση του σημείου $x=+5.0$ m το υπολογιστικό μοντέλο της παρούσας εργασίας προσεγγίζει καλύτερα τα πειραματικά αποτελέσματα σε σχέση με το υπολογιστικό μοντέλο που χρησιμοποίησε την προσέγγιση των εξισώσεων Saint-Venant, (Soulis, 1992).



Σχήμα 5. Διανύσματα ταχύτητας (m/s) για τις χρονικές στιγμές
 α) $t=1.0$, β) 4.0 και γ) 10.0 s μετά την ρήξη του θυροφράγματος
 για $h_o=0.15$ m και κλίση $s=2.0$ ‰

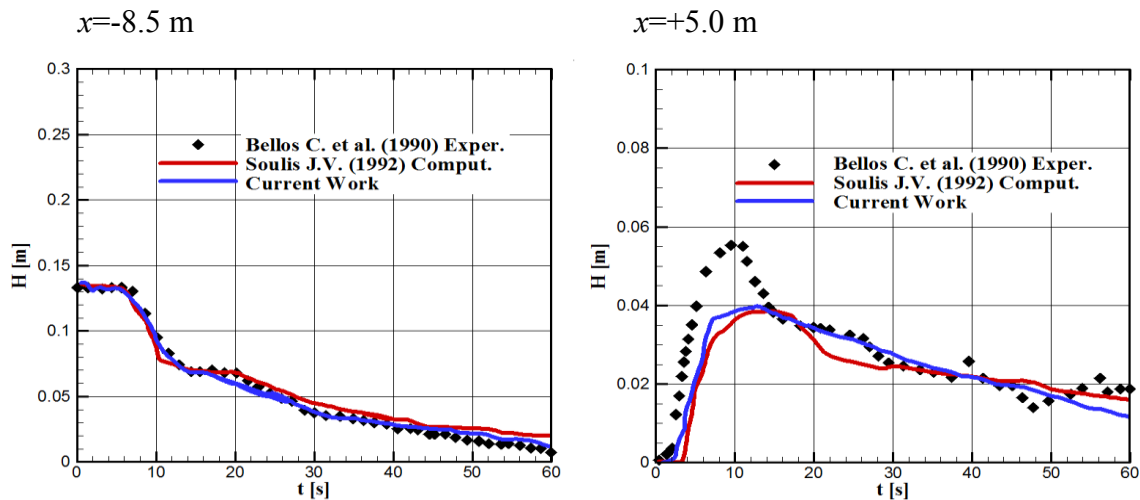


Σχήμα 6. Κατανομή στατικής πίεσης (N/m^2) για τις χρονικές στιγμές
 α) $t=1.0$, β) 4.0 και γ) 10.0 s μετά την ρήξη του θυροφράγματος
 για $h_o=0.15$ m και κλίση $s=2.0$ ‰



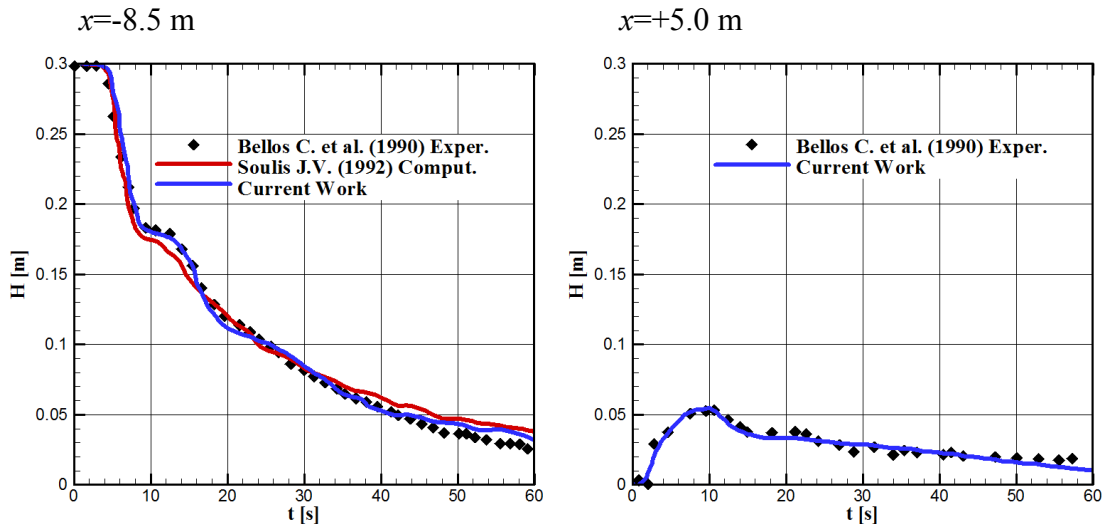
Σχήμα 7. Συγκρίσεις του βάθους νερού (m) κατά την προέλαση του πλημμυρικού κύματος στα σημεία $x=-8.5$ m και $x=+5.0$ συναρτήσει του χρόνου t (s) για $h_0=0.15$ m και κλίση $s=0.0\%$

Στο Σχήμα 8 παρουσιάζεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων του ύψους του ύδατος στα σημεία $x=-8.5$ m και $x=+5.0$ m συναρτήσει του χρόνου, για $h_0=0.15$ m και κλίσεις 2.0 ‰. Η σύγκριση μεταξύ της παρούσας εργασίας και των αντλούμενων από την βιβλιογραφία πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων για το Σχήμα 8 χαρακτηρίζεται ικανοποιητική.



Σχήμα 8. Συγκρίσεις του ύψους νερού (m) κατά την προέλαση του πλημμυρικού κύματος στα σημεία $x=-8.5$ m και $x=+5.0$ m συναρτήσει του χρόνου t (s) για $h_0=0.15$ m και κλίση $s=2.0$ ‰

Τέλος, στο Σχήμα 9 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών του ύψους του ύδατος στα σημεία $x=-8.5$ m και $x=+5.0$ m συναρτήσει του χρόνου, για $h_0=0.30$ m και κλίση 0.0 ‰. Για ακόμη μια φορά η σύγκριση μεταξύ της παρούσας εργασίας και των αντλούμενων από την βιβλιογραφία πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων για χαρακτηρίζεται ικανοποιητική.



Σχήμα 9. Συγκρίσεις του βάθους ύδατος (m) κατά την προέλαση του πλημμυρικού κύματος στα σημεία $x=-8.5$ m και $x=+5.0$ m συναρτήσει του χρόνου t (s) για $h_o=0.30$ m και κλίση $s=0.0\%$

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία αναλύεται υπολογιστικά η διάδοση πλημμυρικού κύματος μετά από ακαριαία θραύση φράγματος σε εργαστηριακή κλίμακα με χρήση Υπολογιστικής Μηχανικής Ρευστών (Computational Fluid Dynamics, CFD). Μελετήθηκε η διάδοση του πλημμυρικού κύματος στην πειραματική διάταξη του συγκλίνοντος-αποκλίνοντος αγωγού στο Εργαστήριο Υδραυλικών Έργων του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Δ.Π.Θ. Με χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων όγκων επιλύθηκαν οι εξισώσεις ροής με τον επιλυτή ANSYS Fluent. Ο προσδιορισμός της ελεύθερης επιφάνειας πραγματοποιήθηκε με χρήση του πολυφασικού μοντέλου VOF. Μετά την ανάλυση και επεξεργασία των υπολογιστικών αποτελεσμάτων προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

1. Το μοντέλο VOF προσεγγίζει ικανοποιητικά τόσο τα πειραματικά όσο και τα υπολογιστικά αποτελέσματα που αντλήθηκαν από την βιβλιογραφία.
2. Η προσομοίωση της τυρβώδους ροής με την προσέγγιση RANS έδειξε να προβλέπει ικανοποιητικά την ταχύτητα διάδοσης του πλημμυρικού κύματος.
3. Το παρόν υπολογιστικό μοντέλο αποδείχθηκε αποτελεσματικότερο σε σχέση με τα προγενέστερα, βασισμένα στις εξισώσεις Saint-Venant, μοντέλα για τον προσδιορισμό του ύψους νερού στα κατάντη του φράγματος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Bellos C.V., Soulis J.V. and Sakkas J.G., 1991. Computation of two-dimensional dam-break induced flows. Computational Mechanics Publication, Vol.14 (1): 31–41.
- Bellos C.V., Soulis J.V. and Sakkas J.G., 1992. *Experimental investigation of two-dimensional dam-break induced flows*. Journal of Hydraulic Research, Vol. 30(1):47-63.
- Biscarini C., Francesco S.D. and Manciola P., 2010. *CFD modelling approach for dam-break flow studies*. Hydrology and Earth System Sciences, Vol. 14: 705-718.

- Donoghue T.O., Pokragak D. and Hohondebrik J., 2010. *Laboratory and numerical study of dam-break generated swash on impermeable slopes*. Coastal Engineering, Vol. 57: 513-530.
- Epicum S., Dewals B.J., Archambeau P. and Piroton M., 2010. *Dam-break flow computation based on an efficient flux vector splitting*. Journal of Computational and Applied Mathematics, Vol. 234: 2143-2151.
- Lhomme J., Gutierrez-Andres J., Weisgerber A., Davison M., Mulet-Marti J., Cooper A. and Gouldby B., 2010. *Testing a new dimensional flood modelling system: Analytical tests and application to a flood event*. Flood Risk Management, Vol. 3: 33-51.
- Ling H., Yue-Feng S. and Xiao-Ling W., 2009. *Environmental risk evaluation based on dam-break flood numerical simulation*. ICBBE “Bioinformatics and Biomedical Engineering”, Beijing, China, 1-4.
- Soulis J.V., 1992. *Computation of two-dimensional dam-break flood flows*. International Journal for Numerical Methods in Fluids, Vol. 14: 631-644.
- Violeau D. and Issa R., 2006. *Numerical modeling of complex turbulent free surface flows with the SPH method*. International Journal for Numerical Methods in Fluids, Vol. 53 (12): 277-304.
- Wenli W., Pei Z. and Sheng G., 2010. *Numerical simulation of 2D flood waves using shallow water equations*. Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, Chengdu, China, 1-3.

ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΟ ΦΡΑΓΜΑ ΘΗΣΑΥΡΟΥ**Ιωάννης Β. Σούλης, Αλέξανδρος Κ. Κατηρτζόγλου**

Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, 67100, Ξάνθη
Τηλ., +302541079617, e-mail: soulis@civil.duth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αναλύεται ένα υποθετικό πρόβλημα πλημμυρικού κύματος προερχομένου εκ της ρήξεως χωμάτινου φράγματος (Θησαυρού, Νέστος Ποταμός). Οι υπολογισμοί απαιτούν την περιγραφή της γεωμετρίας χρησιμοποιώντας 87 διατομές του ποταμού. Με σταθερές παροχές μέχρι και 50000.0 m³/sec προκαλούνται καταστροφές στην παράχθια χλωρίδα. Η μη-σταθερή παροχή των 175000.0 m³/sec και 350000.0 m³/sec υπολογίστηκε με ολική κατάρρευση του φράγματος. Το επερχόμενο πλημμυρικό κύμα θα έχει ολέθριες επιδράσεις. Ο χρόνος άφιξης του πλημμυρικού κύματος στην περιοχή του Παρανεστίου με τη παροχή των 50000.0 m³/sec είναι διπλάσιος απ' αυτόν της δυσμενέστερης μη-σταθερής παροχής των 350000.0 m³/sec (περί τα 20.0 min). Απαιτείται πρόληψη και προειδοποίηση των κατοίκων με συστήματα εγκαίρου προειδοποίησης.

FLOOD-WAVES FROM THESAURUS DAM**Johannes V. Soulis, Alexander K. Katirtzoglou**

Civil Engineering Department, Demokriton University of Thrace,
67100, Xanthi, Hellas

Tel. 6972000634, 2541079617, e-mail: soulis@civil.duth.gr

ABSTRACT

The computational analysis of a hypothetical flood wave, arising from the dam-break of an earthy dam (Thesaurus, Nestos River), is utilized. Computations require geometry description, which is achieved using 87 river cross-sections. Under steady flow analysis, and up to 50000.0 m³/sec flow discharges, destructions caused are limited to near river bank regions. The problem has been calculated using flow discharges 175000.0 m³/sec and 350000.0 m³/sec with total dam collapse. The flood wave will be disastrous. The time arrival of the resulting flood wave, at the nearby to Paranestion region, under the steady flow discharge of 50000.0 m³/sec is two times longer to the time arrival of the worst flood wave (350000.0 m³/sec) resulting under unsteady flow conditions (around 20.0 min). An early warning system is required to be installed for the civilians' welfare.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το εύκαμπτο (χωμάτινο) υδροηλεκτρικό φράγμα Θησαυρού του ποταμού Νέστου δημιουργεί ταμιευτήρα ωφέλιμης χωρητικότητας $565.0 \times 10^6 \text{ m}^3$ και βρίσκεται βορειοδυτικά σε απόσταση 20.0 km από την πόλη του Παρανεστίου (Π.Ε. Δράμας). Η λεκάνη απορροής είναι 5.761 Km^2 και οι επιφανειακές μέσες ετήσιες απορροές στο ύψος του οικισμού Τοξότες είναι $1.470 \times 10^6 \text{ m}^3$ νερού. Η πιθανότητα αστοχιών στα εύκαμπτα φράγματα είναι κατά πολύ μεγαλύτερη αυτής από άκαμπτα και ένα τέτοιο ενδεχόμενο καταστροφής εξετάζεται στην παρούσα μελέτη με τη χρήση του προγράμματος HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center-River Analysis System). Το πρόγραμμα αυτό είναι ένα από τα σημαντικά προγράμματα προσομοίωσης, ανάλυσης και επεξεργασίας δεδομένων στα ποτάμια προβλήματα με χρήση της Μηχανικής των Ρευστών. Εφοδιάζει τους Μηχανικούς και τους Επιστήμονες μ' ένα εύχρηστο πακέτο γραφικών.

Η υπολογιστική διαδικασία του προβλήματος απαιτεί την περιγραφή της γεωμετρίας και αυτό γίνεται με 3200 υπολογιστικούς κόμβους περίπου πάνω σε 87 διατομές. Η υπολογιστική ανάλυση γίνεται με πεπερασμένες διαφορές. Οι επιδράσεις του πλημμυρικού κύματος που προκαλείται από τη θραύση του φράγματος Θησαυρού στους ευρισκόμενους κατάντη οικισμούς που υπάγονται στο Δήμο Παρανεστίου αλλά και στο ίδιο το Δ. Δ. Παρανέστι, πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας 6 σταθερές παροχές, $Q=1000.0, 3000.0, 10000.0, 20000.0, 35000.0 \text{ m}^3/\text{sec}$ και $50000.0 \text{ m}^3/\text{sec}$ και δύο περιπτώσεις μη-σταθερής παροχής, $175000.0 \text{ m}^3/\text{sec}$ και $350000.0 \text{ m}^3/\text{sec}$.

Ο σκοπός της μελέτης είναι να δοθεί μια γενική Σχήμα του προγράμματος HEC-RAS και παράλληλα να μελετηθούν οι επιδράσεις από πλημμυρικά κύματα σε μία πιθανή αστοχία του φράγματος του Θησαυρού στο ποτάμιο σύστημα που να φθάνει μέχρι και την πόλη του Παρανεστίου. Με τον τρόπο αυτό θα είναι δυνατόν να διαπιστωθεί ποιες περιοχές κατακλύζονται από τα ύδατα και σε πιο βαθμό. Παραμένει βέβαια το ερώτημα εάν και κατά πόσο είναι επικίνδυνη η κατάσταση για τις κατοικημένες περιοχές του Δήμου Παρανεστίου και ιδίως της πόλεως του Παρανεστίου σε διάφορες μορφές εντάσεως του ελαύνοντος πλημμυρικού κύματος.

2. ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ HEC-RAS, ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Το πρόγραμμα HEC-RAS είναι ένα ενσωματωμένο σύστημα λογισμικού, σχεδιασμένο για χρήση σ' ένα πολλαπλών καθηκόντων περιβάλλον. Το σύστημα αποτελείται από ένα γραφικό μέσο, το Graphical User Interface (GUI), χωριστά υδραυλικά τμήματα ανάλυσης, ικανότητες αποθήκευσης και διαχείρισης στοιχείων, εγκαταστάσεις γραφικών και υποβολής εκθέσεων. Το πρόγραμμα αυτό περιέχει τρία διαφορετικά υδραυλικά τμήματα ανάλυσης με μονοδιάστατη ροή,

- **υπολογισμούς σχεδιαγράμματος επιφάνειας ύδατος σταθερής ροής:**

είναι σχεδιασμένο για τον υπολογισμό του προφίλ επιφάνειας ύδατος σταθερής και σταδιακά μεταβαλλόμενης ροής. Το τμήμα της σταθερής ροής είναι ικανό για τον σχεδιασμό και τον υπολογισμό προφίλ υποκρίσιμης, υπερκρίσιμης και μεικτής ροής. Η βασική υπολογιστική διαδικασία βασίζεται στην επίλυση της μονοδιάστατης ενεργειακής εξίσωσης. Οι απώλειες ενέργειας υπολογίζονται από την ημι-εμπειρική εξίσωση Manning. Η εξίσωση ορμής χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις όπου το προφίλ της επιφάνειας του ύδατος μεταβάλλεται ταχέως. Αυτές οι περιπτώσεις περιλαμβάνουν μεικτούς υπολογισμούς καθεστώτος ροής (π.χ. υδραυλικά άλματα), υδραυλική των γεφυρών και υπολογισμούς προφίλ σε

συνενώσεις ποταμών. Τα αποτελέσματα διαφόρων κατασκευών όπως γέφυρες, αγωγοί, φράγματα και κατασκευές εντός της ροής μπορούν να ληφθούν υπόψη στους υπολογισμούς. Το σύστημα σταθερής ροής είναι σχεδιασμένο για εφαρμογές διαχείρισης ροής και μελέτες ασφαλείας από πλημμύρες. Επίσης, υπάρχουν οι δυνατότητες για την αξιολόγηση της αλλαγής στα σχεδιαγράμματα επιφάνειας ύδατος λόγω των βελτιώσεων καναλιών και αναχωμάτων. Ειδικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα περιλαμβάνουν πολλαπλές αναλύσεις σχεδίων, υπολογισμούς πολλαπλών προφίλ, ανάλυση πολλαπλών γεφυρών και οχετών, και βελτιστοποίηση του διαχωρισμού ροής.

- **προσομοίωση μη-μόνιμης ροής:**
αυτή η δυνατότητα πραγματοποιεί εξομοίωση της οιονεί-δισδιάστατης μη-μόνιμης ροής διαμέσου ενός πλήρους δικτύου ανοικτών αγωγών. Η έκδοση 3.1 του HEC, μπορεί να πραγματοποιήσει υπολογισμούς μεικτής ροής (υποκρίσιμη, υπερκρίσιμη, υδραυλικά άλματα, καταρράκτες), στην ενότητα των υπολογισμών ασταθούς ροής. Οι υδραυλικοί υπολογισμοί για διατομές, γέφυρες, αγωγούς και άλλες υδραυλικές κατασκευές που αναπτύχθηκαν στο τμήμα της σταθερής ροής, ισχύουν και στην ενότητα αυτή της μη-μόνιμης ροής.
- **υπολογισμούς μεταφοράς ιζημάτων στα όρια του συστήματος:**
η μοντελοποίηση προορίζεται για τον υπολογισμό της μεταφοράς φερτών υλών και της μεταβλητότητας των ορίων του συστήματος, σε μονοδιάστατη ροή. Η μεταβλητότητα των ορίων προέρχεται από τη συνεχή μεταφορά και απόθεση φερτών υλών στα όρια, κατά τη διάρκεια μεγάλων χρονικών διαστημάτων. Τυπική περίοδος είναι το έτος αν και μπορούν να συμβούν μεμονωμένα γεγονότα, όπως πλημμύρα σε μικρότερα χρονικά διαστήματα. Η δυνατότητα μεταφοράς φερτών υλών από το υδατόρρευμα υπολογίζεται συναρτήσει του μεγέθους των κόκκων των φερτών υλικών επιτρέποντας την προσομοίωση με αυτό τον τρόπο της υδραυλικής ταξινόμησης. Σημαντικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα περιλαμβάνουν τη δυνατότητα διαμόρφωσης πλήρους δικτύου ρευμάτων, εκβάθυνσης ανοικτών αγωγών, διάφορες εναλλακτικές λύσεις αναχωμάτων, καθώς και τη χρήση διάφορων εξισώσεων για τον υπολογισμό της μεταφοράς ιζημάτων.

Ένα βασικό στοιχείο είναι ότι τα ανωτέρω τμήματα του HEC-RAS χρησιμοποιούν μια κοινή γεωμετρική αντιπροσώπευση στοιχείων και κοινές γεωμετρικές και υδραυλικές «ρουτίνες» υπολογισμού. Εκτός από τα τρία υδραυλικά τμήματα ανάλυσης, το σύστημα περιέχει διάφορα υδραυλικά χαρακτηριστικά σχεδιασμού που μπορούν να κληθούν μόλις υπολογιστούν τα βασικά σχεδιαγράμματα επιφάνειας ύδατος. Το πρόγραμμα HEC-RAS έχει σχεδιαστεί για να εκτελεί κατ' αρχή τους οιονεί-δισδιάστατους υδραυλικούς υπολογισμούς για ένα πλήρες δίκτυο φυσικών και τεχνητών ανοικτών αγωγών και κατά δεύτερο λόγο να προσφέρει μια περιγραφή των σημαντικότερων δυνατοτήτων του.

Το πρόγραμμα έχει την δυνατότητα να εισάγει γεωμετρικά δεδομένα με διάφορες μορφές. Αυτές οι μορφές περιλαμβάνουν, μορφή GIS (δημιουργείται από το HEC), μορφή USACE (standard surveyor format), μορφή δεδομένων του HEC-2, μορφή δεδομένων του HEC-RAS, μορφή γεωμετρικών δεδομένων UNET και τέλος μορφή δεδομένων MIKE11. Τα δεδομένα εισόδου μπορούν να εισαχθούν σ' ένα υπάρχον αρχείο γεωμετρίας του HEC-RAS ή σ' ένα εντελώς καινούριο αρχείο γεωμετρίας. Επίσης μπορούν να εισαχθούν πολλαπλά αρχεία δεδομένων σ' ένα γεωμετρικό αρχείο σε μια βάση πολλαπλών ρευμάτων.

Τα γραφικά περιλαμβάνουν σχέδια του ποτάμιου συστήματος σε δύο άξονες x-y, διατομές, προφίλ, καμπύλες εκτίμησης, υδρογραφήματα και πολλές άλλες υδραυλικές μεταβλητές. Επίσης παρέχεται η δυνατότητα τρισδιάστατης παρουσίασης πολλαπλών διατομών. Μια ακόμη δυνατότητα είναι η παρουσίαση των δεδομένων ή των αποτελεσμάτων της αναλύσεως υπό μορφή πινάκων. Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει από προκαθορισμένες μορφές πινάκων ή να αναπτύξει τη δική του μορφή. Ωστόσο, όλες οι μορφές δεδομένων εξόδου, είτε είναι σε μορφή πινάκων, είτε σε μορφή γραφικών, μπορούν να εμφανιστούν στην οθόνη, να σταλθούν απευθείας στον εκτυπωτή ή στον plotter, ή να περάσουν μέσω των Windows σ' άλλο τύπο λογισμικού, όπως σ' έγγραφο του Word ή σε φύλλο εργασίας του Excel.

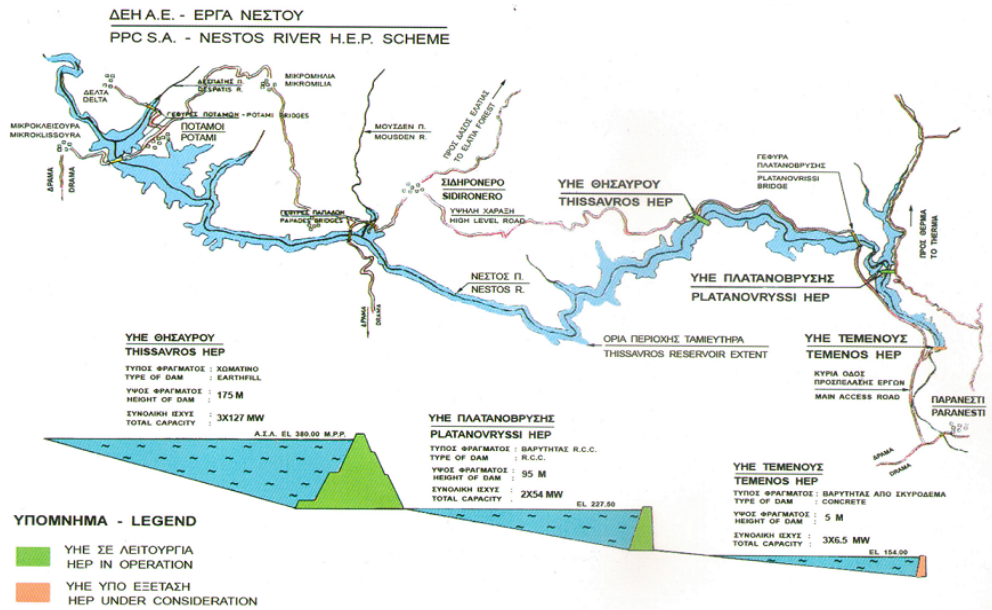
Στην ορολογία του HEC-RAS ένα πρόγραμμα (Project) είναι ένα σύνολο από αρχεία δεδομένων, που συνδέονται με ένα συγκεκριμένο ποτάμιο σύστημα. Ο χρήστης μπορεί να εκτελέσει οποιουσδήποτε ή όλους τους τύπους ανάλυσης, που περιλαμβάνονται στο πακέτο του HEC-RAS, ως μέρος του προγράμματος (Project). Τα αρχεία δεδομένων κατηγοριοποιούνται ως,

- σχεδιασμού (plan data),
- γεωμετρίας (geometric data),
- μόνιμης ροής (steady flow data),
- μη-μόνιμης ροής (unsteady flow data),
- φερτών υλών (sediment data) και
- υδραυλικού σχεδιασμού (hydraulic design data).

Η περιοχή μελέτης είναι μεταξύ της τοποθεσίας του φράγματος του Θησαυρού έως και την πόλη του Παρανεστίου. Τα δεδομένα της γεωμετρίας της τοποθεσίας αυτής του ποταμού, προέρχονται κύρια από την ιστοσελίδα <http://www.zonums.com> και συγκεκριμένα από το on-line πρόγραμμα παροχής γεωγραφικών δεδομένων που παρέχονται στον ιστότοπο <http://www.zonums.com/gmaps/digipoint3.com> και δευτερευόντως από την Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού.

3. ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΕΡΓΟ ΘΗΣΑΥΡΟΥ, ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΟΥ ΧΩΡΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Η ενεργειακή ανάπτυξη περιλαμβάνει δύο υδροηλεκτρικά έργα εν σειρά, ήτοι το του Θησαυρού, Σχήμα 1 και αυτό της Πλατανόβρυσης. Τα έργα αυτά τέθηκαν σ' λειτουργία την περίοδο 1998–1999 και καλύπτουν τις απαιτήσεις ενέργειας αιχμής του δικτύου λειτουργώντας λίγες ώρες της ημέρας.



Σχήμα 1. Σχηματική απεικόνιση των υδροηλεκτρικών έργων του Νέστου (ΔΕΗ)

Το έργο του Θησαυρού, Σχήμα 2, αποτελείται από μία σήραγγα εκτροπής μήκους 650.0 m, ένα λιθόρριπτο φράγμα με κεντρικό αργιλικό πυρήνα, μέγιστου ύψους 172.0 m και συνολικού όγκου $12.0 \times 10^6 \text{ m}^3$, έναν εκχειλιστή με τρία θυροφράγματα μέγιστης παροχτευτικότητας $6.0 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{sec}$ και ένα υπόγειο συγκρότημα παραγωγής ενέργειας. Το φράγμα είναι το ψηλότερο και μεγαλύτερο σε όγκο χωμάτινο που κατασκευάστηκε ποτέ στην Ελλάδα. Η υψομετρική διαφορά της στέφης του φραγματος του Θησαυρού και της κοίτης του Νέστου ποταμού αμέσως νότια από το Παρανέστι είναι 252.0 m, ενώ η αντίστοιχη διαφορά από τη θεμελίωσή του είναι 142.0 m.



Σχήμα 2. Υδροηλεκτρικό έργο Θησαυρού (ΔΕΗ)

Το τμήμα που εξετάζεται περιλαμβάνει το φράγμα του Θησαυρού, το φράγμα της Πλατανόβρυσης και την περιοχή περιμετρικά της πόλεως του Παρανεστίου, Σχήμα 3. Η

απόσταση από το φράγμα Θησαυρού μέχρι την κοίτη του ποταμού Νέστου που βρίσκεται αμέσως νότια του Δ.Δ. Παρανεστίου, είναι σ' ευθεία γραμμή περί τα 17.0 km. Το μήκος της κοίτης του σε αυτή τη διαδρομή ξεπερνά τα 22.0 km λόγω μαιάνδρων και της καμπυλότητας που παρουσιάζει μεταξύ των δύο θέσεων.

Το βασικότερο ερώτημα που τίθεται είναι: σε περίπτωση μερικής ή ολικής καταστροφής του φράγματος Θησαυρού, τι επιπτώσεις και επιδράσεις θα υποστεί η περιοχή από τα πλημμυρικά κύματα τόσο του Δ.Δ. Παρανεστίου όσο και των πέριξ αυτού οικισμών; Η μελέτη αυτή προσπαθεί να απαντήσει στο παραπάνω ερώτημα, εξετάζοντας το πλημμυρικό κύμα που θα προέλθει από την αστοχία αυτή, σε διάφορες πλημμυρικές παροχές του ποταμού. Από τα αποτελέσματα αυτών θα προκύψουν ορισμένα συμπεράσματα, τα οποία κατά την άποψη των συγγραφέων μπορούν να βοηθήσουν στη λήψη μελλοντικών μέτρων αντιμετώπισης των πιθανών ζημιών που θα προκληθούν. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ακόμη, ότι αυτός ο τρόπος μελέτης, δηλ. της ανάλυσης του προβλήματος μέσω προγράμματος ηλεκτρονικού υπολογιστή, είναι σχετικώς ανέξοδος και πολύ γρήγορος, σε σχέση με μελέτη μέσω κατασκευής πειραματικού ομοιώματος, η οποία είναι και οικονομικά δαπανηρή αλλά και χρονοβόρος.

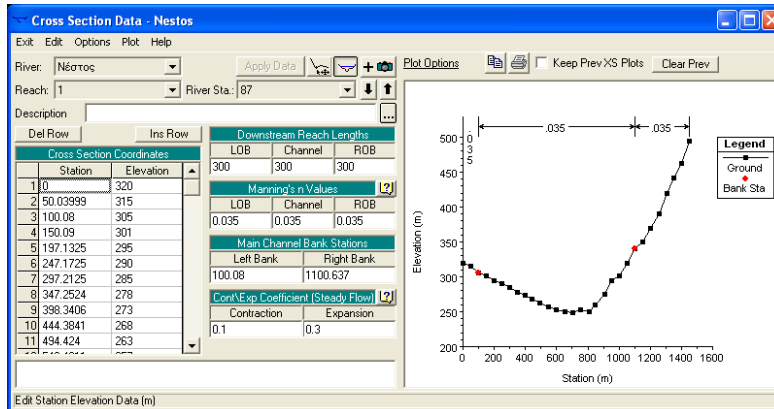


Σχήμα 3. Κάτοψη ποτάμιου συστήματος Νέστου που χρησιμοποιήθηκε για την υπολογιστική ανάλυση

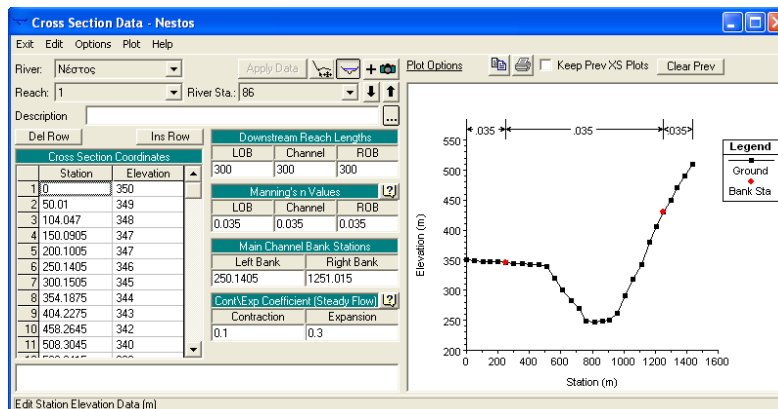
Για την μελέτη χρησιμοποιήθηκαν οι τοπογραφικοί χάρτες που πάρθηκαν, από τον ιστότοπο <http://www.zonums.com/gmaps/digipoint3.html>. Οι χάρτες αυτοί αποτέλεσαν την τοπογραφική υποδομή για την αναπαράσταση του εν λόγω τμήματος μέσω του προγράμματος. Οι απαιτούμενες παράμετροι έχουν δοθεί άλλες από τους χάρτες και άλλες από το πρόγραμμα. Έτσι, ο συντελεστής n του Manning επιλέχθηκε 0.035 λόγω της σύνθεσης της κοίτης με βάση τον σχετικό πίνακα (Manning's n Information Table), ενώ οι συντελεστές συστολής και διαστολής τέθηκαν ίσοι με 0.1 και 0.3 αντίστοιχα, λαμβάνοντας υπόψη τον σχετικό πίνακα (Contraction and Expansion Information Table).

Το ποτάμιο σύστημα του τμήματος αυτού του Νέστου που μοντελοποιείται αποτελείται από 87 διατομές. Τα παρακάτω Σχήματα 4 και 5 δείχνουν με λεπτομέρεια τις

δύο πρώτες διατομές. Να σημειωθεί ότι η 1^η ανάντη διατομή, δηλ. αυτή στο φράγμα του Θησαυρού αναγνωρίζεται ως η 87^η, η 2^η ως 86^η διατομή και ούτω καθ' εξής. Με την εισαγωγή όλων των τοπογραφικών δεδομένων δημιουργήθηκαν οι αντίστοιχες διατομές οι οποίες περιγράφουν την απεικόνιση του ποτάμιου συστήματος Νέστου. Στα σχήματα της επόμενης παραγράφου αποτυπώνεται σε τρισδιάστατη μορφή η κάτοψη αυτών των διατομών όπου στο ανάντη άκρο της κοίτης του ποταμού τοποθετείται το φράγμα Θησαυρού και στο κατάντη το Δ.Δ. Παρανεστίου.



Σχήμα 4. Διατομή 87

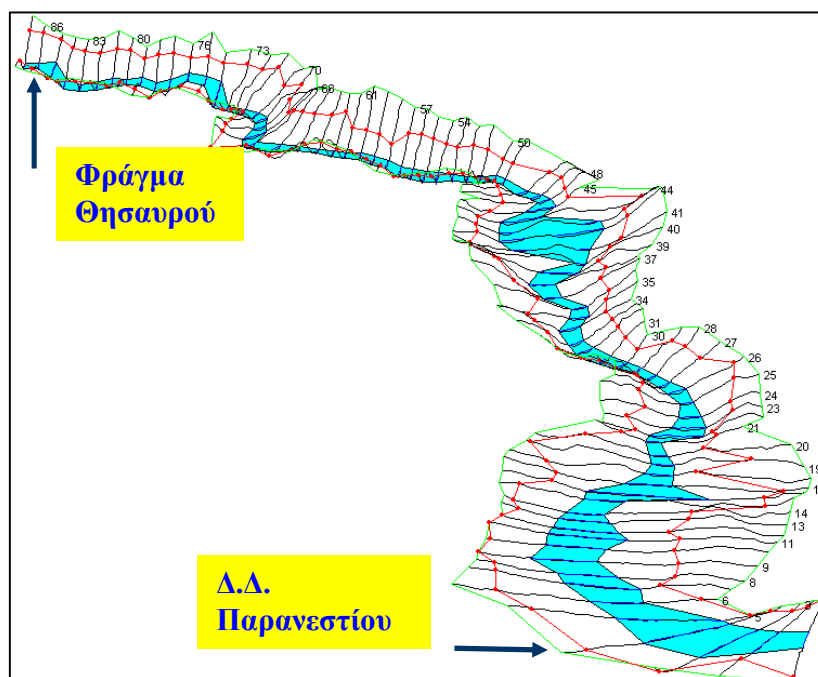


Σχήμα 5. Διατομή 86

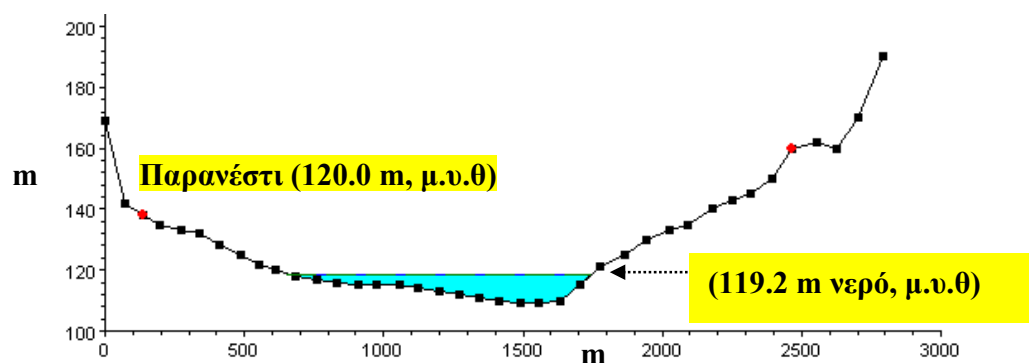
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 ΣΤΑΘΕΡΗ ΠΑΡΟΧΗ $Q=10000.0 \text{ m}^3/\text{s}$

Οι παροχές που βρίσκονται κάτωθι του ορίου των $10000.0 \text{ m}^3/\text{s}$ δεν παρουσιάζουν σημαντικά προβλήματα ασφάλειας στο Δ. Δ. Παρανεστίου. Η παροχή όμως των $10000.0 \text{ m}^3/\text{s}$ πλησιάζει απειλητικά το όριο του Δ.Δ. Παρανεστίου και αναλύεται διεξοδικώς. Στο Σχήμα 6 λοιπόν παρουσιάζεται, σε τρισδιάστατη μορφή, η πλημμυρική ροή του ποταμού Νέστου. Στο Σχήμα 7 δείχνεται το υψόμετρο της ελεύθερης επιφάνειας (από το μέσο ύψος θαλάσσης, μ.υ.θ.) του νερού σε σχέση με την ενδιαφερόμενη περιοχή του Δ.Δ. Παρανεστίου. Η στάθμη του νερού καλύπτει ένα τμήμα του Δ.Δ. Παρανεστίου και πιθανόν να υπάρχουν με την παροχή αυτή και οι πρώτες σημαντικές καταστροφές σε κτίσματα, κ.ά. Η συγκεκριμένη παροχή χαρακτηρίζεται ως οριακά καταστροφική.



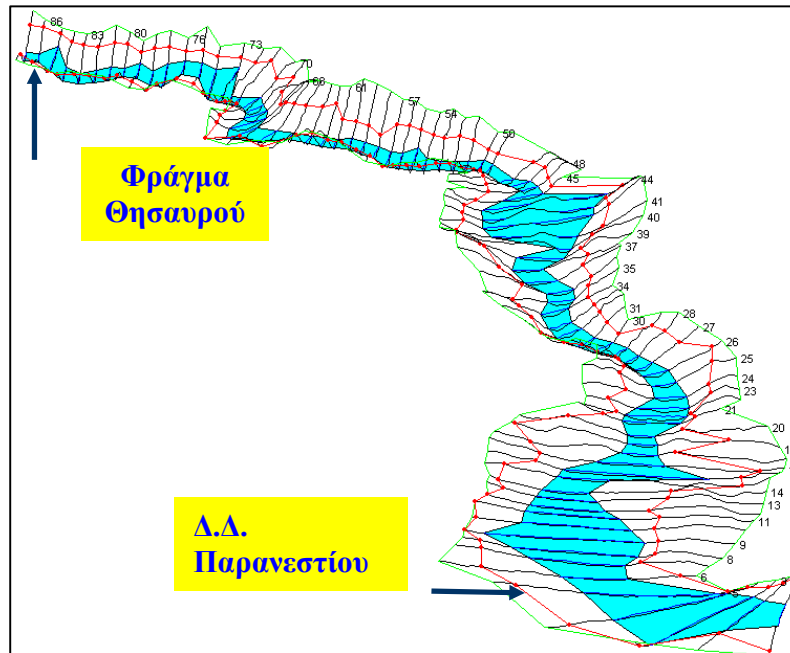
Σχήμα 6. Σε κάτοψη το πλάτος πλημμυρικού πεδίου του Νέστου ποταμού με παροχή $10000.0 \text{ m}^3/\text{s}$



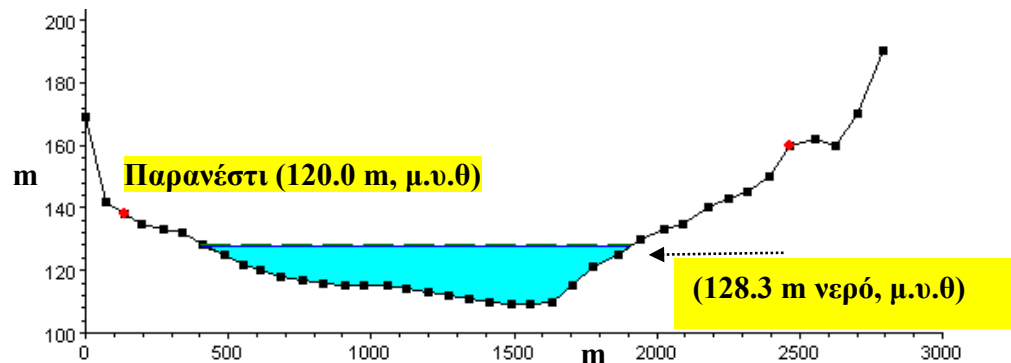
Σχήμα 7. Υψόμετρο της ελεύθερης επιφάνειας (από το μέσο ύψος θαλάσσης, μ.υ.θ.) του νερού στο Δ.Δ. Παρανεστίου, για παροχή $10000.0 \text{ m}^3/\text{s}$

4.2. ΣΤΑΘΕΡΗ ΠΑΡΟΧΗ $Q=50000.0 \text{ m}^3/\text{s}$

Η έκτη και τελευταία δοκιμή γίνεται με σταθερή παροχή $50.000 \text{ m}^3/\text{s}$. Πρόκειται για μία πολύ μεγάλη τιμή παροχής. Στο Σχήμα 8 φαίνεται το τρισδιάστατο πλάνο ροής του τμήματος του ποταμού Νέστου που μελετάται με την συγκεκριμένη παροχή. Στο Σχήμα 9 δείχνεται το υψόμετρο της ελεύθερης επιφάνειας (μέσο ύψος θαλάσσης, μ.υ.θ.) του νερού σε σχέση με την ενδιαφερόμενη περιοχή του Δ.Δ. Παρανεστίου. Η στάθμη του νερού καλύπτει πλήρως το Δ.Δ. Παρανεστίου. Η συγκεκριμένη παροχή θα πλημμυρίσει την πόλη με το βάθος του νερού να φθάνει τα 8.3 m.



Σχήμα 8. Σε κάτοψη το πλάτος πλημμυρικού πεδίου του Νέστου ποταμού με παροχή 50000.0 m³/s

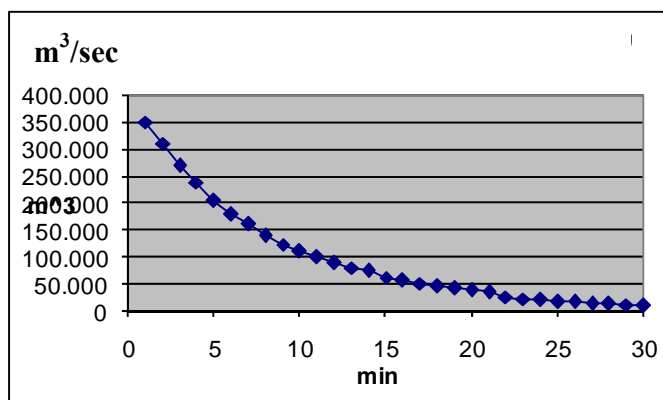


Σχήμα 9. Υψόμετρο της ελεύθερης επιφάνειας (μέσο ύψος θαλάσσης, μ.υ.θ.) του νερού στο Δ.Δ. Παρανεστίου, για παροχή 50000.0 m³/s

4.3 ΜΗ-ΣΤΑΘΕΡΗ ΠΑΡΟΧΗ

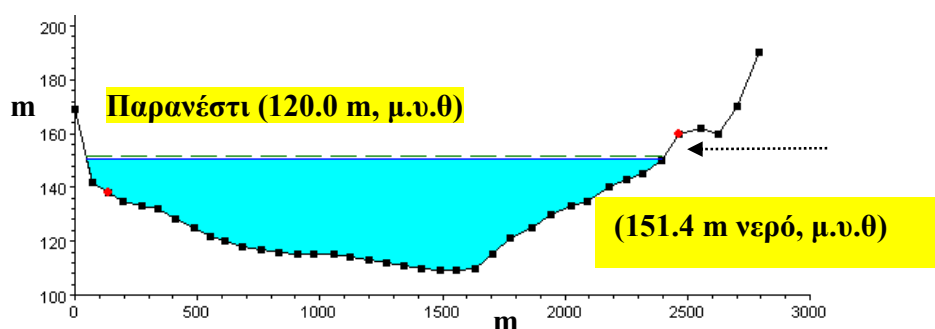
Εξετάζεται μία μεταβαλλόμενη στο χρόνο παροχή σε μία ολική κατάρρευση του φράγματος. Υποτίθεται ότι το εν λόγω φράγμα είναι πλήρες ύδατος μέχρι και τη στέψη του και ότι σε διάστημα μερικών δευτερόλεπτων υπάρχει ολική κατάρρευσή του. Με την άμεση θραύση, η επιφάνεια του ταμιευτήρα ταπεινώνεται στα 4/9 του συνολικού του ύψους, και το βάθος του ύδατος υπολογίζεται ως, $170.0 \times (4.0/9.0) = 75.55$ m. Με την άμεση πτώση της επιφάνειας του ταμιευτήρα, το πλημμυρικό κύμα θα αποκτήσει ταχύτητα ίση με: $u = (2gh)^{1/2}$ άρα $u = (2.0 \times 9.81 \times 75.55)^{1/2} = 38.5$ m/sec. Για να υπολογισθεί το εμβαδόν διατομής του φράγματος από το οποίο διέρχεται το νερό θεωρείται το χωμάτινο φράγμα ως ένα ισοσκελές τρίγωνο όπου η βάση του είναι η στέψη του φράγματος με μήκος 600.0 m, οπότε στα 75.55 m ύψος θα υπάρξει τώρα η βάση των 263.0 m. Άρα, το εμβαδόν διατομής

κατά την άμεση θραύση θα είναι: $A=0.5 \times 75.55 \times 263.0=9930.0 \text{ m}^2$. Προκύπτει λοιπόν μία παροχή της τάξεως, $Q=uA \approx 380000.0 \text{ m}^3/\text{sec}$. Η παροχή της τάξεως των $350000.0 \text{ m}^3/\text{sec}$ θεωρείται ότι αντιπροσωπεύει ικανοποιητικά τη μέγιστη παροχή σε μία ολική κατάρρευση του φράγματος. Το σενάριο αυτό κατ' αρχή θα έχει παραβολική μορφή, όπου στον άξονα x τοποθετείται ο χρόνος, με διάρκεια πλημμυρικού κύματος ίση με 30.0 min και στον άξονα y η παροχή σε m^3/sec , Σχήμα 10. Ο συνολικός όγκος που εκφορτίζεται από τον ταμιευτήρα στο αντίστοιχο χρονικό διάστημα έχει μία απώλεια της τάξεως των $175.0 \times 10^6 \text{ m}^3$ νερού. Σημειώνεται ότι ο όγκος αυτός αντιστοιχεί στο 1/3 της δυναμικότητας του ταμιευτήρα, η οποία όπως αναφέρθηκε είναι της τάξεως των $565.0 \times 10^6 \text{ m}^3$.



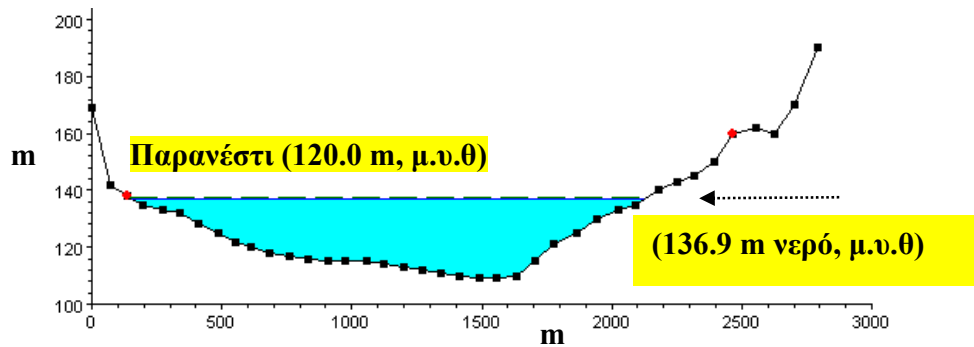
Σχήμα 10. Πιθανό σενάριο παροχής πλημμυρικού κύματος-χρόνου

Ο όγκος με $350000.0 \text{ m}^3/\text{sec}$ νερού ο όγκος που εκφορτίζεται από τον ταμιευτήρα είναι ίσος μ' αυτόν που εκφορτίζεται με τη σταθερή παροχή των $10000.0 \text{ m}^3/\text{sec}$ σε διάστημα 30.0 min . Η βασική διαφορά μεταξύ των δύο παροχών έγκειται στο χρόνο άφιξης του πλημμυρικού κύματος της σταθερής παροχής, η οποία επιβραδύνεται κατά 10.0 min . Σε όλες τις διατομές το επίπεδο της στάθμης του νερού μετά από 28.0 min , ταπεινώνεται στο επίπεδο στάθμης της σταθερής παροχής των $10000.0 \text{ m}^3/\text{sec}$. Στο Σχήμα 11 δείχνεται το υψόμετρο της ελεύθερης επιφάνειας (μ.υ.θ.) του νερού σε σχέση με την ενδιαφερόμενη περιοχή του Δ.Δ. Παρανεστίου.



Σχήμα 11. Δ.Δ. Παρανεστίου με χρονικά μεταβαλλόμενη παροχή στα $350000.0 \text{ m}^3/\text{sec}$. Άφιξη του πλημμυρικού κύματος σε 20.0 min . Ο οικισμός πλημμυρίζει έως τα 23.0 min

Η παροχή των $175000.0 \text{ m}^3/\text{sec}$ νερού θα υπάρξει όταν το φράγμα θα έχει υποστεί άμεση και ολική καταστροφή αλλά με τον ταμιευτήρα σε πλήρωση κατά τα $\frac{3}{4}$ αυτού. Η ανάλυση είναι παρόμοια της πλήρους καλύψεως του ταμιευτήρα. Βλέπε Σχήμα 12.



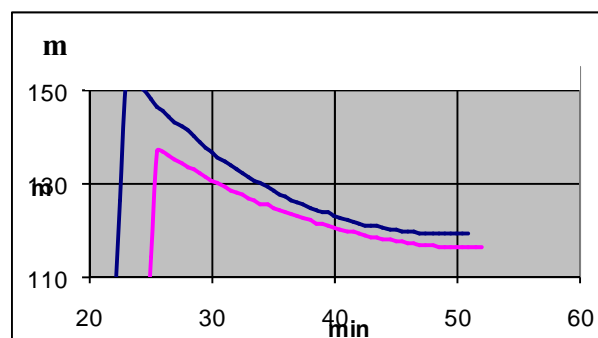
Σχήμα 12. Δ.Δ. Παρανεστίου μη-σταθερή παροχή στα 175000.0 m³/sec.

Άφιξη του πλημμυρικού κύματος σε 25.5 min. Ο οικισμός πλημμυρίζει έως τα 28.5 min

Η ταχύτητα που παρουσιάζεται στον Πίνακα 1, είναι η μέση ταχύτητα της όδευσης ροής. Τέλος, στο Σχήμα 13 παρουσιάζεται το υψόμετρο της στάθμης του νερού συναρτήσει του χρόνου άφιξης του πλημμυρικού κύματος. Στο σενάριο της μη-σταθερής παροχής των 350000.0 m³/sec, ο χρόνος άφιξης του πλημμυρικού κύματος είναι στα 20.0 min με μέγιστο μ.υ.θ στα 151.4 m σε 23.0 min, και για 28.0 min μετά την άφιξη το υψόμετρο ταπεινώνεται στα 119.2 m, όπου είναι το υψόμετρο στάθμης του σεναρίου σταθερής παροχής των 10000.0 m³/sec.

Πίνακας 4.1 Παροχή-ταχύτητα-χρόνος πλημμυρικού κύματος (να φτάσει από τη θραύση του φράγματος του Θησαυρού μέχρι το Δ.Δ. Παρανεστίου) σταθερών παροχών

α/α	Q m ³ /sec	u m/sec	t hr
1	1000.0	2.34	2.37
2	3000.0	3.32	1.67
3	10000.0	4.88	1.14
4	20000.0	5.98	0.92
5	35000.0	6.92	0.80
6	50000.0	7.28	0.76



Σχήμα 13. Στάθμη νερού (μ.υ.θ) στο Δ.Δ. Παρανεστίου για 175000.0 m³/sec (μώβ γραμμή) και 350000.0 m³/sec (μπλέ γραμμή) συναρτήσει του χρόνου άφιξης

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παροχή των 10000.0 m³/sec κατακλύζει οριακά το Δ. Δ. Παρανεστίου. Τα σενάρια με τη μη-σταθερή παροχή των 350000.0 m³/sec και 175000.0 m³/sec νερού, υπολογίστηκαν με την άμεση κατάρρευση του φράγματος του Θησαυρού. Οι παροχές αυτές, θα έχουν ολέθριες επιδράσεις στο Δ.Δ. Παρανεστίου και των πέριξ σ' αυτό οικισμούς. Οι κάτοικοι των οικισμών αυτών θα έχουν στην διάθεσή τους περί τα 20.0 min, για την απομάκρυνσή τους από τους οικισμούς. Ο χρόνος άφιξης του πλημμυρικού κύματος με τη σταθερή παροχή των 50000.0 m³/sec νερού είναι διπλάσιος απ' αυτόν της δυσμενέστερης μη-σταθερής παροχής. Ο χρόνος αυτός θεωρείται ότι είναι ικανο-ποιητικός για την απομάκρυνση των κατοίκων εφόσον εγκατασταθεί σύστημα εγκαίρου προειδοποιήσεως.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Bellos, C.V., Soulis J.V. and Sakkas J.G., 1991. *Computation of two-dimensional dam-break induced flows*. Adv. Water Resources, Vol. 14, No 1:31–41.
- Fread, D.L. and Jin, M., 1993. *Real-time dynamic flood routing with NWS FLDWAY model using Kalman filter updating*, Engineering hydrology, Y.K. Chin, ed., ASCE, New York, N.Y., 946 – 951.
- Soulis, J.V., 1992. *Computation of two-dimensional dam-break flood flows*. International Journal for Numerical Methods in Fluids, Vol. 14: 631–664.
- Κατηρτζόγλου, Α., 2006. *Υπολογιστική ανάλυση ποτάμιας υδραυλικής: Περίπτωση ποταμού Κομνάτου στο Νομό Ροδόπης*. Τομέας Υδραυλικών Έργων, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Ξάνθη.
- Μαμάσης, Ν., 2009. *Πλημμύρες και αντιπλημμυρικά έργα, φυσικό και πιθανοτικό πλαίσιο πλημμυρών. Πολιτικές πρόληψης-μετριασμού των πλημμυρικών καταστροφών*. Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων, Αθήνα.
- Πολίτης, Μ.Γ. και Μέμος, Κ.Δ., 2008. *Διάδοση κυμάτων λόγω θραύσης φραγμάτων σε σειρά*. 1^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Μεγάλων Φραγμάτων, ΤΕΕ–Τμ. ΚΔΘ, Λάρισα.
- Σούλης Ι. Β., 1999. *Υδραυλική Ανοικτών Αγωγών*. Εκδ. Αιβάζης, Θεσσαλονίκη.
- Σούλης, Ι.Β., 2004. *Υπολογιστική Μηχανική Ρευστών*. Εκδ. Αιβάζης, Θεσσαλονίκη.
- Στάμου, Α.Ι., 2008. *Μαθηματική προσομοίωση της αστοχίας φράγματος*. 1^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Μεγάλων Φραγμάτων, ΤΕΕ–Τμ. ΚΔΘ, Λάρισα.

Διαδικτυακοί τόποι

<http://www.zonums.com>

<http://www.zonums.com/gmaps/digipoint3.com>

[http:// www.hec.usace.army.mil/.../hec-ras/hecras-download.html](http://www.hec.usace.army.mil/.../hec-ras/hecras-download.html)

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΡΕΥΜΑΤΩΝ ΘΟΛΟΤΗΤΑΣ ΣΤΑΘΕΡΟΥ ΟΓΚΟΥ ΣΤΗ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΤΗΣ ΑΡΧΙΚΗΣ ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΣΥΣΤΑΣΗΣ

A. Γεωργουλός, Κ. Κοπασάκης, Π. Αγγελίδης*, Ν. Κωτσοβίνος

Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Δ.Π.Θ., Βασ. Σοφίας 12, 67100 Ξάνθη
*Στοιχεία επικοινωνίας: ageorg@civil.duth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ρεύματα θολότητας σταθερού όγκου δημιουργούνται στην φύση από την ξαφνική αστοχία εναποθέσεων φερτών υλών στον πυθμένα της θάλασσας, λιμνών ή ταμιευτήρων (υποβρύχιες κατολισθήσεις). Το μείγμα νερού-αιωρούμενων σωματιδίων της ξαφνικής αιώρησης έχει μεγαλύτερη πυκνότητα από το περιβάλλον νερό δημιουργώντας ένα ρεύμα θολότητας. Τα εν λόγω ρεύματα αποτελούν έναν από τους βασικότερους υποβρύχιους μηχανισμούς μεταφοράς και εναπόθεσης φερτών υλών. Στην παρούσα εργασία πραγματοποιείται χρήση μεθόδων υπολογιστικής δυναμικής ρευστών με σκοπό τη διερεύνηση της απόκρισης ρευμάτων θολότητας, σταθερού όγκου, στην διακύμανση της κοκκομετρίας των αιωρούμενων φερτών σωματιδίων και της κοκκομετρικής σύστασης της αρχικής αιώρησης.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Ρεύματα θολότητας, μεταφορά φερτών υλών, κοκκομετρική σύσταση, υπολογιστική δυναμική ρευστών

NUMERICAL INVESTIGATION OF CONSTANT-VOLUME TURBIDITY CURRENTS RESPONSE TO THE VARIATION OF THE INITIAL GRAIN SIZE COMPOSITION

A. Georgoulas, K. Kopasakis, P. Angelidis*, N. Kotsovinos

Civil Engineering Department, Democritus University of Thrace,
Vas. Sofias 12, GR-67100 Xanthi, Greece.

*Corresponding author: ageorg@civil.duth.gr

ABSTRACT

In nature, constant-volume turbidity currents are formed from the sudden collapse of settled sediment particles at the bottom of the sea, lakes or reservoirs (subaqueous landslides). The water-suspended sediment mixture of the sudden suspension has a greater density than the ambient water, forming a turbidity current. These currents constitute one of the major subaqueous mechanisms of suspended sediment transport and deposition. In the present paper, Computational Fluid Dynamics (CFD) methods are used, aiming to investigate constant-volume turbidity currents response, in the variation of suspended sediment grain size and grain composition of the initial suspension.

KEY WORDS: Turbidity currents, suspended sediment transport, grain composition, computational fluid dynamics

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα ρεύματα θολότητας σταθερού όγκου δημιουργούνται στην φύση από την ξαφνική αστοχία εναποθέσεων φερτών υλών στον πυθμένα της θάλασσας, λιμνών ή ταμιευτήρων (υποβρύχιες κατολισθήσεις). Το μείγμα νερού-αιωρούμενων σωματιδίων της ξαφνικής αιώρησης έχει μεγαλύτερη πυκνότητα από το περιβάλλον νερό δημιουργώντας ένα ρεύμα θολότητας σταθερού όγκου. Τα εν λόγω ρεύματα αποτελούν έναν από τους βασικότερους υποβρύχιους μηχανισμούς μεταφοράς και εναπόθεσης φερτών υλών. Από το 1950 είχε αναγνωριστεί ότι τα ρεύματα θολότητας μπορούν να δημιουργηθούν από αστοχία φερτών υλών στον κεκλιμένο πυθμένα του ωκεανού (Heezen et al., 1952; Gorsline et al., 2000). Οι περισσότερες από αυτές τις υποθαλάσσιες αστοχίες οφείλονται σε σεισμούς (Heezen et al., 1952), αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις είναι απλά το αποτέλεσμα εναποθέσεων φερτών υλών σε κεκλιμένους πυθμένες, οι οποίες συνήθως αυξάνουν υπερβολικά την κλίση του πυθμένα (Girardclos et al., 2007).

Πολλοί ερευνητές, στη βιβλιογραφία, έχουν χρησιμοποιήσει εργαστηριακούς αγωγούς οριζόντιου πυθμένα (flumes), για τη διεξαγωγή εργαστηριακών πειραμάτων δημιουργίας περιορισμένων πλευρικά ρευμάτων θολότητας ή γενικότερα ρευμάτων πυκνότητας σταθερού όγκου, από απότομο άνοιγμα θυροφράγματος (lock-gate experiments) (Middleton, 1966; Kneller et al., 1991; Dade και Huppert, 1994; Gladstone et al., 1998; Felix et al., 2005). Διατάξεις θυροφράγματος χρησιμοποιούνται, επίσης, και σε πολλές αριθμητικές διερευνήσεις, όπου μελετώνται διάφορα χαρακτηριστικά της ροής ρευμάτων θολότητας και πυκνότητας (Hartel et al., 2000; Necker et al., 2002; Ooi et al., 2007). Στις εν λόγω περιπτώσεις το θυρόφραγμα χρησιμοποιείται για τον αρχικό διαχωρισμό του ελαφρύτερου ρευστού (συνήθως νερό βρύσης) από το βαρύτερο ρευστό (π.χ. αλμυρό νερό, μείγμα γλυκού νερού - αιωρούμενων στερεών σωματιδίων).

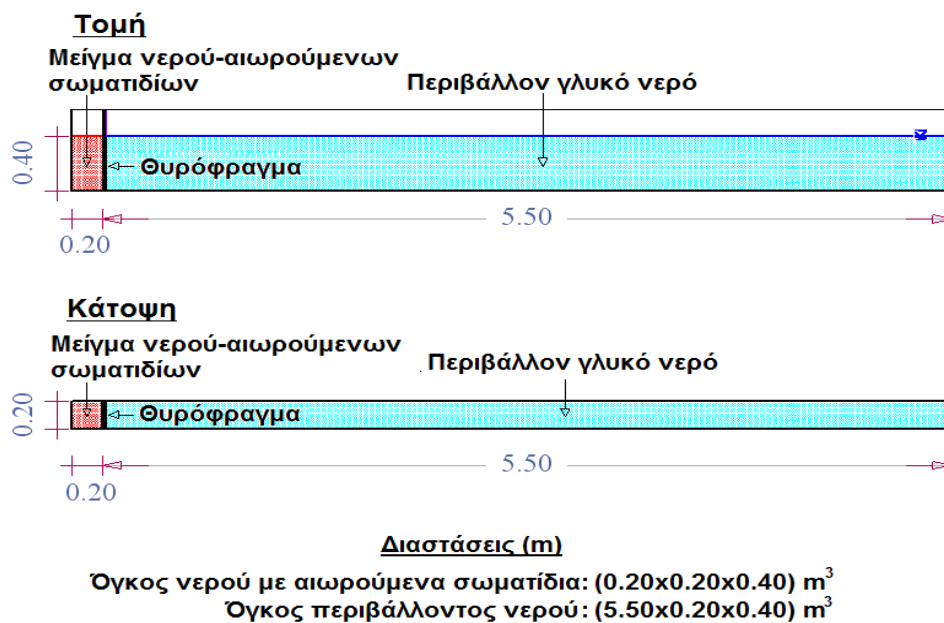
Ο βασικός στόχος της παρούσας εργασίας είναι η χρήση μεθόδων υπολογιστικής δυναμικής ρευστών (CFD), που προσφέρονται από το εμπορικό λογισμικό ANSYS Fluent, για τη διερεύνηση της απόκρισης ρευμάτων θολότητας, χαμηλής, σχετικά, συγκέντρωσης αιωρούμενων φερτών υλών, και σταθερού όγκου, στη διακύμανση της κοκκομετρικής σύστασης των αιωρούμενων φερτών σωματιδίων. Εξετάζονται επτά μονοσωματιδιακά ρεύματα (monodisperse currents), με διαφορετικές διαμέτρους κόκκων, καθώς και πολυσωματιδιακά ρεύματα (polydisperse currents) που το καθένα πέντε διαφορετικές κλάσεις (διαμέτρους) αιωρούμενων σωματιδίων. Συγκεκριμένα, εφαρμόζεται ένα τρισδιάστατο, πολυφασικό αριθμητικό μοντέλο, για την διεξαγωγή δύο διαφορετικών σειρών παραμετρικών αριθμητικών πειραμάτων, αναπαράγοντας αριθμητικά την εργαστηριακή διάταξη που χρησιμοποιείται στην εργασία των Gladstone et al., (1998). Στα εν λόγω εργαστηριακά πειράματα, οι Gladstone et al., (1998) εξετάζουν με λεπτομέρεια δύο μονοσωματιδιακά ρεύματα θολότητας, τα οποία εμπεριέχουν αιωρούμενα στερεά σωματίδια ανθρακοπυριτίου με διάμετρο κόκκου, 25 μm και 69 μm αντίστοιχα, καθώς και πέντε ρεύματα, τα οποία εμπεριέχουν τις δύο παραπάνω κλάσεις σωματιδίων, με διαφορετική, σε κάθε περίπτωση, αρχική αναλογία. Επομένως, στην παρούσα εργασία, επεκτείνεται στην ουσία, αριθμητικά, η παραμετρική διερεύνηση των Gladstone et al., (1998), μέσω της διεξαγωγής μιας αρχικής σειράς αριθμητικών πειραμάτων μονοσωματιδιακών ρευμάτων θολότητας, όπου εξετάζεται ένα ευρύ σχετικά φάσμα διαμέτρων κόκκου αιωρούμενων στερεών σωματιδίων, και μιας δεύτερης σειράς, όπου εξετάζονται πολυσωματιδιακά ρεύματα θολότητας, τα οποία εμπεριέχουν πέντε διαφορετικές κλάσεις σωματιδίων, από αυτές, που εξετάζονται μεμονωμένα αρχικά (πρώτη σειρά αριθμητικών πειραμάτων). Στην εν λόγω σειρά αριθμητικών πειραμάτων, κυμαίνεται τόσο η διάμετρος του κόκκου των

σωματιδίων των κλάσεων που συμμετέχουν στο αρχικό μείγμα γλυκού νερού - αιωρούμενων φερτών υλών, όσο και το ποσοστό με το οποίο συμμετέχει η κάθε κλάση (κοκκομετρική σύσταση). Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα εν λόγω εργαστηριακά πειράματα καθώς και οι αριθμητικές προσομοιώσεις που παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία, αφορούν την μελέτη ρευμάτων σε σταθερό (μη διαβρώσιμο) και οριζόντιο πυθμένα.

Το αριθμητικό μοντέλο που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία, επιλύει τις «Reynolds-averaged Navier-Stokes» εξισώσεις, κατάλληλα τροποποιημένες προκειμένου να εφαρμοστούν σε μια πολυφασική ροή, όπως είναι η ροή ενός ρεύματος θολότητας. Το κλείσιμο των όρων τυρβώδους τάσεως (closure of turbulence stress terms), επιτυγχάνεται μέσω της εκδοχής “RNG” (Renormalization-group) του μοντέλου τύρβης k-ε (ANSYS Fluent 14.0 Documentation, 2012). Περισσότερες πληροφορίες μπορούν να βρεθούν στην εργασία των Georgoulas et al., (2010) στην οποία το εν λόγω αριθμητικό μοντέλο, προτείνεται, περιγράφεται αναλυτικά και ελέγχεται ως προς την αξιοπιστία του, αναπαράγοντας αριθμητικά τα εργαστηριακά πειράματα των Gladstone et al., (1998).

2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ

Η γεωμετρία και οι γενικότερες συνθήκες του υπό μελέτη φυσικού προβλήματος απεικονίζονται στο Σχήμα 1.

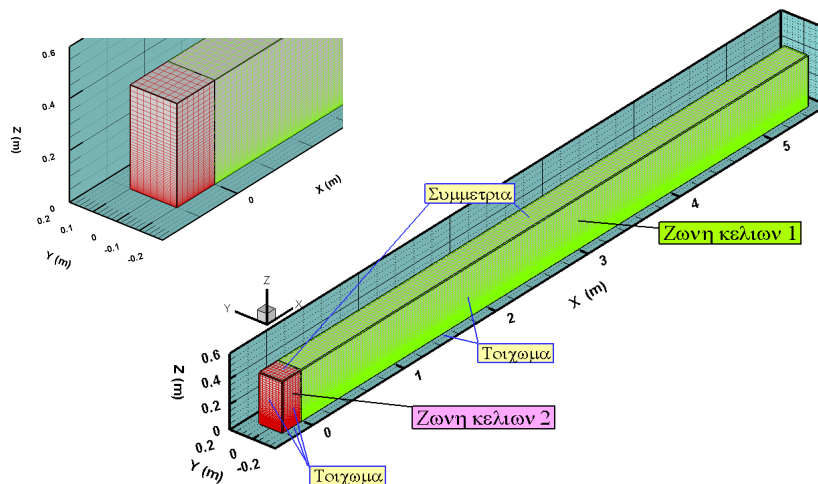


Σχήμα 1. Γενική διάταξη εξεταζόμενου προβλήματος. Οι οριζόντιες και κατακόρυφες αποστάσεις είναι σε m.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως η εν λόγω διάταξη έχει χρησιμοποιηθεί στην εργασία των Gladstone et al., (1998) για την διεξαγωγή εργαστηριακών πειραμάτων, όπου μείγματα γλυκού νερού-αιωρούμενων στερεών σωματιδίων, σταθερού όγκου, τα οποία εμπεριέχουν δύο διαφορετικά μεγέθη σωματιδίων ανθρακοπυριτίου, απελευθερώνονται σε περιβάλλον γλυκό νερό, μέσω μιας διάταξης ανταλλαγής ρευστών με τη βοήθεια θυροφράγματος (lock-gate experiments). Όπως φαίνεται, η εν λόγω πειραματική διάταξη αποτελείται από ένα γυάλινο, εργαστηριακό αγωγό αποθήκευσης νερού (flume tank), μήκους 5.7 m και πλάτους 0.2 m, γεμισμένο

με νερό βρύσης (tap water) σε συνολικό βάθος 0.4 m. Σε απόσταση 0.2 m από το ένα άκρο του αγωγού βρίσκεται τοποθετημένο, στην αρχή, ένα θυρόφραγμα, το οποίο διαχωρίζει τον αγωγό σε δύο όγκους: τον κατάντη από το θυρόφραγμα όγκο (όγκος περιβάλλοντος νερού ή όγκος εξάπλωσης, V_1) και τον ανάντη από το θυρόφραγμα όγκο (όγκος νερού με αιωρούμενα σωματίδια ή όγκος αιώρησης, V_2).

Η υπολογιστική γεωμετρία, το υπολογιστικό πλέγμα, καθώς και οι οριακές συνθήκες που εφαρμόστηκαν για τις αριθμητικές προσομοιώσεις της παρούσας εργασίας, απεικονίζονται στο Σχήμα 2.



Σχήμα 2. Υπολογιστική γεωμετρία, υπολογιστικό πλέγμα και οριακές συνθήκες αριθμητικών προσομοιώσεων.

Το υπολογιστικό πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε στις προσομοιώσεις, αποτελείται συνολικά από 68950 εξαεδρικά κελιά. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2, χρησιμοποιήθηκαν δύο ξεχωριστές ζώνες υπολογιστικών κελιών. Η πρώτη ζώνη κελιών αντιστοιχεί στον όγκο εξάπλωσης του καναλιού (ζώνη κελιών 1), ενώ η δεύτερη ζώνη αντιστοιχεί στον όγκο αιώρησης του καναλιού (ζώνη κελιών 2). Και στις δύο ζώνες χρησιμοποιήθηκε τοπική πυκνωση των κελιών κοντά στον πυθμένα του καναλιού. Για την πρώτη στρώση κελιών χρησιμοποιήθηκε ένα ύψος 2 mm από τον πυθμένα, ενώ το ύψος των επόμενων διαδοχικών στρώσεων αυξανόταν βαθμιαία με έναν παράγοντα 1.05. Οι διαστάσεις των υπολογιστικών κελιών στις X και Y διευθύνσεις διατηρήθηκαν σταθερές με τιμή 3 cm. Προκειμένου να διασφαλιστεί ότι η λύση είναι ανεξάρτητη του υπολογιστικού δικτύου (mesh independent solution), πραγματοποιήθηκαν αρχικά δοκιμές ευαισθησίας με παρόμοια υπολογιστικά πλέγματα, τα οποία αποτελούνταν από διαφορετικό συνολικό αριθμό κελιών (διαφορετική πυκνότητα υπολογιστικών κελιών).

Για τις στερεές επιφάνειες της υπολογιστικής γεωμετρίας, οι οποίες αντιστοιχούν στα στερεά όρια του εργαστηριακού καναλιού, εφαρμόστηκε οριακή συνθήκη "τοιχώματος" (wall boundary condition). Στην πάνω επιφάνεια της υπολογιστικής γεωμετρίας, η οποία αντιστοιχεί στην ελεύθερη επιφάνεια του περιβάλλοντος νερού των εργαστηριακών πειραμάτων, εφαρμόστηκε οριακή συνθήκη "συμμετρίας" (symmetry boundary condition). Τα χαρακτηριστικά των εν λόγω οριακών συνθηκών περιγράφονται αναλυτικά στην εργασία των Georgoulas et al., (2010). Σημειώνεται επίσης, ότι για την πρόβλεψη των τυρβωδών ποσοτήτων στις περιοχές κοντά στον πυθμένα εφαρμόστηκε η "βελτιωμένη αντιμετώπιση τοιχώματος" (enhanced wall treatment) (Georgoulas et al., 2010) η οποία αποτελεί μια μέθοδο μοντελοποίησης παρακείμενων στο τοίχωμα περιοχών.

Η πρώτη σειρά αριθμητικών πειραμάτων (Σειρά I) αποτελείται από επτά πειράματα, οι αρχικές συνθήκες των οποίων συνοψίζονται στον Πίνακα 1. Η γραμμοσκιασμένη στήλη καταδεικνύει την κυμαινόμενη παράμετρο από πείραμα σε πείραμα (διάμετρος κόκκου αιωρούμενων στερεών σωματιδίων ανθρακοπυριτίου). Όπως, επίσης, μπορεί να παρατηρηθεί, τα αριθμητικά πειράματα, σε κάθε περίπτωση, ονομάζονται σύμφωνα με την κυμαινόμενη παράμετρο και την αντίστοιχη τιμή της σε κάθε πείραμα. Τέλος, όλες οι υπόλοιπες αρχικές συνθήκες παραμένουν σταθερές και έχουν τις ίδιες τιμές με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν στα εργαστηριακά πειράματα των Gladstone et al., (1998). Δηλαδή, στην παρούσα αριθμητική εφαρμογή, στα αρχικά μείγματα γλυκού νερού - αιωρούμενων σωματιδίων χρησιμοποιούνται στερεά σωματίδια ανθρακοπυριτίου (silicon carbide particles), πυκνότητας $\rho_p = 3217 \text{ kg/m}^3$, αιωρούμενα μέσα σε γλυκό νερό πυκνότητας $\rho_w = 998,156 \text{ kg/m}^3$, με τιμή αρχικού ογκομετρικού κλάσματος $C = 3.49 \times 10^{-3}$.

Πίνακας 1. Αρχικές συνθήκες αριθμητικών πειραμάτων Σειράς I (μονοσωματιδιακά ρεύματα θολότητας).

Αριθμητικό πείραμα	Διάμετρος κόκκου στερεών σωματιδίων D_i (μm)	Αρχικό ογκομετρικό κλάσμα στερεών σωματιδίων C	Πυκνότητα στερεών σωματιδίων ρ_p (kg/m^3)	Πυκνότητα περιβάλλοντος γλυκού νερού ρ_w (kg/m^3)	Αρχική πυκνότητα μείγματος ρ_m (kg/m^3)
<i>D5</i>	5	3.49×10^{-3}	3217	998.156	1005.9
<i>D17</i>	17	3.49×10^{-3}	3217	998.156	1005.9
<i>D25</i>	25	3.49×10^{-3}	3217	998.156	1005.9
<i>D37</i>	37	3.49×10^{-3}	3217	998.156	1005.9
<i>D69</i>	69	3.49×10^{-3}	3217	998.156	1005.9
<i>D88</i>	88	3.49×10^{-3}	3217	998.156	1005.9
<i>D105</i>	105	3.49×10^{-3}	3217	998.156	1005.9

Η δεύτερη σειρά αριθμητικών πειραμάτων (Σειρά II) αποτελείται από έξι αριθμητικά πειράματα, οι αρχικές συνθήκες των οποίων συνοψίζονται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2. Αρχικές συνθήκες αριθμητικών πειραμάτων Σειράς II (πολυσωματιδιακά ρεύματα θολότητας).

Αριθμητικό πείραμα	% 5 μm	% 17 μm	% 25 μm	% 37 μm	% 69 μm	% 88 μm	% 105 μm
<i>A</i>	0	0	20	20	20	20	20
<i>A_C</i>	0	0	15	15	15	15	40
<i>A_F</i>	0	0	40	15	15	15	15
<i>B</i>	20	20	20	20	20	0	0
<i>B_C</i>	15	15	15	15	40	0	0
<i>B_F</i>	40	15	15	15	15	0	0

Στον παραπάνω πίνακα (Πίνακας 2), οι γραμμοσκιασμένες σειρές καταδεικνύουν τα δύο βασικά αριθμητικά πειράματα της Σειράς II (αριθμητικά πειράματα A και B). Στο αριθμητικό πείραμα A, το αρχικό μείγμα αποτελείται από πέντε διαφορετικές

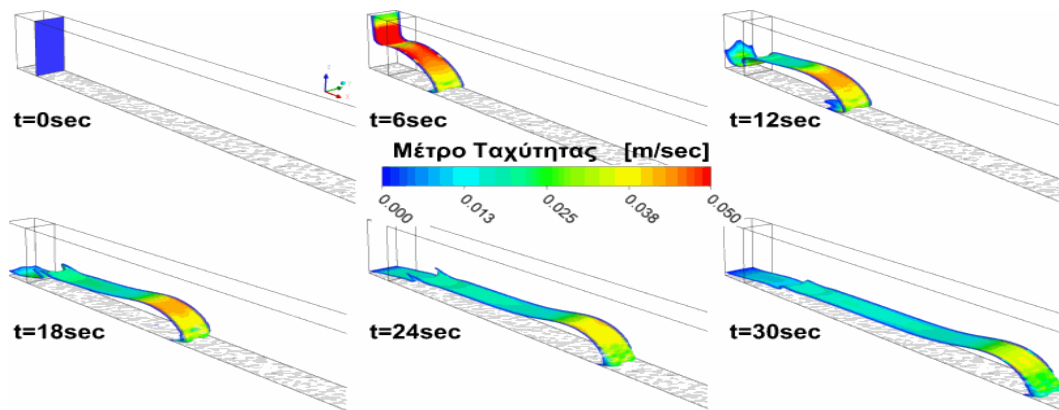
κλάσεις σωματιδίων με διαμέτρους κόκκου 25 μm , 37 μm , 69 μm , 88 μm και 105 μm , αντίστοιχα (οι πέντε πιο χονδρόκοκκες κλάσεις, από τις επτά κλάσεις που εξετάστηκαν μεμονωμένα στα αριθμητικά πειράματα της Σειράς I), στο οποίο η καθεμία συμμετέχει με την ίδια αρχική ποσοστιαία αναλογία (20%) επί του ολικού ογκομετρικού κλάσματος στερεών σωματιδίων ($C=3.49 \times 10^{-3}$). Στο αριθμητικό πείραμα B, το αρχικό μείγμα αποτελείται από πέντε διαφορετικές κλάσεις σωματιδίων με διαμέτρους κόκκου 5 μm , 17 μm , 25 μm , 37 μm και 69 μm , αντίστοιχα (οι πέντε πιο λεπτόκοκκες κλάσεις, από τις επτά κλάσεις που εξετάστηκαν μεμονωμένα στα αριθμητικά πειράματα της Σειράς I), στο οποίο η καθεμία συμμετέχει με την ίδια αρχική ποσοστιαία αναλογία (20%) επί του ολικού ογκομετρικού κλάσματος στερεών σωματιδίων ($C=3.49 \times 10^{-3}$). Τα υπόλοιπα τέσσερα αριθμητικά πειράματα αποτελούν παραλλαγές των δύο βασικών αριθμητικών πειραμάτων, όπου κάθε φορά κυμαίνεται η αρχική ποσοστιαία αναλογία των διαφόρων κλάσεων αιωρούμενων στερεών σωματιδίων, που εμπεριέχονται στα αρχικά μείγματα. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, τα εν λόγω αριθμητικά πειράματα, σε κάθε περίπτωση, ονομάζονται με το όνομα του βασικού πειράματος (A ή B) και με ένα δείκτη (C ή F). Ο δείκτης C καταδεικνύει ότι στο εν λόγω πείραμα, η πιο χονδρόκοκκη (coarse) κλάση σωματιδίων (από αυτές που εμπεριέχονται στο αντίστοιχο βασικό πείραμα), συμμετέχει στο αρχικό μείγμα με μεγαλύτερη αρχική ποσοστιαία αναλογία (40%), από ό,τι οι υπόλοιπες τέσσερις (15%). Αντίστοιχα, ο δείκτης F καταδεικνύει ότι, στο εν λόγω πείραμα, η πιο λεπτόκοκκη (fine) κλάση σωματιδίων (από αυτές που εμπεριέχονται στο αντίστοιχο βασικό πείραμα) είναι αυτή που συμμετέχει στο αρχικό μείγμα με μεγαλύτερη αρχική ποσοστιαία αναλογία (40%) από ό,τι οι υπόλοιπες τέσσερις (15%). Τέλος, όλες οι υπόλοιπες αρχικές συνθήκες (συνολικό ογκομετρικό κλάσμα αιωρούμενων στερεών σωματιδίων στο αρχικό μείγμα, πυκνότητα στερεών σωματιδίων, πυκνότητα περιβάλλοντος νερού, πυκνότητα αρχικού μείγματος) παραμένουν ίδιες με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν στα αριθμητικά πειράματα της Σειράς I (Πίνακας 1).

3. ΠΟΙΟΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται, ενδεικτικά, ποιοτικά αποτελέσματα, που καταδεικνύουν τη χρονική εξέλιξη της ροής ενός μονοσωματιδιακού (Σειρά I αριθμητικών πειραμάτων) και ενός πολυσωματιδιακού (Σειρά II αριθμητικών πειραμάτων) ρεύματος θολότητας, προκειμένου να κατανοηθούν τα γενικότερα χαρακτηριστικά της ροής των υπό μελέτη ρευμάτων, σε κάθε περίπτωση.

Στο Σχήμα 3, που ακολουθεί, απεικονίζεται ενδεικτικά η χρονική εξέλιξη της διεπιφάνειας μεταξύ του περιβάλλοντος νερού στο κανάλι και του μονοσωματιδιακού ρεύματος θολότητας, που σχηματίζεται στην περίπτωση του αριθμητικού πειράματος D5 (Πίνακας 1). Συγκεκριμένα, παρατίθεται η χρονική εξέλιξη της εν λόγω διεπιφάνειας, στα πρώτα 30 δευτερόλεπτα μετά την ακαριαία απομάκρυνση του θυροφράγματος (χρονική στιγμή $t=0$ sec), το οποίο αρχικά διαχωρίζει το μείγμα γλυκού νερού - αιωρούμενων στερεών σωματιδίων, που βρίσκεται στο ανάντη τμήμα του καναλιού, από το γλυκό νερό που βρίσκεται στο κατόντη. Σε κάθε χρονικό βήμα ($\Delta t=6$ sec), η διεπιφάνεια μεταξύ ρεύματος και περιβάλλοντος νερού χρωματίζεται με το μέτρο της ταχύτητας των αιωρούμενων στερεών σωματιδίων ανθρακοπυριτίου, σύμφωνα με το υπόμνημα. Είναι εμφανές ότι τη χρονική στιγμή $t=0$ sec, το βαρύτερο ρευστό (μείγμα γλυκού νερού - αιωρούμενων στερεών σωματιδίων), βρίσκεται εγκλωβισμένο στο ανάντη, του θυροφράγματος, τμήμα του καναλιού. Μετά την απομάκρυνση του θυροφράγματος ($t=0$ sec), τη χρονική στιγμή $t=6$ sec, το βαρύτερο ρευστό έχει ήδη αρχίσει να ρέει προς τα κατόντη, πάνω στον πυθμένα του καναλιού,

ενώ το ελαφρύτερο ρευστό (γλυκό νερό) ρέει προς τα ανάντη, πάνω από το βαρύτερο ρευστό. Τη χρονική στιγμή $t=12$ sec, όταν το μέτωπο του ελαφρύτερου ρευστού έχει χτυπήσει στο πίσω (ανάντη) τοίχωμα του καναλιού, σχηματίζεται ένα εσωτερικό υδραυλικό άλμα, το οποίο αρχίζει να διαδίδεται προς τα κατάντη, λόγω της ανάκλασης στο τοίχωμα. Η διάδοση του εν λόγω άλματος προς τα κατάντη προκαλεί μια δραστηκή μείωση του πάχους της ροής του ρεύματος θολότητας στο πίσω τμήμα του καναλιού (χρονικές στιγμές $t=18$ sec, $t=24$ sec και $t=30$ sec). Τέλος, είναι εμφανές ότι η ταχύτητα διάδοσης του μετώπου, καθώς και το πάχος του σχηματιζόμενου ρεύματος θολότητας, παρουσιάζουν μια σταδιακή μείωση, από χρονικό βήμα σε χρονικό βήμα, λόγω της συνεχούς εναπόθεσης των αιωρούμενων στερεών σωματιδίων στον πυθμένα της δεξαμενής, η οποία προκαλεί μια διαδοχική μείωση της πλεονάζουσας πυκνότητας του ρεύματος θολότητας (excess density), δηλαδή της κινητήριας του δύναμης.

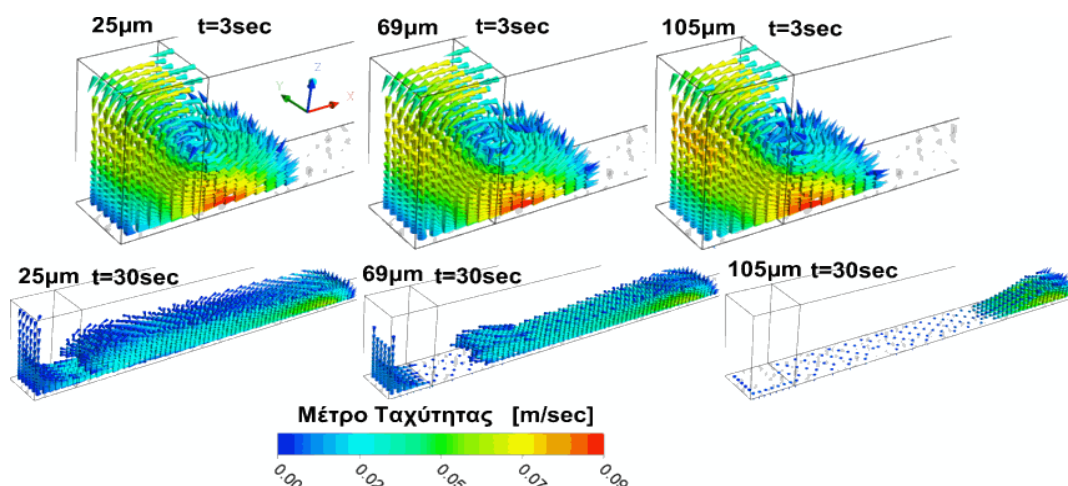


Σχήμα 3. Χρονική εξέλιξη της διεπιφάνειας μεταξύ του σχηματιζόμενου ρεύματος θολότητας και του περιβάλλοντος νερού

Αξίζει να σημειωθεί, ότι οι παραπάνω μακροσκοπικές παρατηρήσεις, σχετικά με τα γενικά χαρακτηριστικά της ροής του σχηματιζόμενου ρεύματος θολότητας, είναι κοινές σε όλα τα αριθμητικά πειράματα της Σειράς I και βρίσκονται σε συμφωνία με εργαστηριακά και αριθμητικά αποτελέσματα προηγούμενων αντίστοιχων ερευνών (Gladstone et al., 1998; Necker et al., 2002).

Στο Σχήμα 4 απεικονίζεται ενδεικτικά η χρονική εξέλιξη του διανυσματικού πεδίου ταχυτήτων των αιωρούμενων στερεών σωματιδίων, που εμπεριέχονται στο αρχικό μείγμα του σχηματιζόμενου πολυσωματιδιακού ρεύματος θολότητας, στην περίπτωση του αριθμητικού πειράματος A (Πίνακας 2), ενδεικτικά για δύο διαφορετικές χρονικές στιγμές της ροής. Η διεύθυνση και φορά των ταχυτήτων καθορίζεται από τη διεύθυνση και φορά των κωνικών διανυσμάτων, ενώ το μέτρο τους καθορίζεται από τη χρωματική κλίμακα του υπομήματος. Σε κάθε χρονική στιγμή, παρουσιάζεται ξεχωριστά το πεδίο ταχυτήτων τριών από τις πέντε συνολικά κλάσεις, που απαρτίζουν το αρχικό μείγμα, προκειμένου να διερευνηθεί η διαφοροποίηση της απόκρισης των διαφόρων κλάσεων στο εξελισσόμενο χρονικά πεδίο ροής του σχηματιζόμενου ρεύματος θολότητας. Η πιο λεπτόκοκκη κλάση (25 μm), η ενδιάμεση κλάση (69 μm) και η πιο χονδρόκοκκη κλάση (105 μm). Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, τη χρονική στιγμή $t=3$ sec, λίγο, δηλαδή, αργότερα από την απομάκρυνση του θυροφράγματος, και οι τρεις κλάσεις στερεών σωματιδίων ανθρακοπυριτίου εμφανίζουν σχεδόν όμοια πεδία ταχυτήτων. Αντίθετα τη χρονική στιγμή $t=30$ sec, γίνεται αισθητή η διαφοροποίηση των πεδίων ταχυτήτων της κάθε κλάσης σωματιδίων, εξαιτίας των διαφορετικών ταχυτήτων καθίζησης των σωματιδίων. Συγκεκριμένα, είναι εμφανές ότι όσο μεγαλύτερη είναι η διάμετρος των σωματιδίων τόσο μικρότερος είναι

ο συνολικός όγκος της αιώρησης, της κάθε κλάσης μέσα στο συνολικό όγκο του σχηματιζόμενου ρεύματος θολότητας. Συγκρίνοντας τα αντίστοιχα πεδία ταχυτήτων της πιο λεπτόκοκκης (25 μm) και της πιο χονδρόκοκκης (105 μm) κλάσης των αιωρούμενων στερεών σωματιδίων, στην εν λόγω χρονική στιγμή, είναι εμφανές ότι το μεγαλύτερο ποσοστό των αρχικά αιωρούμενων λεπτόκοκκων σωματιδίων βρίσκεται ακόμη σε αιώρηση, σε ολόκληρο σχεδόν το σώμα του ρεύματος θολότητας, ενώ το μεγαλύτερο ποσοστό των χονδρόκοκκων σωματιδίων έχει ήδη καθιζάνει στον πυθμένα του καναλιού, με ένα πολύ μικρό ποσοστό να εμφανίζεται ακόμη σε αιώρηση, κοντά στον πυθμένα, στην κεφαλή του ρεύματος θολότητας.



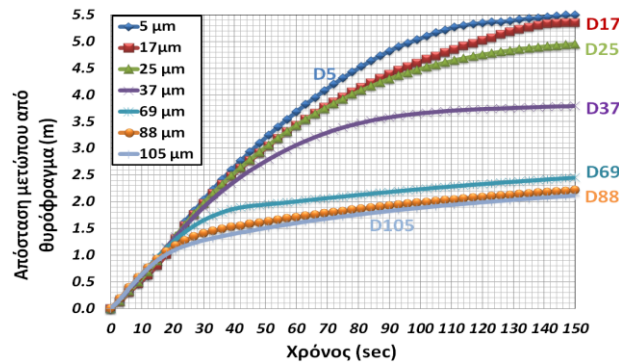
Σχήμα 4. Χρονική εξέλιξη του διανυσματικού πεδίου ταχυτήτων των αιωρούμενων στερεών σωματιδίων που εμπεριέχονται στο αρχικό μείγμα.

Το σύνολο των μακροσκοπικών παρατηρήσεων της παρούσας υποενότητας, καταδεικνύει την άμεση εξάρτηση της ροής ρευμάτων θολότητας σταθερού όγκου, από την κοκκομετρία και την κοκκομετρική σύσταση των σωματιδίων, που εμπεριέχονται στο αρχικό μείγμα.

4. ΠΟΣΟΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ

Στην παρούσα υποενότητα παρουσιάζονται ποσοτικά αποτελέσματα από την πρώτη και δεύτερη σειρά αριθμητικών πειραμάτων. Συγκεκριμένα, εξετάζεται η επίδραση της διακύμανσης της διαμέτρου του κόκκου (Σειρά I-μονοσωματιδιακά ρεύματα θολότητας) και της διακύμανσης της αρχικής ποσοστιαίας αναλογίας των αιωρούμενων στερεών σωματιδίων των διαφόρων κλάσεων (Σειρά II-πολυσωματιδιακά ρεύματα θολότητας), στη διάδοση του μετώπου του ρεύματος ως προς το χρόνο.

Στο Σχήμα 5 απεικονίζεται η χρονική διάδοση του μετώπου (flow-front advance) των μονοσωματιδιακών ρευμάτων που σχηματίζονται στα αριθμητικά πειράματα της Σειράς I, της παρούσας διερεύνησης (Πίνακας 1).



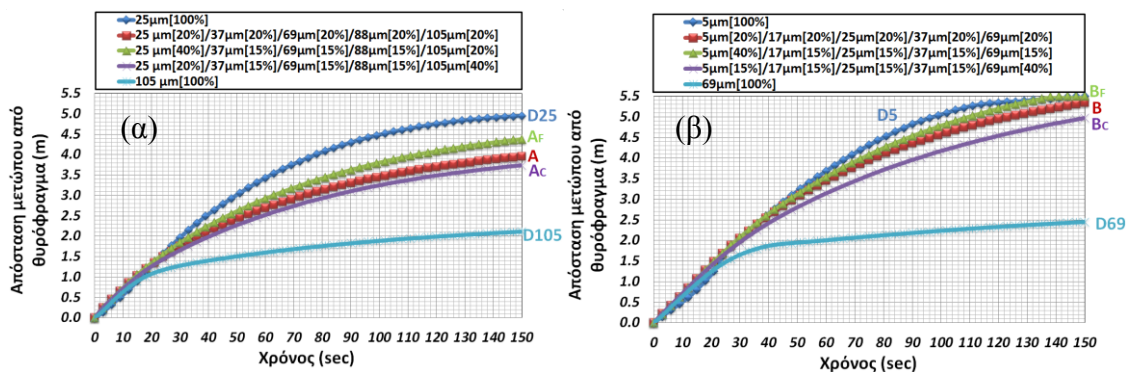
Σχήμα 5. Διάδοση μετώπου σχηματιζόμενων ρευμάτων θολότητας (Σειρά I αριθμητικών πειραμάτων) ως προς το χρόνο.

Στο εν λόγω σχήμα γίνεται σύγκριση των καμπυλών της οριζόντιας απόστασης, που διανύει το μέτωπο του κάθε ρεύματος, ως προς το χρόνο. Το υπόμνημα καταδεικνύει την κοκκομετρία των στερεών σωματιδίων ανθρακοπυριτίου, που εμπεριέχονται στο σχηματιζόμενο, σε κάθε περίπτωση, ρεύμα, που αντιστοιχεί σε κάθε καμπύλη. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, οι καμπύλες που προκύπτουν, σε κάθε περίπτωση, έχουν κοινή μορφή. Αρχικά, εμφανίζουν ένα σχετικά απότομο τμήμα (γραμμικής μεταβολής) ως τη χρονική στιγμή $t=20$ sec περίπου, το οποίο, στη συνέχεια, γίνεται διαδοχικά λιγότερο απότομο, καταδεικνύοντας τη διαδοχική μείωση της ταχύτητας των σχηματιζόμενων ρευμάτων. Το πιο απότομο αρχικό τμήμα των καμπυλών αντιστοιχεί στη "φάση κατάρρευσης" (slumping phase) (Gladstone et al., 1998) των σχηματιζόμενων ρευμάτων. Υπολογίζοντας την κλίση του εν λόγω τμήματος προκύπτει ότι η ταχύτητα διάδοσης του μετώπου, είναι περίπου σταθερή και ίση με περίπου $0,06$ m/sec και στις επτά περιπτώσεις ρευμάτων. Μετά τη "φάση κατάρρευσης", τα ρεύματα θολότητας εναποθέτουν συνεχώς σωματίδια στον πυθμένα του καναλιού, με αποτέλεσμα να μειώνεται διαδοχικά η πλεονάζουσα πυκνότητά τους (excess density), η οποία αποτελεί την κινητήρια δύναμη των εν λόγω ρευμάτων. Η διαδοχική απόκλιση μεταξύ των καμπυλών του Σχήματος 5, μετά τη "φάση κατάρρευσης", αντανακλά μια εξάρτηση της θέσης που έχει διανύσει το μέτωπο ως προς το χρόνο, από τη διάμετρο του κόκκου των αιωρούμενων στερεών σωματιδίων που εμπεριέχονται στη ροή. Τα μεγαλύτερα σωματίδια έχουν μεγαλύτερες ταχύτητες καθίζησης, επομένως, όσο πιο χονδρόκοκκα είναι τα αιωρούμενα σωματίδια που εμπεριέχονται στο ρεύμα, τόσο γρηγορότερα χάνει αυτό την πλεονάζουσα πυκνότητά του. Συγκρίνοντας τις δύο ακραίες περιπτώσεις ρευμάτων (D5 και D105), είναι χαρακτηριστικό ότι στον ίδιο χρόνο ροής ($t=150$ sec) το ρεύμα με τα λεπτόκοκκα σωματίδια (D5) έχει διανύσει περισσότερο από την διπλάσια απόσταση (5,5 m), από ότι το ρεύμα με τα χονδρόκοκκα σωματίδια (D105, 2 m).

Συγκρίνοντας τις καμπύλες που προκύπτουν στα αριθμητικά πειράματα D69, D88 και D105 (σχετικά χονδρόκοκκα σωματίδια) με τις αντίστοιχες καμπύλες των αριθμητικών πειραμάτων D5, D17 και D25 (σχετικά λεπτόκοκκα σωματίδια), παρατηρείται, χαρακτηριστικά, ότι στην περίπτωση των χονδρόκοκκων σχετικά σωματιδίων, ο ρυθμός μείωσης της ταχύτητας διάδοσης του μετώπου είναι περίπου ο ίδιος σε κάθε πείραμα, αφού τα τμήματα μειούμενης ταχύτητας, των εν λόγω καμπυλών, είναι σχεδόν παράλληλα μεταξύ τους. Χαρακτηριστικό είναι επίσης ότι η τελική ταχύτητα των ρευμάτων με τα χονδρόκοκκα σχετικά σωματίδια είναι ίση με $0,006$ m/sec και για τα τρεις περιπτώσεις ρευμάτων. Αντίθετα, στην περίπτωση των λεπτόκοκκων σχετικά σωματιδίων, οι εν λόγω ρυθμοί μείωσης της ταχύτητας διάδοσης του μετώπου διαφέρουν από πείραμα σε πείραμα. Συγκεκριμένα, η μείωση της

διαμέτρου των σωματιδίων επιφέρει μια μη αναλογική μείωση στους εν λόγω ρυθμούς. Το γεγονός αυτό καταδεικνύει ότι η επίδραση της διακύμανσης της διαμέτρου των σωματιδίων, που εμπεριέχονται σε ένα ρεύμα θολότητας σταθερού όγκου, στην ταχύτητα διάδοσης του μετώπου είναι διαφορετική για σχετικά λεπτόκοκκα σωματίδια και για σχετικά χονδρόκοκκα σωματίδια.

Στο Σχήμα 6 παρατίθενται οι καμπύλες της θέσης του μετώπου του ρεύματος ως προς το χρόνο, για τα αριθμητικά πειράματα της Σειράς II (πολυσωματιδιακά ρεύματα θολότητας). Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 6 (α) παρατίθενται οι καμπύλες, που προκύπτουν από το βασικό αριθμητικό πείραμα A (κόκκινη καμπύλη) και τις δύο παραλλαγές του, A_C (μωβ καμπύλη) και A_F (πράσινη καμπύλη). Όπως φαίνεται στον Πίνακα 2, στα αρχικά μείγματα των εν λόγω αριθμητικών πειραμάτων εμπεριέχονται πέντε διαφορετικές κλάσεις αιωρούμενων στερεών σωματιδίων ανθρακοπυριτίου, με τις πέντε μεγαλύτερες διαμέτρους κόκκου, από αυτές που εξετάστηκαν μεμονωμένα στα αριθμητικά πειράματα της Σειράς I, με διαφορετική, σε κάθε περίπτωση, αρχική ποσοστιαία αναλογία επί του συνολικού αρχικού ογκομετρικού κλάσματος αιωρούμενων σωματιδίων, το οποίο έχει την ίδια τιμή με τα αριθμητικά πειράματα των μονοσωματιδιακών ρευμάτων θολότητας (Σειρά I). Οι μπλε και γαλάζια, καμπύλες, του Σχήματος 6 (α), αντιστοιχούν στα αριθμητικά πειράματα D25 και D105 της Σειράς II (Πίνακας 1), όπου τα αρχικά τους μείγματα εμπεριέχουν 100% σωματίδια με διαμέτρους κόκκου 25 μm και 105 μm, αντίστοιχα, δηλαδή την πιο λεπτόκοκκη και την πιο χονδρόκοκκη κλάση σωματιδίων, από αυτές που εμπεριέχονται στα αρχικά μείγματα των αριθμητικών πειραμάτων A, A_C και A_F. Αντίστοιχα, στο Σχήμα 6 (β) παρατίθενται οι καμπύλες, που προκύπτουν από το βασικό αριθμητικό πείραμα B (κόκκινη καμπύλη) και τις δύο παραλλαγές του, B_C (μωβ καμπύλη) και B_F (πράσινη καμπύλη). Όπως φαίνεται στον Πίνακα 2, στα αρχικά μείγματα των εν λόγω αριθμητικών πειραμάτων εμπεριέχονται πέντε διαφορετικές κλάσεις αιωρούμενων στερεών σωματιδίων ανθρακοπυριτίου, με τις πέντε μικρότερες διαμέτρους κόκκου από αυτές που εξετάστηκαν μεμονωμένα στα αριθμητικά πειράματα της Σειράς I (Πίνακας 1), με διαφορετική, σε κάθε περίπτωση, αρχική ποσοστιαία αναλογία επί του συνολικού αρχικού ογκομετρικού κλάσματος αιωρούμενων σωματιδίων, το οποίο έχει την ίδια τιμή με τα αριθμητικά πειράματα των μονοσωματιδιακών ρευμάτων θολότητας (Σειρά I). Οι, μπλε και γαλάζια, καμπύλες, του Σχήματος 7 (β), αντιστοιχούν στα αριθμητικά πειράματα D5 και D69 της Σειράς I (Πίνακας 1), όπου τα αρχικά τους μείγματα εμπεριέχουν 100% σωματίδια με διαμέτρους κόκκου 5 μm και 69 μm, αντίστοιχα, δηλαδή, την πιο λεπτόκοκκη και την πιο χονδρόκοκκη κλάση σωματιδίων, από αυτές που εμπεριέχονται στα αρχικά μείγματα των αριθμητικών πειραμάτων B, B_C και B_F.



Σχήμα 6. Διάδοση μετώπου σχηματιζόμενων ρευμάτων θολότητας ως προς το χρόνο. (α) Καμπύλες αριθμητικών πειραμάτων A, A_C, A_F(Σειράς II) και D25, D105 (Σειράς I), (β) Καμπύλες αριθμητικών πειραμάτων B, B_C, B_F (Σειράς II) και D5, D69 (Σειράς I).

Συγκρίνοντας τα Σχήματα 6 (α) και 6 (β), παρατηρείται ότι, στην περίπτωση των πολυσωματιδιακών ρευμάτων που εμπεριέχουν το σχετικά χονδρόκοκκο φάσμα των διαμέτρων, που εξετάστηκαν μεμονωμένα, στα μονοσωματιδιακά ρεύματα των αριθμητικών πειραμάτων της Σειράς I (Σχήμα 6 (α)), οι καμπύλες που προκύπτουν, εμφανίζουν μια σχεδόν ενδιάμεση κατάσταση ως προς τις αντίστοιχες οριακές καμπύλες των μονοσωματιδιακών ρευμάτων (25 μm - άνω οριακή καμπύλη και 105 μm - κάτω οριακή καμπύλη), ενώ στην περίπτωση των πολυσωματιδιακών ρευμάτων, που εμπεριέχουν το σχετικά λεπτόκοκκο φάσμα των διαμέτρων, που εξετάστηκαν μεμονωμένα στα μονοσωματιδιακά ρεύματα (Σχήμα 6 (β)), οι καμπύλες που προκύπτουν, βρίσκονται πιο κοντά στην καμπύλη του μονοσωματιδιακού ρεύματος, που σχηματίζεται στο αριθμητικό πείραμα D5 (5 μm - άνω οριακή καμπύλη). Και στις δύο περιπτώσεις, η αύξηση του ποσοστού της πιο λεπτόκοκκης κλάσης σωματιδίων επιφέρει μια αύξηση της ταχύτητας διάδοσης του μετώπου (πράσινη καμπύλη), σε σχέση με την καμπύλη, όπου και οι πέντε κλάσεις σωματιδίων συμμετέχουν ισόποσα στο αρχικό μείγμα (κόκκινη καμπύλη), ενώ η αντίστοιχη αύξηση του ποσοστού της πιο χονδρόκοκκης κλάσης σωματιδίων, επιφέρει μια μείωση της ταχύτητας διάδοσης του μετώπου (μωβ καμπύλη). Παρόλα αυτά, χαρακτηριστικό είναι ότι, στην πρώτη περίπτωση (χονδρόκοκκο φάσμα), η αύξηση του ποσοστού της λεπτόκοκκης κλάσης έχει μεγαλύτερη επίδραση από ότι η αντίστοιχη αύξηση του ποσοστού της χονδρόκοκκης κλάσης, ενώ, στη δεύτερη περίπτωση (λεπτόκοκκο φάσμα), η αύξηση του ποσοστού της χονδρόκοκκης κλάσης, είναι αυτή που επιδρά σε μεγαλύτερο βαθμό. Το γεγονός αυτό αποδεικνύει ότι ο τρόπος επίδρασης της διακύμανσης των αρχικών ποσοστών των διαφόρων κλάσεων σωματιδίων που εμπεριέχονται σε ένα ρεύμα θολότητας σταθερού όγκου, στην ταχύτητα διάδοσης του μετώπου, διαφοροποιείται αρκετά, ανάλογα με τη σχετική κοκκομετρία των κλάσεων, που εμπεριέχονται στο ρεύμα.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΕΤΑΙΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

Τα βασικά συμπεράσματα που απορρέουν από την παρούσα διερεύνηση συνοψίζονται στη συνέχεια:

- Ένα ρεύμα που εμπεριέχει λεπτόκοκκα αιωρούμενα σωματίδια, μπορεί να διανύσει περισσότερο από τη διπλάσια απόσταση, από αυτή που διανύει ένα, ίσης πυκνότητας, ρεύμα, το οποίο εμπεριέχει χονδρόκοκκα αιωρούμενα σωματίδια, στον ίδιο χρόνο ροής.
- Η επίδραση της διακύμανσης της διαμέτρου των σωματιδίων, που εμπεριέχονται σε ένα ρεύμα θολότητας σταθερού όγκου, στην ταχύτητα διάδοσης του μετώπου είναι διαφορετική σε ένα εύρος εξεταζόμενων, σχετικά λεπτόκοκκων, διαμέτρων και σε ένα αντίστοιχο εύρος σχετικά χονδρόκοκκων διαμέτρων.
- Ο τρόπος επίδρασης της διακύμανσης των αρχικών ποσοστών των διαφόρων κλάσεων σωματιδίων, που εμπεριέχονται σε ένα πολυσωματιδιακό ρεύμα θολότητας σταθερού όγκου, στην ταχύτητα διάδοσης του μετώπου, διαφοροποιείται αρκετά, ανάλογα με τη σχετική κοκκομετρία των κλάσεων που εμπεριέχονται στο ρεύμα και την αρχική ποσοστιαία αναλογία τους, παρουσιάζοντας μια έντονη μη γραμμικότητα.
- Από ποιοτικής σκοπιάς, σε ένα πολυσωματιδιακό ρεύμα με σχετικά χονδρόκοκκες κλάσεις σωματιδίων, η διάδοση του μετώπου του, ως προς το χρόνο, παρουσιάζει μια περίπου ενδιάμεση κατάσταση, σε σύγκριση με τα αντίστοιχης πυκνότητας μονοσωματιδιακά ρεύματα, τα οποία εμπεριέχουν την

πιο λεπτόκοκκη και την πιο χονδρόκοκκη κλάση αντίστοιχα. Αντίθετα, στην περίπτωση ενός πολυσωματιδιακού ρεύματος θολότητας με σχετικά λεπτόκοκκες κλάσεις σωματιδίων, η διάδοση του μετώπου του, ως προς το χρόνο, βρίσκεται πιο κοντά στην αντίστοιχη περίπτωση ενός, ίσης πυκνότητας, μονοσωματιδιακού ρεύματος, το οποίο εμπεριέχει την πιο λεπτόκοκκη κλάση.

- Από ποσοτικής σκοπιάς, σε ένα ρεύμα με σχετικά χονδρόκοκκες κλάσεις σωματιδίων, η αύξηση του ποσοστού της πιο λεπτόκοκκης κλάσης έχει μεγαλύτερη επίδραση από ό,τι η αντίστοιχη αύξηση του ποσοστού της πιο χονδρόκοκκης κλάσης. Αντίθετα, σε ένα ρεύμα με σχετικά λεπτόκοκκες κλάσεις σωματιδίων, η αύξηση του ποσοστού της πιο λεπτόκοκκης κλάσης έχει μικρότερη επίδραση από ό,τι η αντίστοιχη αύξηση του ποσοστού της πιο χονδρόκοκκης κλάσης.

Τα συνολικά αποτελέσματα της παρούσας αριθμητικής διερεύνησης συμβάλλουν σημαντικά στην κατανόηση του μηχανισμού μεταφοράς και εναπόθεσης αιωρούμενων φερτών υλών, σε μεγάλης κλίμακας ρεύματα θολότητας σταθερού όγκου, που δημιουργούνται συνήθως στη φύση από αστοχίες φερτών υλών στον πυθμένα της υδάτινης λεκάνης αποδοχής και, στις περισσότερες περιπτώσεις, ρέουν περιορισμένα πλευρικά, μέσα σε υποβρύχια κανάλια (subaqueous channels) ή υποβρύχια φαράγγια (canyons).

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι, από την παρούσα αριθμητική εφαρμογή, καταδεικνύονται οι δυνατότητες μιας πολυφασικής αριθμητικής προσέγγισης ως ενός πιθανού και αρκετά κατάλληλου εργαλείου για την περαιτέρω διερεύνηση της υδροδυναμικής συμπεριφοράς ρευμάτων θολότητας, σταθερού όγκου, το οποίο επιτρέπει τον προσδιορισμό και τη συνεχή παρακολούθηση ενός μεγάλου εύρους παραμέτρων της ροής, με σχετικά μεγάλη ακρίβεια.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ANSYS Fluent 14.0 Documentation (2012), <http://www.ansys.com>
- Dade, W.B. and Huppert, H.E., 1994. *Predicting the geometry of channelized deep-sea turbidites*. *Geology*, 22: 645-648.
- Felix, M., Sturton, S. and Peakall, J., 2005. *Combined measurements of velocity and concentration in experimental turbidity currents*. *Sedimentary Geology*, 179(1-2): 31-47.
- Georgoulas, A., Angelidis, P., Panagiotidis, T. and Kotsovinos, N., 2010. *3D numerical modelling of turbidity currents*, *Journal of Environmental Fluid Mechanics*, 10: 603-635.
- Girardclos, S., Schmidt, O.T., Sturm, M., Ariztegui, D., Pugin, A. and Anselmetti, F.S., 2007. *The 1996 AD delta collapse and large turbidite in Lake Brienz*. *Marine Geology*, 241: 137-154.
- Gladstone, C., Phillips, J.C. and Sparks R.S.J., 1998. *Experiments on bidisperse, constant-volume gravity currents: propagation and sediment deposition*. *Sedimentology*, 45: 833-843.
- Gorsline, D.S., De diego, T. and Nava-Sanchez, E.H., 2000. *Seismically triggered turbidites in small margin basins: Alfonso Basin, Western Gulf of California and Santa Monica Basin, California Borderland*. *Sedimentary Geology*, 135: 21-35.
- Hartel, C., Meiburg, E. and Necker, F., 2000. *Analysis and direct numerical simulation of the flow at a gravity-current head: Part 1. Flow topology and front speed for slip and no-slip boundaries*. *Journal of Fluid Mechanics*, 418: 189-212.

- Heezen, B.C. and Ewing, W.M., 1952. *Turbidity currents and submarine slumps and the 1929 Grand Banks (Newfoundland) earthquake*. American Journal of Science, 250: 849-873.
- Kneller, B., Edwards, D., McCaffrey, W. and Moore, R., 1991. *Oblique reflection of turbidity currents*. Geology, 19: 250-252.
- Middleton, G.V., 1966. *Experiments on density and turbidity currents. I: Motion of the head*. Canadian Journal of Earth Sciences, 3: 523-546.
- Necker, F., Hartel, C., Kleiser, L. and Meinburg, E., 2002. *High-resolution simulations of particle driven gravity currents*. International Journal of Multiphase Flow, 28: 279-300.
- Ooi, S.K., Constantinescu, G. and Weber, L.J., 2007. *2D Large-Eddy Simulation of Lock-Exchange Gravity Current Flows at High Grashof Numbers*. Journal of Hydraulic Engineering, 133(9): 1037-1047.

**ΜΑΚΡΟΤΡΑΧΥΤΗΤΑ ΛΟΓΩ ΒΥΘΙΣΜΕΝΩΝ ΕΜΠΟΔΙΩΝ
ΣΕ ΑΝΟΙΚΤΟ ΑΓΩΓΟ
Γεώργιος Χ. Χριστοδούλου**

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Ηρώων Πολυτεχνείου 5, Ζωγράφου 15780

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αναλύονται πειραματικά αποτελέσματα σε εργαστηριακή διάρρυγα με σκοπό την εκτίμηση της δρώσας τραχύτητας που προκαλούν βυθισμένα τεχνητά εμπόδια τοποθετημένα στον πυθμένα. Τα εμπόδια είναι διαφόρων μορφών, όπως κύβοι, οδόντες, κύλινδροι, ελάσματα, ημισφαίρια, καθώς και λεπτές ράβδοι που προσομοιώνουν άκαμπτη βλάστηση. Από τα μετρηθέντα βάθη ροής υπολογίζεται ο αντίστοιχος συντελεστής Manning n του πυθμένα και στη συνέχεια η ισοδύναμη τραχύτητα k_s . Η τραχύτητα αυτή συσχετίζεται με το ύψος, το σχήμα και τη διάταξη των αντίστοιχων εμποδίων, καθώς και με την παροχή. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε αδιάστατη μορφή, συγκρίνονται με συναφή στοιχεία προηγούμενων ερευνών, και συνάγονται πρακτικά συμπεράσματα για την αντίσταση διαφόρων μορφών εμποδίων στη ροή.

**MACROROUGHNESS DUE TO SUBMERGED OBSTACLES
IN AN OPEN CHANNEL
George C. Christodoulou**

School of Civil Engineering
National Technical University of Athens
5 Heron Polytechniou, Zografou 15780, Greece

ABSTRACT

Available experimental results from a laboratory channel are analyzed, aiming at estimating the effective roughness caused by submerged artificial obstacles on the bottom. Several shapes of obstacles are studied, such as cubes, baffle blocks, vertical plates, cylinders, half-spheres, as well as thin vertical rods simulating stiff vegetation. From the measured flow depths, the respective Manning's n coefficient of the bottom is deduced and the equivalent roughness height k_s is calculated. This roughness is correlated to the height, shape and density of placement of the obstacles, and to the discharge. The results are presented in non-dimensional form and compared with relevant results of previous studies, leading to practical conclusions concerning the resistance of various obstacles to the flow.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ροή σε ανοικτούς αγωγούς διέπεται σε σημαντικό βαθμό από την τραχύτητα των στερεών ορίων που εκφράζεται εν γένει με κάποιον συντελεστή τραχύτητας. Π.χ. για την ομοιόμορφη ροή εφαρμόζεται ευρύτατα η εξίσωση του Manning:

$$Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} J^{1/2} \quad (1.1)$$

$$\text{ή } V = \frac{1}{n} R^{2/3} J^{1/2} \quad (1.2)$$

όπου Q η παροχή, V η ταχύτητα, A το εμβαδόν της διατομής, R η υδραυλική ακτίνα, J η κλίση του πυθμένα (που ισούται εν προκειμένω με την κλίση της γραμμής ενέργειας) και ο συντελεστής τραχύτητας Manning. Αντίστοιχα η ροή σε κλειστό αγωγό διέπεται από την εξίσωση των Darcy-Weisbach:

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (1.3)$$

ή ισοδύναμα, θέτοντας 4R αντί D για μη κυκλική διατομή, και έχοντας υπόψη ότι ο λόγος h_f/L εκφράζει την κλίση της γραμμής ενέργειας,

$$V = \sqrt{\frac{8g}{f}} R^{1/2} J^{1/2} \quad (1.4)$$

Επομένως, συγκρίνοντας τις (1.2) και (1.4), συνάγεται ότι

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = \frac{R^{1/6}}{n\sqrt{8g}} \quad (1.5)$$

Είναι γνωστό ότι ο συντελεστής τριβής f για τυρβώδη ροή σε σωλήνα, στην πλήρως τραχεία περιοχή, δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log \frac{D}{k_s} + 1.14 \quad (1.6)$$

και για μη κυκλική διατομή ($D=4R$)

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log \frac{4R}{k_s} + 1.14 \quad (1.7)$$

όπου k_s η «ισοδύναμη τραχύτητα άμμου» του στερεού ορίου.

Οι παραπάνω σχέσεις ισχύουν κατά κανόνα όταν η αντίσταση στη ροή προκαλείται από την μικρο-τραχύτητα που οφείλεται στις μικρής κλίμακας ανωμαλίες της επιφάνειας του στερεού ορίου. Σε αντιδιαστολή, η ροή σε ανοικτούς αγωγούς ενίοτε πραγματοποιείται πάνω από μεγάλα στοιχεία τραχύτητας, όπως χαλίκια, βράχους, βλάστηση ή και τεχνητά εμπόδια. Έρευνες σε ορεινούς ποταμούς με μεγάλα στοιχεία τραχύτητας (Bathurst 1985, Rice et al 1998) έδειξαν ότι μπορεί και σ' αυτή την περίπτωση να εφαρμοστεί λογαριθμικός νόμος μορφής παρόμοιας με την (1.7):

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = c_1 \log \frac{y}{D_s} + c_2 \quad (1.8)$$

όπου y το βάθος ροής, D_s χαρακτηριστικό μέγεθος των κόκκων (ή λίθων) του πυθμένα και c_1 , c_2 συντελεστές που προσδιορίζονται κατά περίπτωση από πειράματα πεδίου ή εργαστηρίου. Παρόμοια εξίσωση έχει προταθεί για κανάλια μεγάλης κλίσης με λιθόστρωτο πυθμένα (Pagliara et al 2010). Η συμπεριφορά του συντελεστή f έχει επίσης μελετηθεί σε ροή πάνω από άκαμπτη ή εύκαμπτη βλάστηση (Järvelä 2002, Kouwen & Unny 1973).

Η παρεμβολή τεχνητών εμποδίων στη ροή σε ανοικτό αγωγό, ιδιαίτερα όταν αυτός έχει μεγάλη κλίση, μπορεί να αυξήσει σημαντικά την καταστροφή της ενέργειας κατά μήκος του, ώστε να μην απαιτείται η παρεμβολή λεκανών ηρεμίσσεως (Vischer 1995, Peterka 1958). Οι Herbach & Shulits (1964) πραγματοποίησαν πειράματα σε διώρυγα πλάτους 1,68m με κλίση 0,003 έως 0,03 και για διάφορες διατάξεις κυβικών εμποδίων πλευράς 15 cm. Εισήγαγαν την παράμετρο θ , που ορίζεται ως ο λόγος της συνολικής επιφάνειας προβολής των εμποδίων κάθετα προς τη ροή προς την αντίστοιχη επιφάνεια του πυθμένα, και παρουσίασαν διαγράμματα του συντελεστή f συναρτήσει του θ και του αριθμού Reynolds. Οι Χριστοδούλου & Παπαθανασιάδης (2009) μελέτησαν πειραματικά τη ροή πάνω από εμπόδια μορφής οδόντων σε αγωγό πλάτους 25cm και κλίσης 16,5%. Οι Βασιλάκος (2010) και Κωστίδου (2010) μελέτησαν άλλες μορφές εμποδίων στο ίδιο κανάλι, ενώ οι Christodoulou et al (2012) παρουσίασαν συγκεντρωτικά αποτελέσματα για μεγάλη ποικιλία εμποδίων και πρότειναν λογαριθμική συσχέτιση μεταξύ του f και του y_c/h , όπου y_c το κρίσιμο βάθος και h το ύψος του εμποδίου. Ο Huthoff (2012) προσπάθησε να συσχετίσει τα γεωμετρικά στοιχεία εμποδίων τυχούσας μορφής προς ένα «ισοδύναμο» ύψος τραχύτητας k_s εισάγοντας μια κλίμακα μήκους g και κατέληξε σε σχέση της μορφής

$$k_s = \alpha \cdot g = \alpha C_d \frac{A_o \Theta^2}{A_s h} \quad (1.9)$$

όπου C_d ο συντελεστής αντίστασης μεμονωμένου εμποδίου, A_o η επιφάνεια προβολής του εμποδίου κάθετα στη ροή, A_s η επιφάνεια πυθμένα που αντιστοιχεί στο κάθε εμπόδιο, α συντελεστής με προτεινόμενη τιμή $4 \cdot 10^3$ και η παράμετρος Θ :

$$\Theta = 0,5 C_d \min(h, d) \quad (1.10)$$

όπου h το ύψος και d το πλάτος του εμποδίου. Αρα, λαμβάνοντας υπόψη ότι ουσιαστικά είναι $A_o/A_s = \theta$, όπως ορίστηκε προηγουμένως, η (1.9) γράφεται

$$\frac{k_s}{h} = 10^3 C_d^3 \theta \left(\frac{d}{h}\right)^2 \quad (1.11)$$

που ισχύει για $d \leq h$, άλλως η παρένθεση λαμβάνει την τιμή 1. Παρόμοια με του Huthoff αλλά απλούστερη σχέση έχει επίσης προτείνει ο Lettau (1969) για ροή στην ατμόσφαιρα πάνω από εμπόδια:

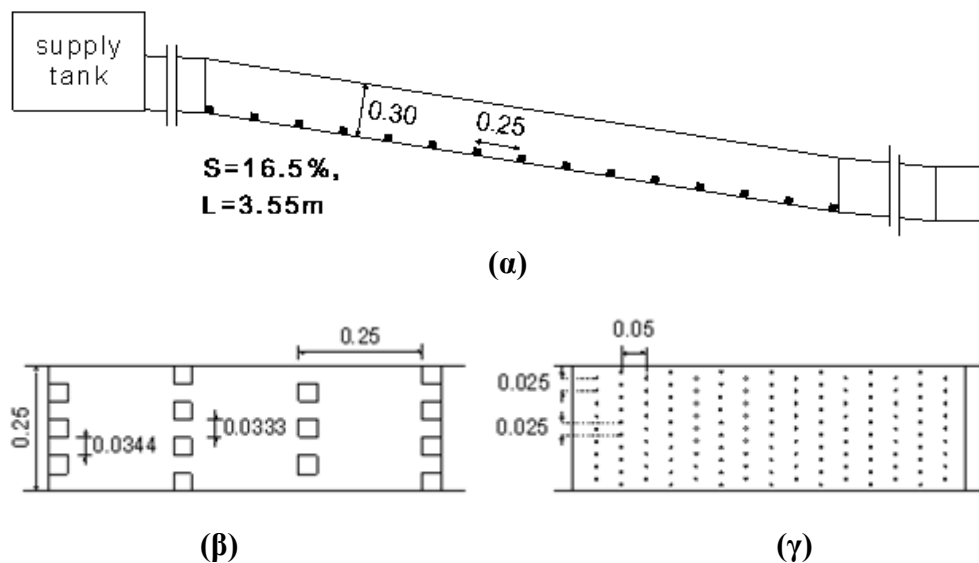
$$\frac{k_s}{h} = 0,5 \theta \quad (1.12)$$

Στην παρούσα εργασία γίνεται περαιτέρω επεξεργασία διαθέσιμων πειραματικών δεδομένων από εργασίες στο ΕΜΠ (Χριστοδούλου & Παπαθανασιάδης

2009, Βασιλάκος 2010, Κωστίδου 2010, Christodoulou et al 2012) με στόχο την ποσοτικοποίηση του ισοδύναμου ύψους τραχύτητας k_s που αντιστοιχεί σε διάφορα είδη και διατάξεις εμποδίων.

2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Τα πειραματικά δεδομένα έχουν προκύψει από εργαστηριακή διώρυγα πλάτους 25 cm και κλίσης 16,5%. Το κυρίως τμήμα όπου έγιναν οι μετρήσεις έχει μήκος 3,55 m, και συνδέεται ανάντη και κατάντη με τμήματα μικρότερου μήκους με κλίση ~ 5 %. Τα εμπόδια ήταν 8 διαφορετικών μορφών: κύβοι, οδόντες, κύλινδροι με άξονα κάθετο στον πυθμένα, γωνιακά ελάσματα με τη μια πλευρά κάθετη στον πυθμένα, ημισφαίρια κάθετα ή παράλληλα στη ροή, ορθογώνια παραλληλεπίπεδα (μισοί κύβοι) και λεπτές ράβδοι. Ο κύβος είχε πλευρά 3,75 cm, που ήταν και η βασική διάσταση των λοιπών εμποδίων (πλην των ράβδων), δηλ. ύψος και διάμετρος του κυλίνδρου, διάμετρος του ημισφαιρίου, πλευρά του ελάσματος κλπ. Στη βασική διάταξη τα εμπόδια (πλην των ράβδων) τοποθετήθηκαν σε σειρές με αποστάσεις 25 cm, ενώ στους οδόντες δοκιμάστηκε και πυκνότερη διάταξη, ανά 12,5 cm. Οι ράβδοι είχαν ύψος 4 cm και διάμετρο 0,5cm, και τοποθετήθηκαν σε σειρές ανά 10 cm (αραιή διάταξη) ή ανά 5 cm (πυκνή διάταξη). Σκαρίφημα της πειραματικής συσκευής και βασικών διατάξεων των εμποδίων φαίνεται στο Σχήμα 1. Περισσότερες λεπτομέρειες για τη συσκευή και τη διαδικασία των μετρήσεων δίνεται σε προηγούμενες εργασίες (Χριστοδούλου & Παπαθανασιάδης 2009, Βασιλάκος 2010, Κωστίδου 2010, Christodoulou et al 2012).



Σχήμα 1. (α) Η πειραματική συσκευή, (β) βασική διάταξη εμποδίων, (γ) πυκνή διάταξη ράβδων.

Από τις μετρήσεις βαθών διαπιστώθηκε ότι, ως επί το πλείστον, στο τελευταίο ~ 1 m του κυρίως καναλιού το βάθος ήταν κατά προσέγγιση σταθερό, με διακυμάνσεις της τάξης του $\pm 0,5$ cm. Το βάθος αυτό λήφθηκε υπόψη ως «ομοιόμορφο βάθος» για την ανάλυση των αποτελεσμάτων, που περιγράφεται παρακάτω. Το βάθος αυτό κυμαίνεται από 5-6 cm στις μικρές παροχές έως 9-12 cm στις μεγάλες, επομένως τα εμπόδια είναι πάντα βυθισμένα εξ ολοκλήρου, με λόγο βύθισης για τα υψηλότερα εξ αυτών από 1,5 έως 3 περίπου. Τέλος, σημειώνεται ότι τα μετρηθέντα βάθη εν γένει

περιλαμβάνουν και ένα ποσοστό αέρα, που σε προηγούμενη εργασία (Χριστοδούλου & Παπαθανασιάδης 2009) εκτιμήθηκε ότι είναι της τάξης του 10%.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

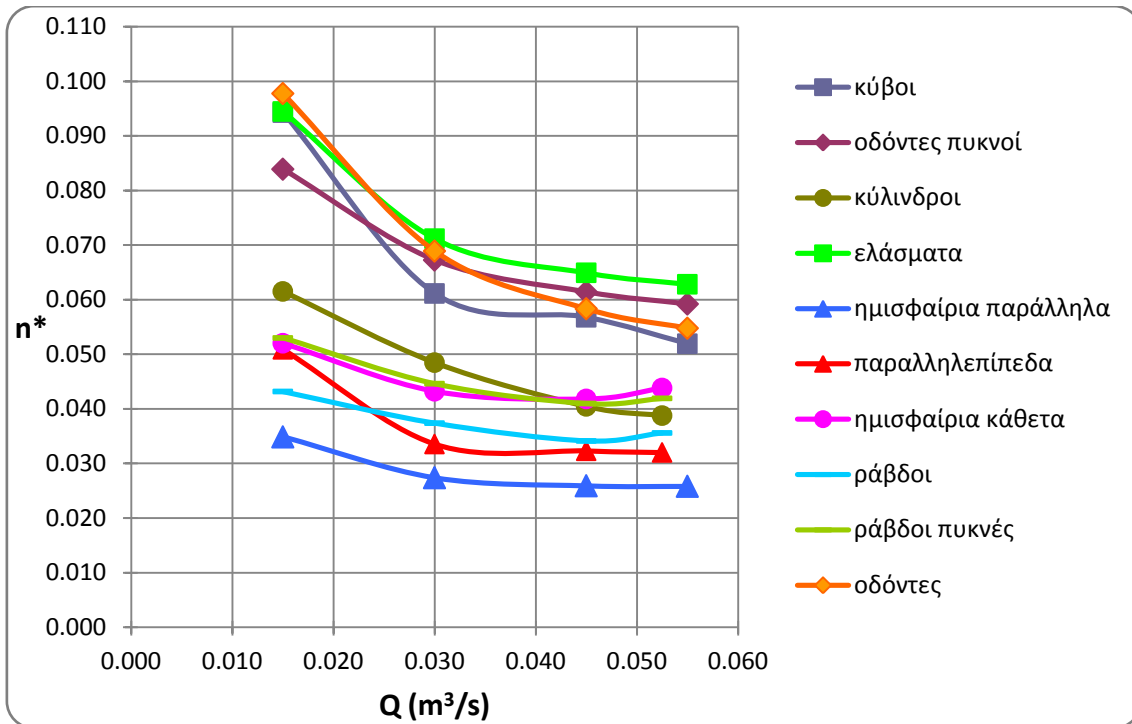
Από τη γνωστή παροχή και την υδραυλική ακτίνα που αντιστοιχεί στο μετρημένο «ομοιόμορφο βάθος» μπορεί εύκολα να υπολογιστεί ο συντελεστής που Manning από την (1.1). Εν τούτοις στην προκειμένη περίπτωση η τραχύτητα του πυθμένα λόγω των εμποδίων είναι πολύ μεγαλύτερη από εκείνη των τοιχωμάτων που είναι σχεδόν λεία (από πλεξιγκλας). Επομένως μια πιο καλή εκτίμηση της τραχύτητας που δημιουργούν τα εμπόδια (που θα ήταν εντελώς ακριβής αν ο αγωγός ήταν πολύ μεγάλου πλάτους) προκύπτει αν αμεληθεί η (μικρή) συμβολή των τοιχωμάτων. Με αυτό το σκεπτικό υπολογίστηκαν ο συντελεστής Manning n^* από την (1.1) με $R \approx y$:

$$Q = \frac{1}{n^*} b y^{5/3} J^{1/2} \quad (3.1)$$

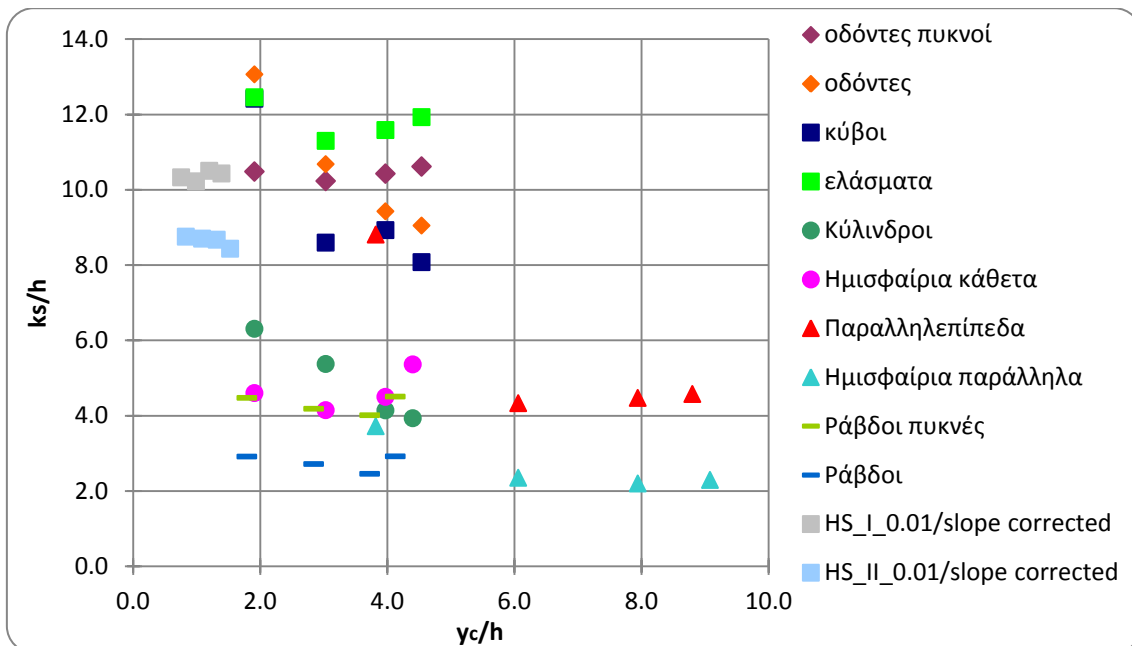
και στη συνέχεια τα f και k_s από τις (1.5) και (1.7), πάλι με $R \approx y$.

Στο Σχήμα 2 εικονίζεται η μεταβολή του n^* με την παροχή. Είναι εμφανής η αύξηση του n^* για τα γωνιώδη και υψηλά εμπόδια σε σύγκριση με τα καμπύλα και χαμηλά. Επίσης, για συγκεκριμένο τύπο εμποδίου διαπιστώνεται μια αισθητή μείωση των τιμών του n^* με την αύξηση της παροχής, με τάση σταθεροποίησης.

Στο Σχήμα 3 παρουσιάζεται η μεταβολή του ύψους τραχύτητας k_s που υπολογίστηκε, αδιαστατοποιημένου με το ύψος h του αντίστοιχου εμποδίου, συναρτήσει της αδιάστατης παραμέτρου y_c/h . Εκ πρώτης όψεως, μια πιο εύλογη παράμετρος για σύγκριση θα ήταν ο λόγος y/h (βάθος ροής προς ύψος εμποδίου, που παραπέμπει στη σχετική τραχύτητα). Όμως, αν η κλίση του πυθμένα δεν αλλάζει, το y_c/h δίνει την ίδια πληροφορία με το y/h και επιπλέον αποτελεί μέτρο της παροχής ανεξάρτητο από τις μετρήσεις των βαθών ροής. Βέβαια, για διαφορετική κλίση πυθμένα απαιτείται σχετική αναγωγή. Αυτή μπορεί να γίνει αν παρατηρήσει κανείς ότι, σύμφωνα με την (3.1), για την ίδια παροχή σε (πλατύ) ορθογωνικό αγωγό το βάθος ροής μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα προς την κλίση του πυθμένα στη δύναμη 0,3. Η αναγωγή αυτή εφαρμόστηκε στα δεδομένα των Herbach & Shulits (1964) ώστε να συμπεριληφθούν στο ίδιο διάγραμμα. Παρατηρείται ότι στις περισσότερες περιπτώσεις ο λόγος k_s/h για συγκεκριμένο είδος εμποδίου διατηρείται περίπου σταθερός (στο εύρος τιμών του y_c/h που μελετήθηκε), αν και ενίοτε η τιμή αυξάνεται σημαντικά για μικρό y_c/h . Θα πρέπει όμως να σημειωθεί ότι η ακρίβεια των πειραματικών αποτελεσμάτων είναι μικρότερη στα μικρά y_c/h , λόγω των πολύ πιο έντονων διακυμάνσεων της ελεύθερης επιφάνειας που όχι μόνο καθιστούν δυσχερή την εκτίμηση του «ομοιόμορφου» βάθους, αλλά και αμφίβολη την ύπαρξή του στην περιοχή αυτή. Επιπλέον, από τις οπτικές παρατηρήσεις εκτιμάται ότι στις μικρές παροχές το ποσοστό αέρα είναι αυξημένο, με αποτέλεσμα τη σχετικά μεγαλύτερη διόγκωση του βάθους ροής.



Σχήμα 2. Μεταβολή του εκτιμώμενου συντελεστή Manning του πυθμένα με την παροχή



Σχήμα 3. Μεταβολή της αδιάστατης τραχύτητας με τον λόγο y_c/h

Στον Πίνακα 1 φαίνονται συνοπτικά οι μέσες τιμές των λόγων k_s/h (που συμβολίζονται με κεφαλαίο K) και οι αντίστοιχες τυπικές αποκλίσεις. Επειδή σε ορισμένες περιπτώσεις παρατηρείται πολύ μεγάλη απόκλιση μιας τιμής από τον μέσο όρο των υπολοίπων (πάνω από ή κοντά στο 50%), θα μπορούσε να παραλειφθεί από μια μέτρηση σε 5 είδη εμποδίων, οπότε προκύπτουν οι τιμές K_s'/h (προτελευταία στήλη) και οι αντίστοιχες τυπικές αποκλίσεις (στην τελευταία στήλη, σημαντικά

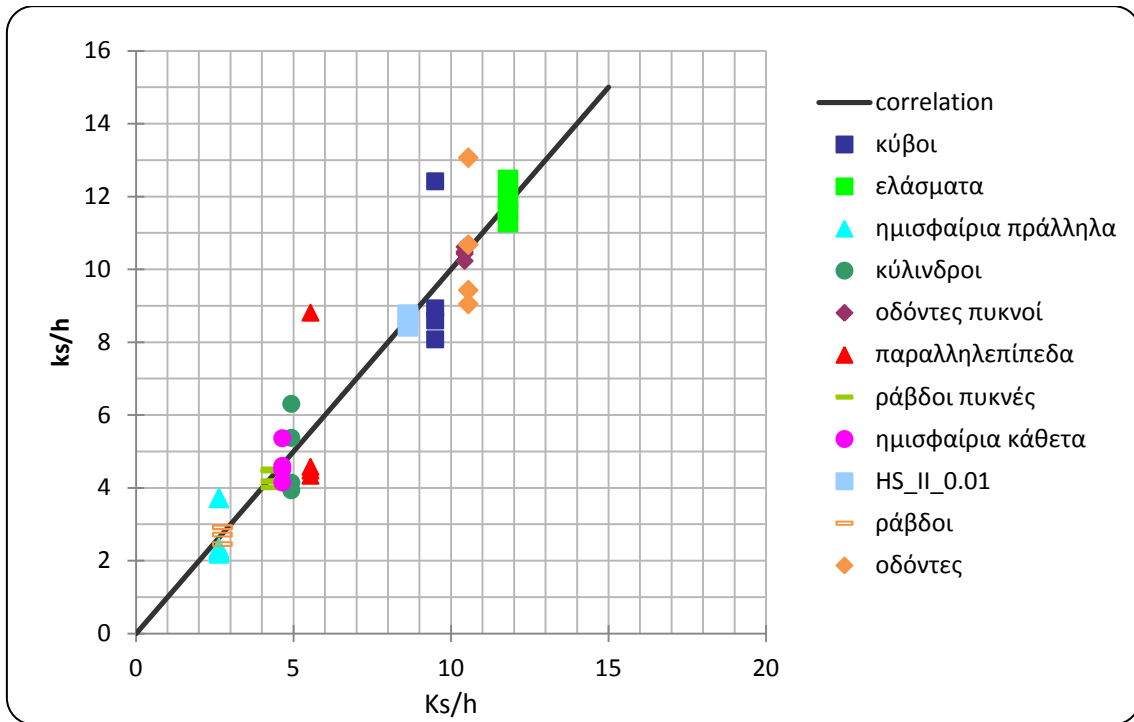
μειωμένες). Στο Σχήμα 4 συγκρίνονται οι επιμέρους τιμές του k_s/h για κάθε είδος εμποδίων προς την αντίστοιχη μέση τιμή, ενώ παρόμοια σύγκριση γίνεται στο Σχήμα 5 ως προς τη διορθωμένη μέση τιμή, έχοντας παραλείψει κάποιες μετρήσεις που αποκλίνουν υπερβολικά, όπως προαναφέρθηκε. Στον Πίνακα 1 και στα Σχήματα 4 και 5 έχουν συμπεριληφθεί για σύγκριση και αποτελέσματα των Herbich & Shulits (1964).

Πίνακας 1. Μέσες τιμές της αδιάστατης ισοδύναμης τραχύτητας

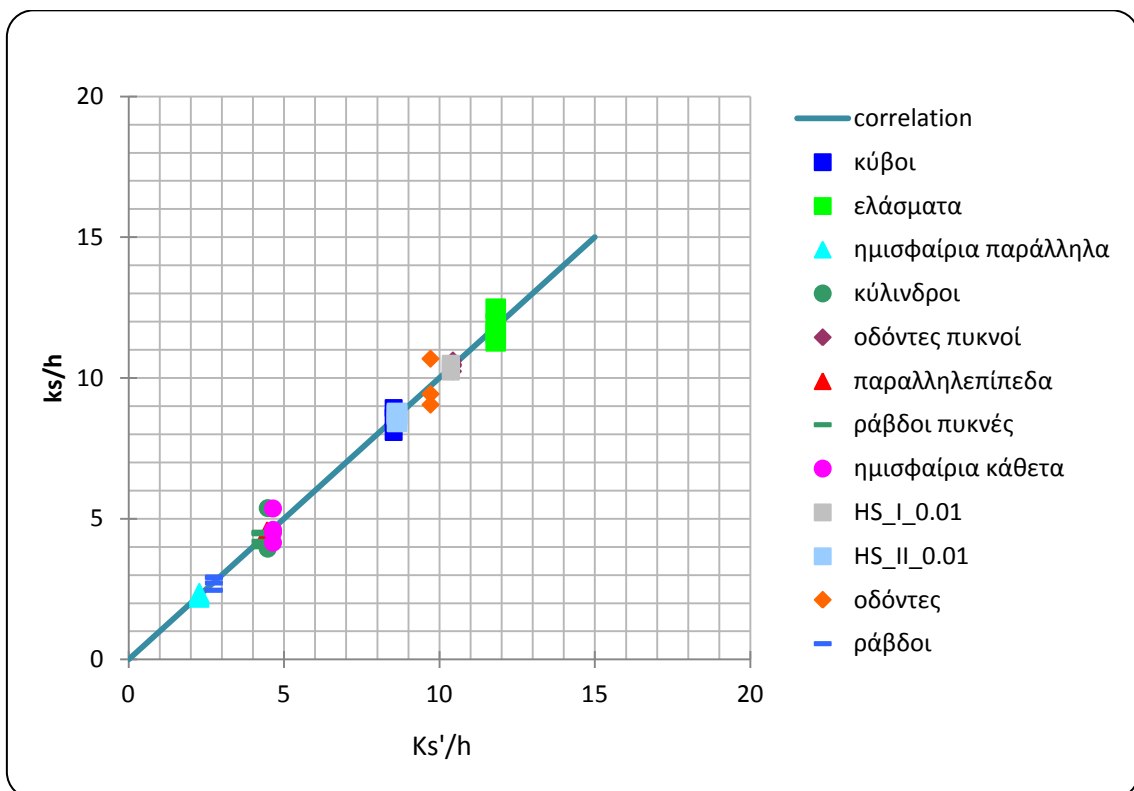
Είδος εμποδίου	θ	K_s/h	St. dev1	K_s'/h	St.dev2
κύβοι	0,0788	9.50	1.709	8.53	0.350
οδόντες πυκνοί	0,156	10.44	0.138		
οδόντες	0,0788	10.55	1.570	9.72	0.697
ελάσματα	0,0788	11.82	0.431		
ημισφαίρια κάθετα	0,0788	4.65	0.431		
κύλινδροι	0,0788	4.94	0.963	4.48	0.639
παραλληλεπίπεδα	0,0394	5.55	1.885	4.46	0.100
ημισφαίρια παράλληλα	0,0309	2.64	0.626	2.28	0.062
ράβδοι αραιές	0,072	2.75	0.189		
ράβδοι πυκνές	0,152	4.29	0.206		
HS_I_0.003	0,250	7.85	0.895		
HS_I_0.02	0,250	11.41	0.286		
HS_I_0.01	0,250	10.37	0.106		
HS_II_0.01	0,162	8.64	0.123		

4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Από τον Πίνακα 1 και τα Σχήματα 3, 4 και 5, διαπιστώνεται μια συστηματική εξάρτηση του ισοδύναμου ύψους τραχύτητας k_s από το ύψος, το σχήμα και την πυκνότητα διάταξης των εμποδίων. Σε κάθε σειρά πειραμάτων του ίδιου εμποδίου ο λόγος k_s/h είναι περίπου σταθερός, εξαιρουμένων των πολύ μικρών παροχών, όπου λόγω της μεγάλης κλίσης του αγωγού στα παρόντα πειράματα το βάθος ροής ήταν σχετικά μικρό και παρουσίαζε έντονες διακυμάνσεις γύρω από το εκτιμώμενο «ομοιόμορφο» βάθος. Γιαγωνιώδη εμπόδια ίδιου ύψους, πλάτους και διάταξης, ο λόγος k_s/h είναι κοντά στο 10. Η διαφορά μεταξύ κύβων και οδόντων είναι περί το 10%, ενώ μεταξύ κύβων και ελασμάτων περί το 30%. Τα ελάσματα τα κάθετα προς τη ροή παρουσιάζουν την μεγαλύτερη ισοδύναμη τραχύτητα από όλα τα εμπόδια, πράγμα που προφανώς οφείλεται στη μεγάλη ζώνη αποκόλλησης που δημιουργείται πίσω από αυτά. Παρατηρείται ακόμη ότι διπλασιασμός της πυκνότητας των οδόντων επιφέρει μικρή (όχι αναλογική) αύξηση του k_s . Στα πειράματα των Herbich & Shulits φαίνεται επίσης ότι το k_s αυξάνεται με αύξηση της πυκνότητας των κύβων, ενώ οι τιμές του είναι παραπλήσιες με τις παρούσες για κύβους και οδόντες, παρά το ότι οι κλίσεις πυθμένα ήταν πολύ μικρότερες. Κύλινδροι με επιφάνεια προβολής ίδια με τους κύβους/οδόντες/ελάσματα δίνουν πολύ μικρότερο k_s , περίπου το μισό. Παραπλήσια προς τους κυλίνδρους είναι η τιμή του k_s για τα ημισφαίρια κάθετα στη ροή, δείχνοντας τη σημαντική διαφοροποίηση των καμπύλων εμποδίων από ταγωνιώδη.



Σχήμα 4. Συσχέτιση της αδιάστατης τραχύτητας των εμποδίων προς την αντίστοιχη μέση τιμή



Σχήμα 5. Συσχέτιση της αδιάστατης τραχύτητας των εμποδίων προς την αντίστοιχη διορθωμένη μέση τιμή

Παρατηρείται επίσης ότι εμπόδια μικρότερου ύψους προκαλούν σημαντικά μικρότερες τιμές k_s . Ειδικότερα, ορθογώνια παραλληλεπίπεδα με ύψος το μισό των κύβων και ίδια κάτοψη έχουν k_s/h περίπου το μισό των κύβων, άρα σε απόλυτο μέγεθος το k_s υποτετραπλασιάζεται. Εξ άλλου τα ημισφαίρια παράλληλα προς τη ροή και ίδιου ύψους με τα παραλληλεπίπεδα παρουσιάζουν το μισό k_s από εκείνα. Τέλος για τις ράβδους παρατηρείται αρκετά σημαντική εξάρτηση από την πυκνότητα της διάταξης, καθώς το k_s αυξάνεται πάνω από 50% για διπλασιασμό της πυκνότητας. Η τιμή του k_s των κυλίνδρων είναι περίπου ίδια με εκείνη των λεπτών ράβδων διπλάσιας πυκνότητας.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι υπολογιζόμενες τιμές του k_s αποτελούν συντηρητικές (προς τα πάνω) εκτιμήσεις, δεδομένου ότι έχει αμεληθεί η όποια συμβολή των πλευρικών τοιχωμάτων, όπως προαναφέρθηκε, και συγχρόνως ενσωματώνουν τη διόγκωση του βάθους ροής που προκαλείται από τη συμπαράσυρση αέρα. Έτσι, τα ύψη k_s προκύπτουν εν γένει μεγαλύτερα από το πραγματικό ύψος των εμποδίων, και μάλιστα συχνά μεγαλύτερα και από το βάθος ροής. Επομένως, τα μεγέθη αυτά θα πρέπει μάλλον να αντιμετωπιστούν ως λογιστικά μεγέθη για τον υπολογισμό του συνολικού βάθους ροής με βάση τις προαναφερόμενες θεωρητικές σχέσεις.

Παραβάλλοντας τα παρόντα αποτελέσματα με εκείνα των Huthoff (2012) και Lettau (1969), παρατηρούνται τα εξής: (α) η απλή σχέση (1.12) που προτείνεται από τον Lettau για την ατμόσφαιρα δίνει σε κάθε περίπτωση $k_s/h \ll 1$, αφού το θ είναι πολύ μικρότερο της μονάδος. Τέτοιες τιμές δεν επιβεβαιώνονται σε καμία περίπτωση από τις παρούσες μετρήσεις. (β) Η σχέση (1.11) του Huthoff είναι πολύ ευαίσθητη στην τιμή του C_d , που υπεισέρχεται ως C_d^3 , και επομένως ποσοτική σύγκριση θα μπορούσε να γίνει μόνο αν είναι γνωστό με σχετική ακρίβεια το C_d για τη συγκεκριμένη μορφή εμποδίου. Αν τεθεί για τον κύβο μια τυπική τιμή $C_d \sim 1$ για αρ. Reynolds $> 10^5$, τότε (για $\theta=0,0788$) προκύπτει $k_s/h \sim 78,8$, τιμή πολύ μεγαλύτερη από τις παρούσες μετρήσεις. Για να επιτευχθεί μια τιμή k_s/h γύρω στο 10, θα έπρεπε να εισαχθεί $C_d \sim 0,5$. Ας σημειωθεί πάντως ότι ο Huthoff θέτει ως προϋποθέσεις για την εφαρμογή της θεωρίας του να είναι τα εμπόδια καλά βυθισμένα (βάθος ροής τουλάχιστον 5-πλάσιο του ύψους των εμποδίων) και όχι πολύ αραιά, εκ των οποίων τουλάχιστον η πρώτη δεν πληρούται στην παρούσα περίπτωση.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων προέκυψαν ποσοτικά στοιχεία για το ισοδύναμο ύψος τραχύτητας k_s που προκαλείται από διάφορα βυθισμένα εμπόδια. Συγκεκριμένα:

(α) Γενικά, το k_s είναι αρκετά μεγαλύτερο από το πραγματικό ύψος των εμποδίων, δηλ. τα εμπόδια προκαλούν αντίσταση στη ροή δυσανάλογα μεγάλη σε σχέση με το μέγεθός τους. Οι υπολογισθείσες τιμές του k_s ενσωματώνουν την επίδραση του συμπαρασυρόμενου αέρα.

(β) Για γωνιώδη εμπόδια (κύβοι, οδόντες, γωνιακά ελάσματα) με τετραγωνική προβολή κάθετα στη ροή, το αδιάστατο ισοδύναμο ύψος τραχύτητας k_s/h είναι περίπου 10. Σχετικά μικρές είναι οι διαφοροποιήσεις που οφείλονται στο σχήμα ή στην πυκνότητα της διάταξης, και πάντως τη μέγιστη τραχύτητα εμφανίζουν τα ελάσματα.

(γ) Καμπυλόγραμμα εμπόδια (κύλινδροι, ημισφαίρια κάθετα) με ίδια επιφάνεια προβολής κάθετα στη ροή όπως τα παραπάνω έχουν περίπου τη μισή τιμή k_s/h .

(δ) Επιμήκη γωνιώδη εμπόδια (παραλληλεπίπεδα) παρουσιάζουν επίσης τη μισή τιμή k_s/h , ενώ επιμήκη καμπυλόγραμμα (ημισφαίρια παράλληλα) τη μισή των γωνιωδών. Τα ημισφαίρια εμφανίζουν την ελάχιστη ισοδύναμη τραχύτητα από όλα τα εμπόδια που μελετήθηκαν.

(ε) Το k_s/h λεπτών κατακόρυφων ράβδων εξαρτάται σημαντικά από την πυκνότητά τους. Η τιμή του είναι κατά προσέγγιση ίση με εκείνη των κυλίνδρων ίδιου ύψους και μισής πυκνότητας διάταξης θ .

(στ) Τα παρόντα αποτελέσματα συμφωνούν ικανοποιητικά με τα επεξεργασμένα στοιχεία των Herbich & Shulits (1964), παρά τη μεγάλη διαφορά κλίσεων των πειραματικών συσκευών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Bathurst, J.C., 1985. *Flow resistance estimation in mountain rivers*. J. Hydraulic Engineering, 111 (4), 625-658.
- Christodoulou, G.C., Kostidou, E. and Vassilakos, P., 2012. *Resistance to flow over submerged obstacles in a step channel*. 2nd European IAHR Congress, Munich, Germany, 27-29 June.
- Herbich, J.B. and Shulits, S., 1964. *Large-scale roughness in open-channel flow*. J. Hydraulics Div. ASCE, 90 (HY6), 203-230.
- Huthoff, F., 2012. *Theory for flow resistance caused by submerged roughness elements*. J. Hydraulic Research, 50 (1), 10-17.
- Järvelä, J., 2002. *Flow resistance of flexible and stiff vegetation: A flume study with natural plants*. J. of Hydrology, 269, 44-54.
- Kouwen, N. and Unny, T.E., 1973. *Flexible roughness in open channels*. J. Hydraulics Div. ASCE, 99 (HY5), 713-727.
- Lettau, H., 1969. *Note on aerodynamic roughness parameter estimation on the basis of roughness element description*. J. Appl. Meteorol., 8 (5), 828-832.
- Pagliara, S., Carnacina, I. and Roshni, T., 2010. *Self-aeration and friction over rock chutes in uniform flow conditions*. J. Hydraulic Engineering, 136 (11), 959-964.
- Peterka, A.J., 1958. *Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators*. Engineering Monograph 25, US Bureau of Reclamation, Denver, Colorado, USA
- Rice, A.T., Kadavy, K.C. and Robinson, K.M., 1998. *Roughness of loose rock riprap on steep slopes*. J. Hydraulic Engineering, 134 (8), 1042-1051.
- Vischer, D.L., 1995. *Types of Energy Dissipators*, in Vischer, D.L. and Hager, W.H. (eds), *Energy Dissipators*. Hydraulic Structures Design Manual No. 9, I.A.H.R., Balkema, Rotterdam, The Netherlands.
- Βασιλάκος, Π., 2010. *Πειραματική διερεύνηση ροής ανοικτού αγωγού μεγάλης κλίσης με βυθισμένα εμπόδια*. Διπλωματική εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, Αθήνα.
- Κωστίδου, Ε., 2010. *Πειραματική διερεύνηση ροής σε ανοικτό αγωγό με μεγάλα στοιχεία τραχύτητας*. Διπλωματική εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, Αθήνα.
- Χριστοδούλου, Γ. και Παπαθανασιάδης, Τ., 2009. *Ροή σε αγωγό μεγάλης κλίσης με οδοντώσεις*. Πρακτικά Κοινού Συνεδρίου ΕΥΕ & ΕΕΔΥΠ, «Ολοκληρωμένη διαχείριση υδατικών πόρων σε συνθήκες κλιματικών αλλαγών», Βόλος, 27-30 Μαΐου, 419-426.

ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΥΡΒΩΔΟΥΣ ΡΟΗΣ ΣΕ ΑΝΟΙΚΤΟ ΑΓΩΓΟ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΕΓΚΑΡΣΙΟ ΠΡΟΒΟΛΟ

Θεοφανώ Ι. Κουτρουβέλη, Νικόλαος Θ. Φουρνιώτης,
Αλέξανδρος Κ. Δημητρακόπουλος, Αθανάσιος Α. Δήμας

Εργαστήριο Υδραυλικής Μηχανικής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα 26500, E-mail: nfou@upatras.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Μελετάται αριθμητικά η τρισδιάστατη τυρβώδης ροή σε ανοικτό αγωγό στον οποίο υφίσταται εγκάρσιος πρόβολος. Επιλύονται οι εξισώσεις RANS, ενώ για το "κλείσιμο" της τύρβης χρησιμοποιούνται τα μοντέλα δύο εξισώσεων $k-\varepsilon$ και $k-\omega$. Η διαχείριση της ελεύθερης επιφάνειας γίνεται με τη μέθοδο VOF. Παρουσιάζονται αποτελέσματα για την περίπτωση με σταθερό λόγο πλάτους καναλιού προς μήκος προβόλου, $B/b = 6$ και προεξέχοντος προβόλου. Οι αριθμητικές προβλέψεις για την ταχύτητα και την κατανομή της διατμητικής τάσης στην περιοχή του προβόλου βρίσκονται σε συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα των Rajaratnam & Nwachukwu (1983). Τα αριθμητικά αποτελέσματα δείχνουν ότι η μέση στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας μειώνεται στην περιοχή του προβόλου, ενώ στα κατάντη δημιουργείται ζώνη ανακυκλοφορίας της ροής και επανακόλληση σε απόσταση, κατά μέσο όρο $x_R/b \cong 17.2$ από την κατάντη παρειά του προβόλου.

THREE-DIMENSIONAL NUMERICAL SIMULATION OF TURBULENT OPEN-CHANNEL FLOW AROUND A GROUYNE

Theofano I. Koutrouveli, Nikolaos Th. Fourniotis,
Alexander C. Demetracopoulos, Athanassios A. Dimas

Hydraulic Engineering Laboratory, Department of Civil Engineering,
University of Patras, Patras 26500, Greece, E-mail: nfou@upatras.gr

ABSTRACT

The three-dimensional, turbulent flow in an open-channel with a single groyne is studied by numerical solution of the RANS equations utilizing the $k-\varepsilon$ and the $k-\omega$ turbulence models and the VOF free-surface formulation. Results are presented for the case of constant channel width to groyne length ratio, $B/b = 6$ and a groyne which is not submerged. Computed velocities and bed shear stresses are in good agreement with the experimental data in Rajaratnam & Nwachukwu (1983). The computations show that the mean free-surface lowers near the groyne area, while downstream of the groyne a recirculation zone is created with a reattachment point at a depth-averaged distance of $x_R/b \cong 17.2$ from the downstream face of the groyne.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διαχείριση ποταμών και χειμάρρων είναι συχνά αναγκαία και αφορά τη σταθεροποίηση της κοίτης, όπου λαμβάνει χώρα η κυρίως ροή, ώστε να διατηρείται η επιθυμητή διατομή και το επιθυμητό βάθος ροής, αλλά και να αποφεύγεται η διάβρωση των οχθών σε έντονα πλημμυρικά φαινόμενα. Βασικές αιτίες μεταβολής της διαίτας ποταμών και χειμάρρων αποτελούν οι διάφορες φυσικές διεργασίες και η ανθρώπινη παρέμβαση, που μπορούν βαθμιαία να διαταράξουν το ισοζύγιο μεταξύ του φορτίου ιζήματος που προσφέρεται στο υδατόρρευμα και της μεταφορικής ικανότητας της ροής σε στερεομεταφορά. Στα πλαίσια διατήρησης ή αποκατάστασης των ποταμών, έναντι των διαταραχών αυτών, συχνά κρίνεται απαραίτητη η κατασκευή έργων διαχείρισης όπως διαμήκεις και εγκάρσιες κατασκευές για την προστασία των οχθών, καθώς και βοηθητικά έργα όπως καθαρισμός της κοίτης από αποθέσεις.

Ειδικότερα, οι εγκάρσιες κατασκευές που δομούνται με μια γωνία ως προς τη ροή έτσι ώστε να εκτρέπουν το νερό μακριά από κρίσιμες περιοχές, αποτελούν συγκεκριμένο μέσο προστασίας των οχθών ενός ποταμού ή χειμάρρου, γνωστό ως εγκάρσιο πρόβολο (groynes). Οι πρόβολοι αυτοί μπορεί να είναι διαπερατοί, οπότε να επιτρέπουν στο νερό να διέρχεται μέσω αυτών με μειωμένη ταχύτητα, ή μη-διαπερατοί οπότε να εμποδίζουν ή να εκτρέπουν τη ροή. Επιπλέον, μπορούν να κατασκευάζονται είτε βυθισμένοι είτε προεξέχοντες. Συνήθως οι μη διαπερατοί πρόβολοι σχεδιάζονται να είναι προεξέχοντες, καθώς η ροή πάνω από τη στέψη τους μπορεί να προκαλέσει τοπική διάβρωση της όχθης. Οι πρόβολοι διακρίνονται επίσης, ανάλογα με την κλίση τους ως προς τη διεύθυνση της ροής. Οι πρόβολοι προσέλκυσης έχουν κλίση προς τα κατάντη και χρησιμεύουν στο να έλκουν τη ροή προς το μέρος τους. Οι πρόβολοι εκτροπής τοποθετούνται κάθετα στην όχθη και χρησιμεύουν για τοπική προστασία, αλλάζοντας την κατεύθυνση της ροής χωρίς να την αποκρούουν. Τέλος, οι πρόβολοι απόθησης έχουν κλίση προς τα ανάντη και χρησιμεύουν για να απωθήσουν τη ροή μακριά τους.

Για την ορθή λειτουργία των έργων προστασίας που αποτελούνται από σειρά εγκαρσίων προβόλων, καθοριστικής σημασίας είναι η επιλογή της απόστασης μεταξύ των προβόλων καθώς και ο επιτυχής προσανατολισμός τους ως προς τη διεύθυνση της ροής. Συνήθως, η απόσταση μεταξύ των προβόλων εκφράζεται ως ένα πολλαπλάσιο του μήκους του προβόλου. Ο Richardson (1975) προτείνει μια απόσταση από 1.5 έως 6 φορές το μήκος του προβόλου. Για προστασία της όχθης ο λόγος αυτός μπορεί να είναι μικρότερος. Όταν η απόσταση μεταξύ των προβόλων είναι πολύ μεγάλη αναπτύσσεται μεταξύ των προβόλων μαιανδρική ροή, αντιθέτως μειώνοντας σημαντικά την απόσταση το σύστημα λειτουργεί λιγότερο αποτελεσματικά χωρίς να γίνεται η καλύτερη χρήση του κάθε μεμονωμένου προβόλου. Το πεδίο ροής στην περιοχή των προβόλων διαφέρει σημαντικά στην περίπτωση του ενός προβόλου σε σχέση με αυτό που παρατηρείται όταν έχουμε μια σειρά από πρόβλους. Για τον μεμονωμένο πρόβολο, η ροή χαρακτηρίζεται από ταπείνωση της ελεύθερης επιφάνειας στην περιοχή του μετώπου του προβόλου που γίνεται εντονότερη πλησίον του μετώπου και αμέσως κατάντη αυτού. Κατάντη της παρειάς του προβόλου, κατά τη διεύθυνση της ροής, σχηματίζεται μια περιοχής αποκόλλησης που χαρακτηρίζεται από έντονη ανακυκλοφορία και υψηλό τυρβώδες. Ειδικότερα, για την περιοχή αποκόλλησης οι Chen & Ikeda (1997) παρατήρησαν ότι το μήκος επανακόλλησης της ροής κυμαίνεται από $11b$ έως $17b$, όπου b το μήκος του προβόλου. Αντίστοιχες τιμές προκύπτουν και από τις πειραματικές μελέτες των Rajaratnam & Nwachukwu (1983), Tingsanchali & Maheswari (1990) και Ouillon & Dartus (1997), όπου το μήκος επανακόλλησης είναι της τάξης των $11.5b$, $12.5b$ και $12b$, αντιστοίχως.

Στην παρούσα εργασία εφαρμόζεται ο κώδικας πεπερασμένων όγκων FLUENT (Fluent, 2005) για την μελέτη του τρισδιάστατου πεδίου ροής γύρω από την περιοχή

ενός προβόλου. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του προβόλου λαμβάνονται σύμφωνα με την εργασία των Rajaratnam & Nwachukwu (1983). Πρόκειται για την περίπτωση όπου $B/b = 6$, η οποία αντιστοιχεί σε τυπική τιμή από εκείνες που συχνά παρατηρούνται στην κατασκευή έργων προστασίας οχθών ποταμών και χειμάρρων. Σκοπός είναι να εξετασθεί η επίδραση του προβόλου στα χαρακτηριστικά της ροής. Επιλύονται αριθμητικά οι εξισώσεις RANS ενώ για το "κλείσιμο" της τύρβης χρησιμοποιούνται τα μοντέλα δύο εξισώσεων $k-\varepsilon$ και $k-\omega$. Η διαχείριση της ελεύθερης επιφάνειας πραγματοποιείται με την εφαρμογή μιας τροποποιημένης μεθόδου (VOF) του κλάσματος του όγκου του ρευστού (Hirt & Nichols, 1981), ενώ η αριθμητική επίλυση βασίζεται στην μέθοδο διακριτοποίησης των πεπερασμένων όγκων.

Τα αριθμητικά αποτελέσματα συγκρίνονται με τα πειραματικά δεδομένα από την εργασία των Rajaratnam & Nwachukwu (1983). Υπολογίζεται το γενικό πεδίο ροής, οι ταχύτητες στην άμεση γειτονία του προβόλου, καθώς και η κατανομή της διατμητικής τάσης σε χαρακτηριστικές θέσεις γύρω από τον πρόβολο. Τέλος, εκτιμάται το σημείο επανακόλλησης της ροής στα κατάντη του προβόλου κατά τη διεύθυνση της ροής.

2. ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ ΡΟΗΣ

Στην παρούσα εργασία μελετάται η μόνιμη, ασυμπίεστη, τυρβώδης ροή σε ανοικτό αγωγό με εφαρμογή των εξισώσεων RANS. Η ροή περιγράφεται από τις εξισώσεις της συνέχειας και της ορμής οι οποίες λαμβάνουν, αντιστοίχως, τη μορφή:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.1)$$

$$U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + g_i \quad (2.2)$$

όπου U_i είναι η μέση ως προς τον χρόνο τιμή της ταχύτητας κατά την διεύθυνση x_i , g_i είναι οι συνιστώσες του διανύσματος της επιτάχυνσης της βαρύτητας κατά τους άξονες $x_1 \equiv x$, $x_2 \equiv y$ (επίπεδο παράλληλο με πυθμένα) και $x_3 \equiv z$ (διεύθυνση κάθετη στον πυθμένα με φορά προς άνω), ρ είναι η πυκνότητα, P είναι η δυναμική πίεση, και τ_{ij} είναι ο τανυστής των τάσεων. Ισχύει

$$\tau_{ij} = \rho \nu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \overline{\rho u_i u_j} = \rho (\nu + \nu_t) \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (2.3)$$

όπου ν είναι το κινηματικό ιξώδες του ρευστού, u_i είναι η τυρβώδης διακύμανση της ταχύτητας, ν_t το τυρβώδες ιξώδες, k η τυρβώδης κινητική ενέργεια και δ_{ij} η συνάρτηση δέλτα του Kronecker. Οι τάσεις Reynolds $-\overline{\rho u_i u_j}$, οι οποίες εκφράζουν την επίδραση των τυρβωδών διακυμάνσεων στη μέση ροή, υπολογίζονται χρησιμοποιώντας την προσέγγιση Boussinesq. Για το "κλείσιμο" της τύρβης θα πρέπει να εισαχθεί κάποιο από τα γνωστά μοντέλα τυρβωδών τάσεων. Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκαν τα μοντέλα δύο εξισώσεων $k-\varepsilon$ και $k-\omega$ (Fluent, 2005).

Ο υπολογισμός της μεταβολής της ελεύθερης επιφάνειας γίνεται με τη μέθοδο VOF, που βασίζεται στον ορισμό της μεταβλητής F , η οποία εκφράζει το κλάσμα του

όγκου του ρευστού (νερού). Οι βασικές εξισώσεις οι οποίες διέπουν την ροή του νερού καθώς και την ροή αέρα, κάτω και πάνω από την ελεύθερη επιφάνεια, αντιστοιχώς, εκφράζονται ως ένας ενιαίος τύπος όπως αυτός δίνεται από τις εξισώσεις (1) και (2), με τη διαφορά ότι οι φυσικές ιδιότητες οι οποίες εμφανίζονται στις εξισώσεις (1) και (2) καθορίζονται πλέον με βάση το ποσοστό όγκου του κάθε ρευστού ως ένα είδος μέσων τιμών των φυσικών ιδιοτήτων για το νερό και τον αέρα σύμφωνα με τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\rho = F\rho_{water} + (1-F)\rho_{air} \quad \mu = F\mu_{water} + (1-F)\mu_{air} \quad (2.4)$$

όπου μ είναι το ιξώδες του ρευστού. Το κλάσμα του όγκου του νερού ικανοποιεί την εξίσωση:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + U_i \frac{\partial F}{\partial x_i} = 0 \quad (2.5)$$

Για την αριθμητική εφαρμογή της VOF με την μέθοδο των πεπερασμένων όγκων, σε κάθε υπολογιστικό κελί, το κλάσμα του όγκου του νερού καθορίζεται ως $F = \delta V_{water} / \delta V_{cell}$ όπου δV_{cell} είναι ο όγκος του υπολογιστικού κελιού και δV_{water} είναι ο όγκος του νερού. Επομένως, έχουμε $F=1$, $F=0$ ή $0 < F < 1$ όταν το κελί είναι γεμάτο με νερό, με αέρα ή εμπεριέχει ελεύθερη επιφάνεια, αντιστοιχώς.

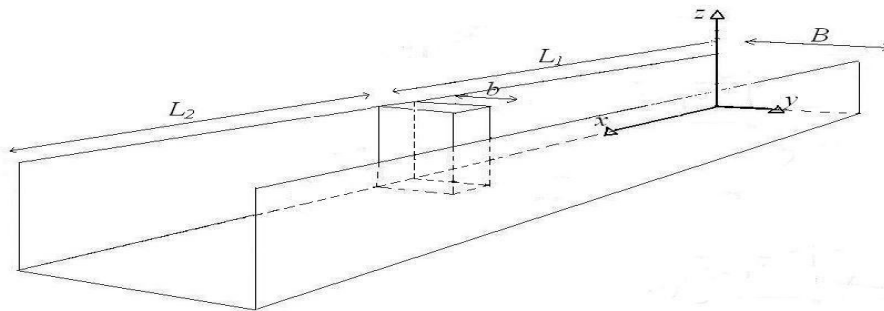
3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ

Στην παρούσα μελέτη, θεωρείται τυρβώδης ροή σε ανοικτό αγωγό στον οποίο υφίσταται εγκάρσιος πρόβολος (groynes). Αρκετά μακριά από τη θέση του προβόλου, όπου ο πυθμένας του καναλιού είναι επίπεδος, θεωρείται κανονικό βάθος $d = 0.189\text{m}$, υποκρίσιμη ροή με αριθμό Froude $Fr = U / \sqrt{gd} = 0.19$, όπου $U = 0.262\text{m/s}$ είναι η μέση ταχύτητα, και τα τοιχώματα του αγωγού θεωρούνται υδραυλικά λεία. Επίσης, θεωρείται θερμοκρασία νερού 20°C με πυκνότητα $\rho = 998.2\text{Kg/m}^3$ και κινηματικό ιξώδες $\nu = 1.005 \times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$. Σύμφωνα με μονοδιάστατη ανάλυση της ροής, η κλίση του πυθμένα του αγωγού, που αντιστοιχεί στα παραπάνω δεδομένα, είναι $S = 7 \times 10^{-5}$. Τέλος, ο αριθμός Reynolds είναι $Re = 4dU / \nu = 4.75 \times 10^4$, που αντιστοιχεί σε πλήρως αναπτυγμένη τυρβώδη ροή, η ταχύτητα τριβής είναι $U^* = \sqrt{gdS} = 0.0114\text{m/s}$ και το ύψος τραχύτητας των τοιχωμάτων είναι $K_s / d = 1.06 \times 10^{-3}$, που αντιστοιχεί στην περιοχή υδραυλικώς λείου τοιχώματος καθώς $K_s^+ = U^* K_s / \nu \leq 2.25$ (Fluent, 2005). Για την περίπτωση του υδραυλικώς λείου τοιχώματος που μελετάμε, και, προκειμένου να βρισκόμαστε στην περιοχή ισχύος του λογαριθμικού νόμου της ταχύτητας, επιλέγουμε ο πρώτος υπολογιστικός κόμβος να βρίσκεται σε απόσταση $z \cong 3 \times 10^{-3}\text{m}$ από το τοίχωμα, η οποία αντιστοιχεί σε $z^+ = 70$. Οι παραπάνω τιμές των χαρακτηριστικών της ροής επελέγησαν σε συμφωνία με την εργασία των Rajaratnam & Nwachukwu (1983), οι οποίοι πραγματοποίησαν σειρά πειραμάτων για τη μελέτη της ροής γύρω από ένα πρόβολο.

Η αριθμητική επίλυση των εξισώσεων της ροής βασίζεται σε χωρική διακριτοποίηση με τη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων, χρησιμοποιώντας τον κώδικα πεπερασμένων όγκων FLUENT (Fluent, 2005). Η εφαρμογή της μεθόδου VOF για τη

διαχείριση της ελεύθερης επιφάνειας απαιτεί τη χρήση ενός διαφασικού πεδίου ροής με νερό και αέρα. Αρχικά, το στρώμα νερού έχει ομοιόμορφο βάθος d , που είναι ίσο με το κανονικό βάθος ροής σε ανοικτό αγωγό επάνω από επίπεδο πυθμένα. Το πάχος του στρώματος αέρα τέθηκε ίσο με $1.5d$ έτσι ώστε το άνω όριο του υπολογιστικού πεδίου να μην επηρεάζει την ανάπτυξη της διεπιφάνειας νερού-αέρα. Στην παρούσα μελέτη, τα μήκη αδιαστατοποιούνται με το βάθος ροής, d , και το μήκος του προβόλου, b .

Ο εγκάρσιος πρόβολος τοποθετείται αρκετά μακριά τόσο από το όριο εισόδου του αγωγού, έτσι ώστε η ροή να θεωρείται πλήρως ανεπτυγμένη πριν την θέση αυτή, όσο και από το όριο εξόδου του αγωγού. Στην παρούσα μελέτη, το συνολικό μήκος του υπολογιστικού πεδίου είναι 36.576m ($= 240b$) και η ανάντη παρειά του προβόλου τοποθετείται σε απόσταση $L_1 = 18.96\text{m}$ ($= 120b$) από την είσοδο του αγωγού (Σχήμα 1). Στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων, το $x=0$ αντιστοιχεί στην είσοδο του καναλιού, το $y=0$ στο δεξιά πλευρικό τοίχωμα και το $z=0$ στον πυθμένα του καναλιού (Σχήμα 1). Ο πρόβολος τοποθετείται κάθετα στο πλευρικό τοίχωμα του αγωγού δημιουργώντας γωνία 90° με την κατεύθυνση της ροής και προεξέχει πάνω από την ελεύθερη επιφάνεια του νερού. Το μέτωπο του προβόλου, πάχους 0.009m , ευρίσκεται σε απόσταση $b = 0.1524\text{m}$ από το δεξιά πλευρικό τοίχωμα και το ύψος του είναι $h = 0.3\text{m}$. Το πλάτος του καναλιού είναι $B = 0.9144\text{m}$, έτσι ώστε $B/b = 6$. Οι διαστάσεις έχουν επιλεγεί ίδιες με εκείνες που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα των Rajaratnam & Nwachukwu (1983).



Σχήμα 1. Σκαρίφημα υπολογιστικού πεδίου ροής σε ανοικτό αγωγό όπου υφίσταται εγκάρσιος πρόβολος.

Το υπολογιστικό πλέγμα είναι ανομοιόμορφο κατά τις τρεις διευθύνσεις. Κατά τη διεύθυνση x , το μέγεθος του πλέγματος είναι $0.05 \leq \Delta x / b \leq 2$ με τις μικρότερες τιμές στην περιοχή του προβόλου. Κατά τη διεύθυνση y , το μέγεθος του πλέγματος κοντά στα τοιχώματα είναι $\Delta y / d = 0.04$ ενώ αυξάνει βαθμιαίως και αμφιπλευρως έως το μέσο του πλάτους του καναλιού σε $\Delta y / d = 0.12$. Στην διεύθυνση z , το μέγεθος του πλέγματος στο τοίχωμα είναι $\Delta z / d = 0.03$ (περίπου δύο φορές το ύψος τραχύτητας των τοιχωμάτων) καθώς και στη διεπιφάνεια νερού-αέρα ($z/d = 1$). Στην ενδιάμεση περιοχή αυξάνει βαθμιαίως και αμφιπλευρως σε $\Delta z / d = 0.15$. Τέλος, αυξάνει βαθμιαίως στη ζώνη του αέρα και μέχρι του άνω ορίου της σε $z/d = 2.5$. Ο συνολικός αριθμός των υπολογιστικών κελιών είναι 3.34×10^6 .

Τα σχήματα χωρικής διακριτοποίησης τα οποία εφαρμόστηκαν είναι: PRESTO για την πίεση, QUICK για την ορμή, την τυρβώδη κινητική ενέργεια k , την τυρβώδη ανάλωσή της ε και τον συντελεστή της ειδικής ανάλωσης ω , ενώ για την εφαρμογή της μεθόδου VOF χρησιμοποιείται το σχήμα modified HRIC. Για την σύζευξη πίεσης-ταχύτητας χρησιμοποιείται το σχήμα PISO. Για ευσταθή σύγκλιση, χρησιμοποιούμε μικρούς συντελεστές υπο-χαλάρωσης: 0.1 για την πίεση, την ορμή, την τυρβώδη

κινητική ενέργεια, την ανάλωση της τυρβώδους κινητικής ενέργειας, τον συντελεστή της ειδικής ανάλωσης και το κλάσμα του όγκου του νερού και 1 για την πυκνότητα, τις δυνάμεις πεδίου και το τυρβώδες ιξώδες (Fluent, 2005). Η εξίσωση συνέχειας καθώς και οι εξισώσεις μεταφοράς για τις ταχύτητες, οι τυρβώδεις ποσότητες και η εξίσωση του κλάσματος του όγκου του νερού, επιλύονται για μόνιμη κατάσταση μέχρι να επιτευχθούν συνθήκες ισορροπίας.

Στο όριο εισόδου, επιβάλλεται ομοιόμορφη κατανομή της διαμήκου ταχύτητας για το στρώμα του νερού με μέτρο ίσο με την μέση ταχύτητα $U = 0.262 \text{ m/s}$. Ομοιόμορφη κατανομή της ταχύτητας με μέτρο ίσο με $10\% \times U$ επιβάλλεται για το στρώμα του αέρα. Έχει παρατηρηθεί ότι εάν δεν επιτραπεί είσοδος αέρα από το όριο εισόδου ή εάν το ποσοστό του εισερχόμενου αέρα είναι πολύ μικρό, τότε παρατηρούνται μεγάλες περιοχές ανακυκλοφορίας του αέρα πάνω από το στρώμα του νερού (Dimas *et al.* 2008). Η αναστροφή αυτή του αέρα προς τα ανάντη του αγωγού προκαλεί υπολογιστική αστάθεια (Ma *et al.* 2000). Η τυρβώδης κινητική ενέργεια k καθώς και η ανάλωσή της ε στο επίπεδο εισόδου καθορίζονται, αντιστοίχως, από τις εκφράσεις $k = (IU)^2$ και $\varepsilon = C_\mu^{3/4} k^{3/2} (0.1d)^{-1}$ (Versteeg & Malalasekera, 1995), όπου I είναι η ένταση της τύρβης και C_μ σταθερά ίση με 0.09. Στην παρούσα εργασία, υποθέτουμε $I = 0.03$ τόσο για το στρώμα του νερού όσο και του αέρα. Επιπλέον, για την εφαρμογή του μοντέλου $k-\omega$ θεωρούμε στην είσοδο του νερού και του αέρα τιμή του ω που εκτιμάται από την έκφραση $\omega = C_\mu^{-1/4} k^{1/2} (0.1d)^{-1}$.

Στο όριο εξόδου του αγωγού, εφαρμόζεται διόρθωση σε όλες τις μεταβλητές, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται διατήρηση της μάζας και μηδενισμός των παραγώγων κάθετα στο όριο εξόδου. Το επίπεδο του νερού στην έξοδο δεν προκαθορίζεται αλλά προσδιορίζεται υπολογιστικά σύμφωνα με την οριακή συνθήκη εξόδου.

Στον πυθμένα, εφαρμόζεται η συνθήκη μη-ολίσθησης και χρησιμοποιείται η προσέγγιση των συναρτήσεων τοιχώματος, βάσει των οποίων δεν επιλύεται το στρωτό οριακό υπόστρωμα. Στο άνω όριο του υπολογιστικού πεδίου, άνω όριο του στρώματος αέρα, εφαρμόζεται οριακή συνθήκη συμμετρίας. Συνθήκη συμμετρίας καθορίζεται και στον πυθμένα του αγωγού, για $0 \leq x/b \leq 5$, προκειμένου να αποφευχθεί απότομη μετάβαση από την ομοιόμορφη κατανομή της ταχύτητας στη διατομή εισόδου στο οριακό στρώμα του πυθμένα.

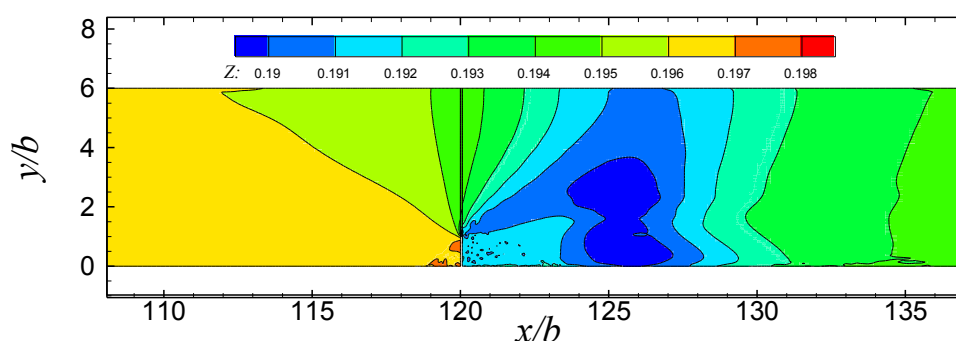
Οι αρχικές τιμές, τόσο στο στρώμα του νερού όσο και του αέρα, για την ταχύτητα, την τυρβώδη κινητική ενέργεια και το ποσοστό ανάλωσής της είναι ίσες με τις αντίστοιχες τιμές που ετέθησαν στο όριο εισόδου.

4. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Αρχικά, θεωρείται η αντίστοιχη τυρβώδης ροή σε ανοικτό αγωγό με επίπεδο πυθμένα στον οποίο δεν έχει τοποθετηθεί εγκάρσιος πρόβολος, τόσο για επαλήθευση του κώδικα όσο και σαν βάση για σύγκριση με τα αποτελέσματα του προβλήματος της ροής γύρω από τον πρόβολο. Η κατανομή διατμητικής τάσης στον άξονα του πυθμένα του αγωγού και για τα δυο μοντέλα τύρβης λαμβάνει σταθερή τιμή το μέτρο της οποίας συμφωνεί με το αποτέλεσμα της μονοδιάστατης ανάλυσης, $\tau_w = \rho g d S = 0.1293 \text{ Pa}$ μετά τη θέση $x/b \approx 40$, όπου τελειώνει η μετάβαση και η ροή γίνεται πλήρως ανεπτυγμένη. Η κατανομή της διαμήκου ταχύτητας μετά τις θέσεις $x/b = 70$ συμφωνεί με τον λογαριθμικό νόμο πλήρους ανεπτυγμένης ροής σε ανοικτό αγωγό. Όσον αφορά την κατανομή του τυρβώδους ιξώδους $\mu_t = \rho \nu_t$, τα αποτελέσματα ακολουθούν την παραβολική κατανομή προβλέποντας μέγιστη τιμή στον άξονα του καναλιού και

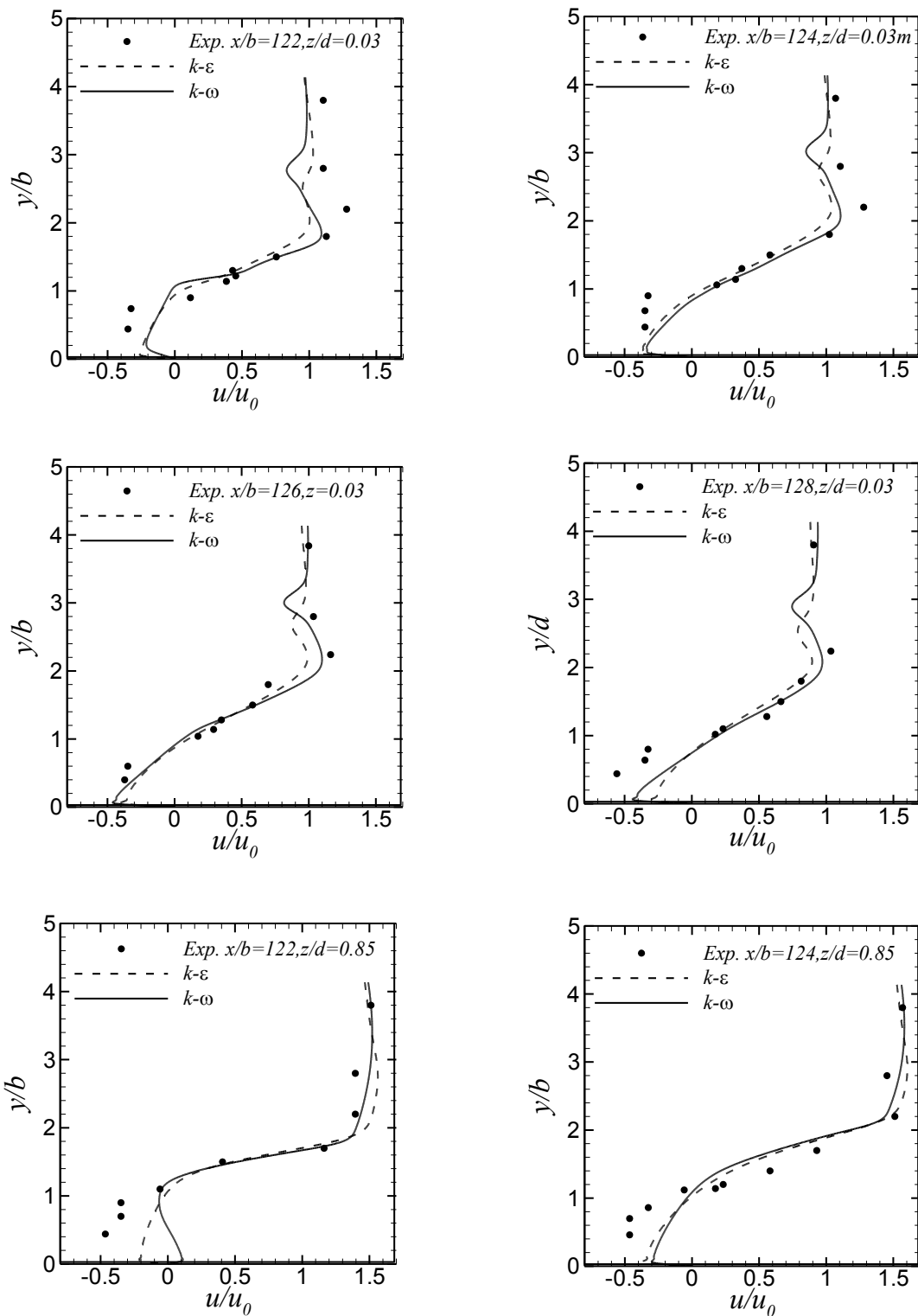
περίπου στο μέσο του βάθους ροής, σε συμφωνία με τις αναλυτικές εκφράσεις των Nezu & Nakagawa (1993).

Η τυρβώδης ροή σε ανοικτό αγωγό στην περιοχή του εγκάρσιου προβόλου χαρακτηρίζεται από μεταβολή του επιπέδου της ελεύθερης επιφάνειας, αποκόλληση της ροής στο μέτωπο του προβόλου και μέγιστη επανακόλληση στα κατάντη σε απόσταση x_R από τη βάση του. Τυπική κατανομή διαμόρφωσης της ελεύθερης επιφάνειας, γύρω από τον πρόβολο, παρουσιάζεται στο Σχήμα 2. Η μέση στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας μειώνεται στην άμεση γειτονία του προβόλου, στη διεύθυνση της ροής. Συγκεκριμένα δε, παρατηρείται πτώση τάξης 3mm μεταξύ της μέσης στάθμης ανάντη και μακριά από τον πρόβολο και της αντίστοιχης κατάντη του προβόλου.



Σχήμα 2. Τυπική διαμόρφωση της ελεύθερης επιφάνειας στην περιοχή του προβόλου.

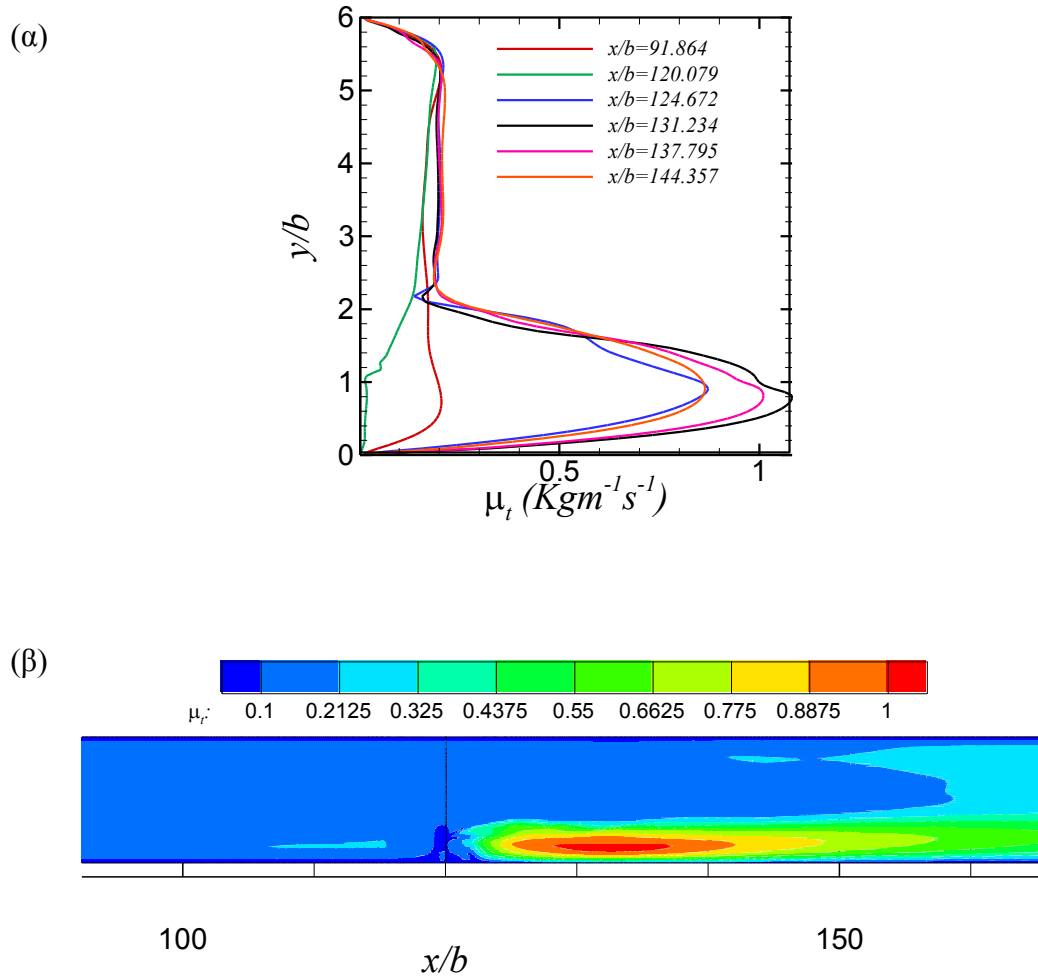
Οι κατανομές της ταχύτητας στο οριζόντιο επίπεδο (x, y) δίνονται για διάφορες διατομές ως προς το x αμέσως μετά τον πρόβολο, σε δύο διαφορετικά επίπεδα z . Τυπικές κατανομές της ταχύτητας, πλησίον του πυθμένα και κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια, στις θέσεις $z=0.00567\text{m}$ ($z/d=0.03$) και $z=0.16065\text{m}$ ($z/d=0.85$) δίνονται στο Σχήμα 3. Σε όλες τις περιπτώσεις η ροή φαίνεται να επιταχύνεται αυξάνοντας κατά 50% περίπου την ταχύτητά της στη διατομή που απομένει ανάμεσα στο μέτωπο του προβόλου και στο απέναντι τοίχωμα του αγωγού. Στο μέτωπο του προβόλου η ροή αποκολλάται, διαμορφώνοντας ένα θύλακα ανακυκλοφορίας στα κατάντη, επανακολλάται σε μέση απόσταση x_R από την κατάντη παρειά του προβόλου και επιταχύνεται ξανά αποκτώντας ομοιόμορφη κατανομή μέχρι την έξοδο του αγωγού. Στο Σχήμα 3, οι κατανομές της ταχύτητας σε διάφορες διατομές συγκρίνονται με πειραματικές μετρήσεις από την εργασία των Rajaratnam & Nwachukwu (1983). Η συμφωνία μεταξύ αριθμητικών προβλέψεων και πειραματικών δεδομένων είναι ικανοποιητική ιδιαίτερα στην περιοχή ανάπτυξης του διατμητικού στρώματος (shear layer) όπου $1 < y/b < 2$ και λιγότερο ικανοποιητική στην περιοχή ανακυκλοφορίας της ροής. Ειδικότερα, για $y/b < 1$ η ανακυκλοφορία της ροής περιγράφεται λιγότερο καλά από τα μοντέλα τύρβης, που προβλέπουν μικρότερες τιμές για τις αρνητικές ταχύτητες στην περιοχή ανακυκλοφορίας, με ικανοποιητικότερη τη συμπεριφορά του μοντέλου $k-\omega$, που φαίνεται εν γένει να περιγράφει καλύτερα τη ροή στην περιοχή αποκόλλησης.



Σχήμα 3. Εγκάρσια προφίλ της διαμήκουσ ταχύτητας σε χαρακτηριστικές διατομές χρησιμοποιώντας τα μοντέλα τύρβης $k-\epsilon$ και $k-\omega$.

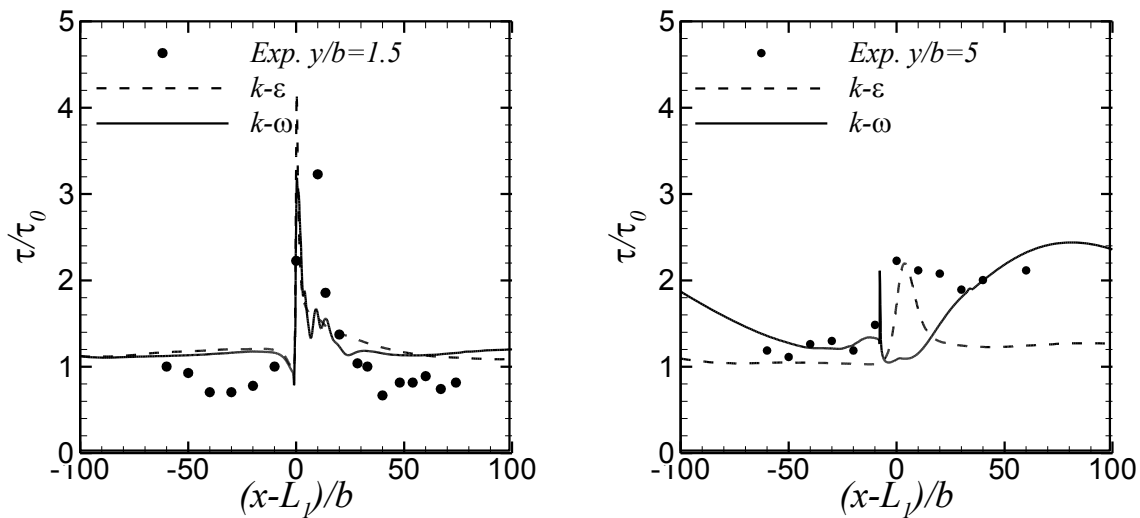
Η ένταση της τύρβης κατά την εγκάρσια διεύθυνση y , δίνεται στο Σχήμα 4 για βάθος ροής $z=0.1m$ ($z/d=0.5$) σε χαρακτηριστικές θέσεις κατά τη διεύθυνση της ροής, x/b . Σημαντική είναι η αύξηση της έντασης της τύρβης αμέσως μετά τη θέση $x/b=120$, όπου έχει τοποθετηθεί ο εγκάρσιος πρόβολος. Οι τιμές του τυρβώδους

ιξώδους για $x/b > 120$ αντιστοιχούν στην περιοχή ανακυκλοφορίας που διαμορφώνεται κατάντη του προβόλου στην κατεύθυνση της ροής. Η επίδραση της παρουσίας του προβόλου περιορίζεται μετά τη θέση $x/b \cong 138$. Η μέγιστη τιμή του τυρβώδους ιξώδους παρατηρείται στη θέση $x/b \cong 131$, που βρίσκεται εντός του θύλακα ανακυκλοφορίας της ροής, και βαίνει μειούμενη καθώς απομακρυνόμαστε από τη θέση $x/b \cong 138$, όπου παρατηρείται επανακόλληση της ροής.



Σχήμα 4. Κατανομή του τυρβώδους ιξώδους σε βάθος $z/d = 0.5$: (α) Εγκάρσια προφίλ σε χαρακτηριστικές θέσεις x/b κατάντη του προβόλου, και (β) Ισοϋψείς καμπύλες.

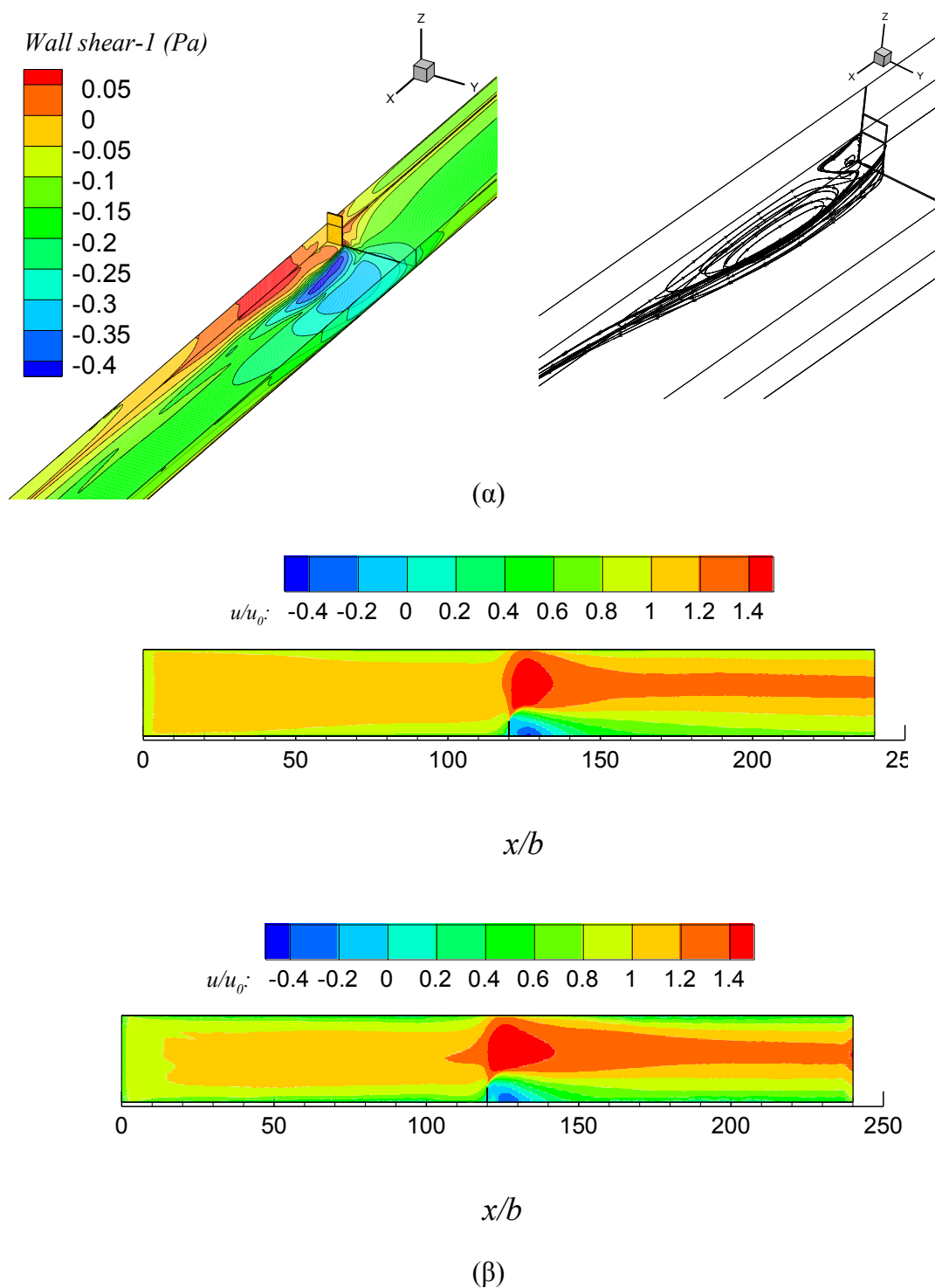
Τυπική κατανομή της διατμητικής τάσης στον πυθμένα του καναλιού δίνεται στο Σχήμα 5. Η μέγιστη τιμή της παρατηρείται στη θέση $x - L_1 = 0$ όπου έχει τοποθετηθεί ο πρόβλος. Ανάντη και κατάντη του προβόλου η διατμητική τάση λαμβάνει την ίδια περίπου τιμή με εκείνη που έχει προκύψει από τη μονοδιάστατη ανάλυση, όπου $\tau_w = 0.1293 \text{ Pa}$, καθώς και για την περίπτωση της αριθμητικής μελέτης της ροής χωρίς την παρουσία του προβόλου στον άξονα του καναλιού. Με βάση τις αριθμητικές προσομοιώσεις το εύρος της διατμητικής τάσης στη θέση $x - L_1 = 0$ αυξάνει με την μείωση της απόστασης y από το μέτωπο του προβόλου, με τη μέγιστη τιμή της διατμητικής τάσης να παρατηρείται στο μέτωπο του προβόλου, όπου $y/b = 1$, και την ελάχιστη στο όριο του απέναντι πλευρικού τοιχώματος, όπου $y/b = 6$.



Σχήμα 5. Κατανομή της διατμητικής τάσης στον πυθμένα, κατά μήκος της ροής στις θέσεις $y/b=1.5$ και $y/b=5$.

Με βάση τα σημεία μηδενισμού της διατμητικής τάσης στο πλευρικό τοίχωμα του αγωγού μπορεί να εκτιμηθεί το μέσο μήκος επανακόλλησης της ροής στα κατόντη του προβόλου. Συγκεκριμένα, ο γεωμετρικός τόπος των σημείων μηδενισμού της διατμητικής τάσης στο πλευρικό τοίχωμα σχηματίζουν καμπύλη, η οριζόντια απόσταση της οποίας από την κατόντη παρειά του προβόλου μειώνεται από $19.5b$ στον πυθμένα σε $15b$ κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια. Η μέση τιμή των αποστάσεων αυτών καλείται μήκος επανακόλλησης $x_R/b=17.2$. Η τιμή αυτή ευρίσκεται εντός των ορίων που προβλέπονται στη βιβλιογραφία (Chen & Ikeda, 1997) για την περίπτωση ενός προβόλου σε συνθήκες υποκρίσιμης ροής.

Στο Σχήμα 6α δίνεται σε αξονομετρική προβολή η κατανομή των διατμητικών τάσεων στην άμεση γειτονία του προβόλου, καθώς και γραμμές ροής που διαμορφώνεται πίσω από τον πρόβολο. Η διατμητική τάση στην περιοχή του προβόλου αποκτά σημαντικές τιμές, σε σχέση με εκείνες που παρατηρούνται πριν την παρουσία του προβόλου στον πυθμένα του καναλιού όπου $\tau_0 \cong -0.13\text{Pa}$ (βλ. χρωματική κλίμακα για τιμές από $-0,1$ έως $-0,15\text{ Pa}$). Ειδικότερα, στο μέτωπο του προβόλου, η τιμή της διατμητικής τάσης σχεδόν τριπλασιάζεται, $\tau_w \cong -0.4\text{Pa}$ (σε σχέση με την αναφερόμενη στον άξονα του καναλιού τιμή $\tau_0 \cong -0.13\text{Pa}$). Οι αριθμητικές προβλέψεις για την χωρική μεταβολή της διατμητικής τάσης βρίσκονται σε συμφωνία με τις πειραματικές τιμές που δίνονται στην εργασία των Rajaratnam and Nwachukwu (1983), στην οποία καταγράφεται περιοχή ίσου περίπου εμβαδού γύρω από την κορυφή του προβόλου, με εκείνο που προβλέπεται από τις αριθμητικές προσομοιώσεις, όπου η διατμητική τάση γίνεται τριπλάσια σε σχέση με εκείνη που υπολογίζεται στον άξονα του καναλιού χωρίς την παρουσία του προβόλου. Η τιμή αυτή γίνεται ακόμα μεγαλύτερη ακριβώς στο μέτωπο του προβόλου, όπου $y/b=1$, λαμβάνοντας τιμή $\tau_w/\tau_0 \cong 5$ σε συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα. Οι αρνητικές τιμές της διατμητικής τάσης στη χρωματική κλίμακα υποδηλώνουν την κατεύθυνση της ροής, δεδομένου ότι τα αποτελέσματα δίδονται για τις διατμητικές τάσεις που ασκεί το τοίχωμα στη ροή ενώ η θετική προσήμανση λαμβάνεται κατά την κατεύθυνση της ροής.



Σχήμα 6. (α) Κατανομή διατμητικής τάσης και γραμμές ροής στη ζώνη ανακυκλοφορίας κατάντη του προβόλου. (β) Πεδίο ταχυτήτων για $z/d=0.5$ και $z/d=1$ όπου διακρίνεται η μεταβολή κατά το βάθος της ζώνης ανακυκλοφορίας της ροής.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Για τυρβώδη ροή σε ανοικτό αγωγό όπου υφίσταται εγκάρσιος πρόβολος βρέθηκε ότι στην περιοχή του προβόλου το μέσο επίπεδο της ελεύθερης επιφάνειας μειώνεται στη

διεύθυνση της ροής. Η κατανομή της διατμητικής τάσης στον πυθμένα, και συγκεκριμένα στην περιοχή του προβόλου, παρουσιάζει το μέγιστο στο μέτωπο του προβόλου και μειώνεται κατά την εγκάρσια διεύθυνση, καθώς προσεγγίζει το απέναντι πλευρικό τοίχωμα του καναλιού. Η μέγιστη τιμή της διατμητικής τάσης εμφανίζεται στο μέτωπο του προβόλου με λόγο $\tau_w / \tau_0 \cong 5$. Η αποκόλληση της ροής στο μέτωπο του προβόλου ακολουθείται από μια περιοχή ανακυκλοφορίας του νερού και επανακόλληση σε μέση απόσταση $x_R / b \cong 17.2$ από την κατάντη παρειά του, σε συμφωνία με τις πειραματικές μετρήσεις των Rajaratnam & Nwachukwu (1983). Τα αποτελέσματα της τύρβης στην εγκάρσια διεύθυνση, όσον αφορά την κατανομή του τυρβώδους ιξώδους, ακολουθούν εν γένει την παραβολική κατανομή, ενώ δείχνουν αύξηση του τυρβώδους ιξώδους στα κατάντη του προβόλου, για $y/b < 1$, με τις μεγαλύτερες τιμές του μ_i να παρατηρούνται εντός της ζώνης ανακυκλοφορίας της ροής.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Chen, F. Y., and Ikeda, S., 1997. *Horizontal separation in shallow open channels with spur dikes*. Journal of Hydrosience and Hydraulic Engineering, 15(2): 15-30.
- Dimas, A. A., Fourniotis, N.Th., Vouros, A.P., Demetracopoulos, A.C. 2008. *Effect of bed dunes on spatial development of open-channel flow*. Journal of Hydraulic Research, 46 (6): 802-813.
- Fluent, Inc. (2005). FLUENT 6.2 User's Guide. Fluent Inc., Lebanon, NH.
- Hirt, C.W. and Nichols, B.D. 1981. *Volume of fluid method (VOF) for the dynamics of free boundaries*. Journal of Computational Physics, 39: 201-222.
- Ma, L., Ashworth, P.J., Best, J.L., Elliot, L., Ingham, D.B. and Whitcombe, L.J., 2002. *Computational fluid dynamics and the physical modeling of an upland urban river*. Geomorphology, 44: 375-391.
- Nezu, I. and Nakagawa, H., 1993. *Turbulence in open-channel flows*. IAHR Monograph, Rotterdam, Balkema.
- Ouillon, S., and Dartus, D., 1997. *Three-dimensional computation of flow around groyne*. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 123(11): 962-970.
- Rajaratnam, N., and Nwachukwu, B.A., 1983. *Flow near groin-like structures*. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 109(3): 463-480.
- Richardson, E.V., Stevens, M. A. and Simons, D. B., 1975. *The design of spurs for river training*. XVI IAHR Congress, Sao Paulo, Brazil, pp. 382-388.
- Tingsanchali, T., and Maheswari, S., 1990. *2-d depth averaged flow computation near groyne*. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 116(1): 71-85.
- Versteeg, H.K. and Malalasekera, W., 1995. *An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method*, Edinburg, Longman.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ 3D ΡΟΗΣ ΣΕ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟ ΚΛΕΙΣΤΟ ΑΓΩΓΟ

Νικόλαος Α. Αλεξίου, Ιωάννης Β. Σούλης, Δημήτριος Κ. Φυτανίδης

Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειον Πανεπιστήμιο Θράκης, 67100,
Ξάνθη

Τηλ. +30 25410 79321, e-mail: nalexiou@civil.duth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Πραγματοποιήθηκε πειραματική και αριθμητική διερεύνηση της ροής σε κλειστούς αγωγούς, σε εργαστηριακή κλίμακα με χρήση αυτοματοποιημένων μεθόδων μέτρησης στατικών πιέσεων και με τεχνικές Υπολογιστικής Μηχανικής Ρευστών. Η διάταξη των κλειστών αγωγών περιλαμβάνει: α) έναν αγωγό τύπου Venturi, β) μία στροφή αγωγού κατά 180.0° και γ) ένα διάφραγμα. Οι μετρήσεις έγιναν με χρήση αισθητήρων πίεσης Kistler και ηλεκτρονικής καταγραφής μετρήσεων με το πρόγραμμα LabView. Η προσομοίωση της ροής πραγματοποιήθηκε με χρήση του επιλυτή της ANSYS Fluent 14.0. Η διατμητική ροή περιγράφηκε με χρήση των Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) εξισώσεων με διάφορα μοντέλα τύρβης ενώ η σύγκριση με τις μετρήσεις ήταν ικανοποιητική για τις παραδοχές της ροής.

EXPERIMENTAL AND 3D COMPUTATIONAL FLOW ANALYSIS IN A LABORATORY PIPE

Nikolaos A. Alexiou, Johannes V. Soulis, Dimitrios K. Fytanidis

Civil Engineering Department, Demokriton University of Thrace,
67100, Xanthi, Hellas

Tel.:+302541079321, e-mail: nalexiou@civil.duth.gr

ABSTRACT

In this paper, the experimental and computational flow analysis in a laboratory scale pipe is investigated using automated methods for static pressure measurements and Computational Fluid Dynamics techniques. The experimental rig consists of a laboratory pipeline equipped with, a) Venturi apparatus, b) 180.0° pipe turn and c) pipe-diaphragm. Measurements were conducted using pressure transducers Kistler with the aid of the software measuring system Labview. The numerical simulation was carried out using the ANSYS Fluent 14.0 solver. The shear flow was modeled using the Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) flow equations, coupled with various turbulence models, while the comparison with the measured data was satisfactory within the assumptions made about the flow.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μελέτη των ροών εντός κλειστών αγωγών αποτελούσε ανέκαθεν αντικείμενο μελέτης λόγω του μεγάλου εύρους των εφαρμογών και τεχνικών έργων που βασίζονται σε αυτούς. Ανεξάρτητα του ρευστού του οποίου η ροή εξετάζεται, οι ιδιότητες της ροής όπως ταχύτητα, πίεση κτλ. παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον για τον σχεδιασμό και την μελέτη συστημάτων μεταφοράς ροής εντός κλειστών αγωγών. Στην βιβλιογραφία είναι διαθέσιμο ένα πλήθος εργασιών οι οποίες αφορούν στη ροή ρευστών εντός κλειστών αγωγών τόσο σε πειραματικό όσο και σε αριθμητικό επίπεδο.

Στην πειραματική διερεύνηση της ροής εντός κλειστών αγωγών ενδεικτικά αναφέρονται οι εργασίες των Barre et al. (2009) στην οποία πραγματοποιήθηκε πειραματική και υπολογιστική ανάλυση προκειμένου να διερευνηθεί το φαινόμενο της σπηλαίωσης, των Ghassemī και Fasih (2011) στην οποία μελετήθηκε η ροή ύδατος εντός αγωγού Venturi για διαφορετικές παροχές και συνθήκες πίεσης στα ανάντη του αγωγού, των Ozkan et al. (2006) στην οποία διερευνήθηκε η επιρροή που έχουν διαφορετικές χαρακτηριστικές διαμέτροι ενός αγωγού Venturi στη διαφορά πιέσεων που αναπτύσσεται στα ανάντη και κατόντη αυτού, και πως αυτές οι διαφορές επηρεάζουν το κενό που δημιουργείται εντός του αγωγού εξαιτίας τους και των Xanthopoulos et al. (2011) όπου μελετήθηκαν οι πιέσεις που αναπτύσσονται σε έναν αγωγό Venturi λόγω της ροής αέρα στο εσωτερικό του τόσο πειραματικά όσο και αριθμητικά.

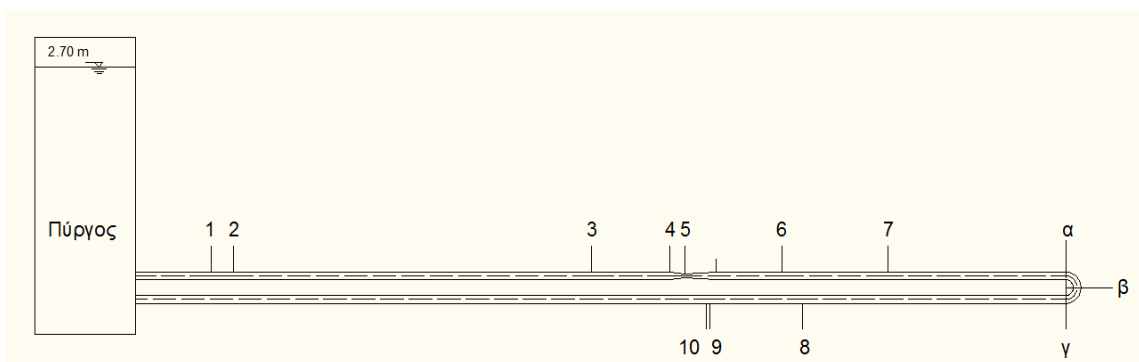
Στην αριθμητική διερεύνηση των ροών έγιναν εργασίες από τους Rudman και Blackburn (1999) με την εφαρμογή της μεθόδου Large Eddy Simulation (LES- Προσομοίωση μεγάλων δίνων) σε κλειστό αγωγό κυλινδρικής διατομής, από τους Baylar et al. (2009) η εργασία των οποίων πραγματεύεται τη δυνατότητα αερισμού με τη χρήση αγωγού Venturi και από τους Ben-Mansour et al. (2012), οι οποίοι μελέτησαν υπολογιστικά την επίδραση μικρών, ελεγχόμενων διαρροών, στις πιέσεις που αναπτύσσονται σε κλειστό αγωγό.

Τέλος, έχουν πραγματοποιηθεί εργασίες που χρησιμοποιούν αναλυτικούς τύπους προκειμένου να περιγράψουν τη ροή. Τέτοιες εργασίες, μεταξύ άλλων, είναι οι εργασίες των Jirkovsky και Muriel (2012) για την περιγραφή των παραβολικών προφίλ των ταχυτήτων σε κλειστούς αγωγούς, και του Brki (2012) όπου με χρήση της εξίσωσης Colebrook (1939) γίνεται εκτίμηση της υδραυλικής αντίστασης για τυρβώδεις ροές σε κλειστούς αγωγούς με λεία ή μη τοιχώματα.

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται πειραματικά και υπολογιστικά η ροή σε κλειστούς αγωγούς, σε εργαστηριακή κλίμακα, με χρήση αυτοματοποιημένων μεθόδων μέτρησης στατικών πιέσεων και με τεχνικές Υπολογιστικής Μηχανικής Ρευστών

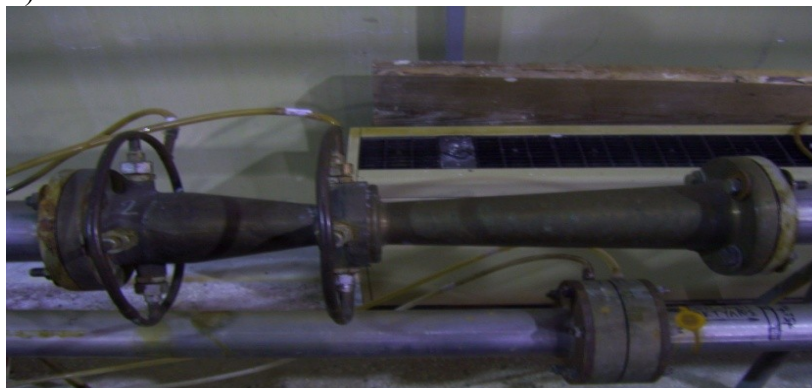
2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ

Η πειραματική διάταξη βρίσκεται στο Εργαστήριο Υδραυλικής του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Δ.Π.Θ και αποτελείται από ένα κλειστό αγωγό με δύο κλάδους οι οποίοι έχουν μήκος περί τα 10.0 m έκαστος. Στον αγωγό παρεμβάλλονται τρεις διατάξεις: ένας σωλήνας Venturi, μία στροφή 180.0° και ένα διάφραγμα. Κατά μήκος του αγωγού βρίσκονται 10 χαρακτηριστικά σημεία στα οποία μετράται η πίεση. Στο Σχήμα 1 φαίνεται το σχέδιο του αγωγού με αποτυπωμένα τα χαρακτηριστικά σημεία, ενώ στον Πίνακα 1 δίνονται οι αποστάσεις μεταξύ των σημείων. Στο Σχήμα 2 δείχνεται η γεωμετρία των επιμέρους τμημάτων του εργαστηριακού κλειστού αγωγού.



Σχήμα 1. Σχεδιάγραμμα εργαστηριακού κλειστού αγωγού. Διακρίνονται α) ο αγωγός Ventouri (θέση 5), β) η στροφή 180°.0 (θέση αβγ) και γ) το διάφραγμα (θέση 9)

α)



β)



γ)



Σχήμα 2. Επιμέρους διατάξεις του κλειστού αγωγού.
α) Ο αγωγός Ventouri, β) η στροφή 180°.0 και γ) το διάφραγμα

Η διάμετρος του αγωγού είναι 8.0 cm σε όλο το μήκος πλην των επιμέρους κατασκευών. Το συγκλίνον τμήμα του αγωγού Venturi έχει μήκος 16.0 cm. Η μεγάλη του διάμετρος ισούται με 8.0 cm, ενώ η μικρή (λαιμός) με 4.0 cm. Το αποκλίνον τμήμα του αγωγού Venturi έχει μήκος 33.0 cm. Το υλικό κατασκευής του αγωγού Venturi είναι ορείχαλκος πάχους 5.0 mm. Η διάμετρος του αγωγού στο τμήμα της στροφής είναι σταθερή και ίση (επίσης) με 8.0 cm. Η ακτίνα της στροφής είναι 8.0 cm (μετρημένη από την αρχή της στροφής έως το εσωτερικό τμήμα του αγωγού). Το διάφραγμα έχει διάμετρο 5.2 cm και πάχος 6.0 mm. Το υλικό κατασκευής του διαφράγματος και της στροφής είναι ανοξείδωτος χάλυβας πάχους 2.0 mm (όπως και ο υπόλοιπος αγωγός).

Πίνακας 1. Αποστάσεις μεταξύ των χαρακτηριστικών σημείων του αγωγού

	Χαρακτηριστικά σημεία, Σχήμα 1									
	Π-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10
Μεταξύ τους απόσταση(m)	0.80	0.24	3.77	0.82	0.16	1.02	1.12	5.18	0.98	0.035

Η γεωμετρία του εργαστηριακού κλειστού αγωγού, εξαιρούμενου του υδατόπυργου, σχεδιάστηκε σε περιβάλλον CAD και στην συνέχεια εισήχθη στο πρόγραμμα πλεγματοποίησης ANSYS Meshing το οποίο εμπεριέχεται στην ANSYS Workbench 14.0. Το τελικό υπολογιστικό δίκτυο αποτελείται από 591560 κόμβους και 1802285 υπολογιστικά κελιά. Τα πλέγματα που δημιουργήθηκαν στις επιμέρους διατάξεις παρουσιάζονται στο Σχήμα 3. Είναι εμφανής η πύκνωση των κελιών στην περιοχή του αγωγού που βρίσκεται πλησίον των τοιχωμάτων ώστε να γίνει δυνατός ο ακριβέστερος υπολογισμός των διαφορών μεγεθών ροής κοντά στο τοίχωμα.

3. ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ

Η ροή ύδατος εντός της πειραματικής διάταξης προσομοιώθηκε με χρήση τεχνικών Υπολογιστικής Μηχανικής Ρευστών. Χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των πεπερασμένων όγκων καθώς και οι αλγόριθμοι επίλυσης που εμπεριέχονται στον επιλυτή ANSYS Fluent 14.0. Έτσι, για την μοντελοποίηση της ροής χρησιμοποιήθηκαν οι Reynolds-Averaged Navier-Stokes εξισώσεις οι οποίες στην γενικότητα τους εκφράζονται ως:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (3.1)$$

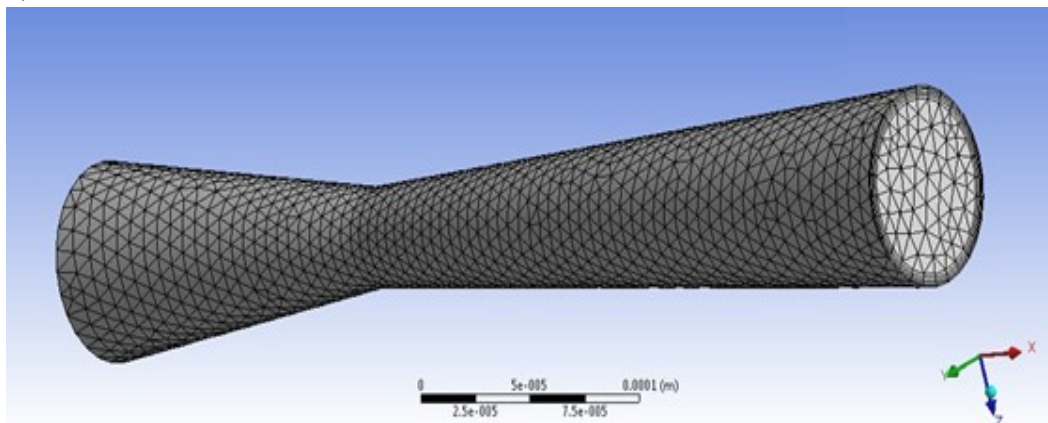
$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\overline{\rho u_i u_j}) + \rho g_i \quad (3.2)$$

όπου ρ είναι η πυκνότητα, u_i είναι η μέση ταχύτητα, p είναι η μέση στατική πίεση, μ το ιξώδες του ρευστού, δ_{ij} είναι το δ του Kronecker, g_i είναι η προβολή του διανύσματος της επιτάχυνση της βαρύτητας στον άξονα i και $-\overline{\rho u_i u_j}$ είναι οι τάσεις Reynolds. Οι τάσεις Reynolds πρέπει να υπολογιστούν με κάποιο μοντέλο τύρβης, προκειμένου να πραγματοποιηθεί το κλείσιμο της Εξίσωσης 3.2, δηλαδή να προκύψει ο ίδιος αριθμός εξισώσεων και αγνώστων.

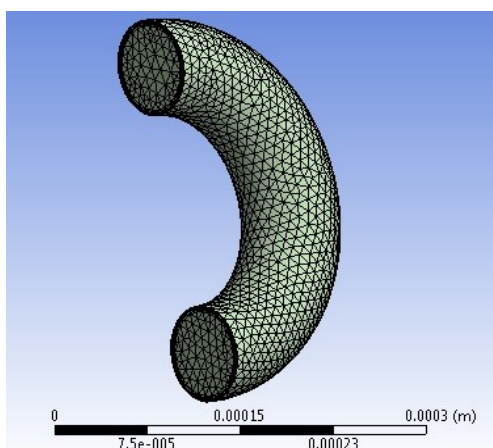
Για την προσομοίωση της τύρβης χρησιμοποιήθηκαν διάφορα μοντέλα τύρβης. Συνολικά, χρησιμοποιήθηκαν: α) το μοντέλο Standard k- ϵ , β) το μοντέλο Standard k- ω , γ) το μοντέλο Transition k-kl- ω , δ) το μοντέλο Transition SST, ε) το μοντέλο Reynolds Stress, στ) το μοντέλο Realizable k- ϵ , ζ) το μοντέλο SST k- ω και η) το μοντέλο Spalart-Allmaras. Οι εξισώσεις και το θεωρητικό υπόβαθρο των εν λόγω μοντέλων δεν περιγράφονται στην παρούσα εργασία για λόγους οικονομίας χώρου, αναλύονται όμως διεξοδικά στο Theory Guide του επιλυτή ANSYS Fluent. Για την ζεύξη πίεσης και ταχύτητας χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος SIMPLE (Patankar 1980) ενώ για την χωρική διαφοροποίηση των υπολογισμών χρησιμοποιήθηκε το «πρώτης τάξης προς τα

πίσω σχήμα» (first order upwind scheme) για όλες τις εξισώσεις που επιλέχθηκαν. Για τον υπολογισμό των κλίσεων χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος «Green-Gauss Cell Based», ANSYS Fluent. Οι παραπάνω εξισώσεις επιλύθηκαν με την παραδοχή ότι η ροή είναι τρισδιάστατη, ασυμπίεστη, τυρβώδης και ισόθερμη, ενώ η πυκνότητα του ύδατος τέθηκε ίση με 998.2 kg/m^3 . Το δυναμικό ιξώδες του ύδατος θεωρήθηκε ίσο με 0.001003 kg/m-s .

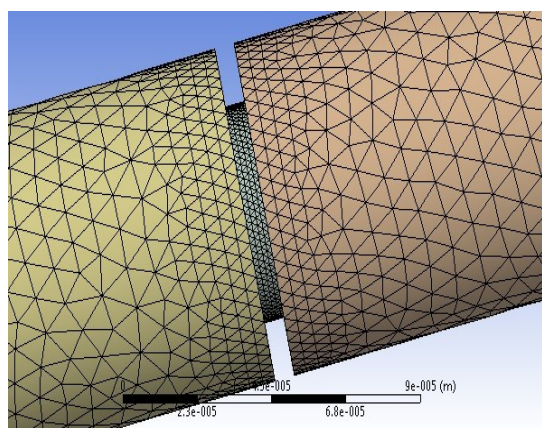
α)



β)



γ)



Σχήμα 3 Υπολογιστικά δίκτυα επιμέρους διατάξεων του κλειστού αγωγού.
α) Αγωγός Ventouri, β) στροφή 180° και γ) διάφραγμα

4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Για την πειραματική ανάλυση της διάταξης χρησιμοποιήθηκε ο αυτοματοποιημένος αλγόριθμος καταγραφής και επεξεργασίας του προγράμματος LabView της National Instruments. Χρησιμοποιήθηκαν αισθητήρες πίεσης (pressure transducers) της εταιρίας Kistler προκειμένου να μετρηθεί η στατική πίεση του ύδατος σε διάφορα σημεία ενδιαφέροντος, σημεία 1 έως 10 στο Σχήμα 1. Οι αισθητήρες μετρούν την τάση η οποία μετατρέπεται σε ύψος ύδατος εντός του εικονικού οργάνου Virtual Instrument VI του LabView. Αξίζει να σημειωθεί ότι έγινε σύγκριση των ενδείξεων των αισθητήρων με μετρήσεις που ελήφθησαν από μανόμετρα στήλης ύδατος. Η σύγκριση αυτή ήταν επιτυχής αφού η μέγιστη διαφορά που παρατηρήθηκε

ήταν της τάξης του 2.83% για τη μέγιστη παροχή καθιστώντας τη μέθοδο μέτρησης πίεσης με αισθητήρες στην εν λόγω πειραματική διάταξη ασφαλή.

Η καταγραφή των δεδομένων και η μετατροπή του αναλογικού σήματος των αισθητήρων πίεσης σε ψηφιακό, έγινε με τη χρήση της κάρτας NI USB-6210, η οποία έχει τη δυνατότητα εισαγωγής τόσο αναλογικού όσο και ψηφιακού σήματος και εξαγωγής ψηφιακού σήματος προς τον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Αυτό γίνεται εισάγοντας για τον κάθε ένα αισθητήρα την εξίσωση της καμπύλης βαθμονόμησης, η οποία προέκυψε μετά από χρήση του προγράμματος NI Signal Express. Τέλος, πρέπει να σημειωθεί, ότι επειδή το πρόβλημα που εξετάζεται αφορά σταθερή ροή οι συνολικές μετρήσεις εξήχθησαν μετά από τον υπολογισμό των μέσων τιμών για διάστημα 5.0 min με ρυθμό λήψεως δεδομένων 1200.0 Hz.

5. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

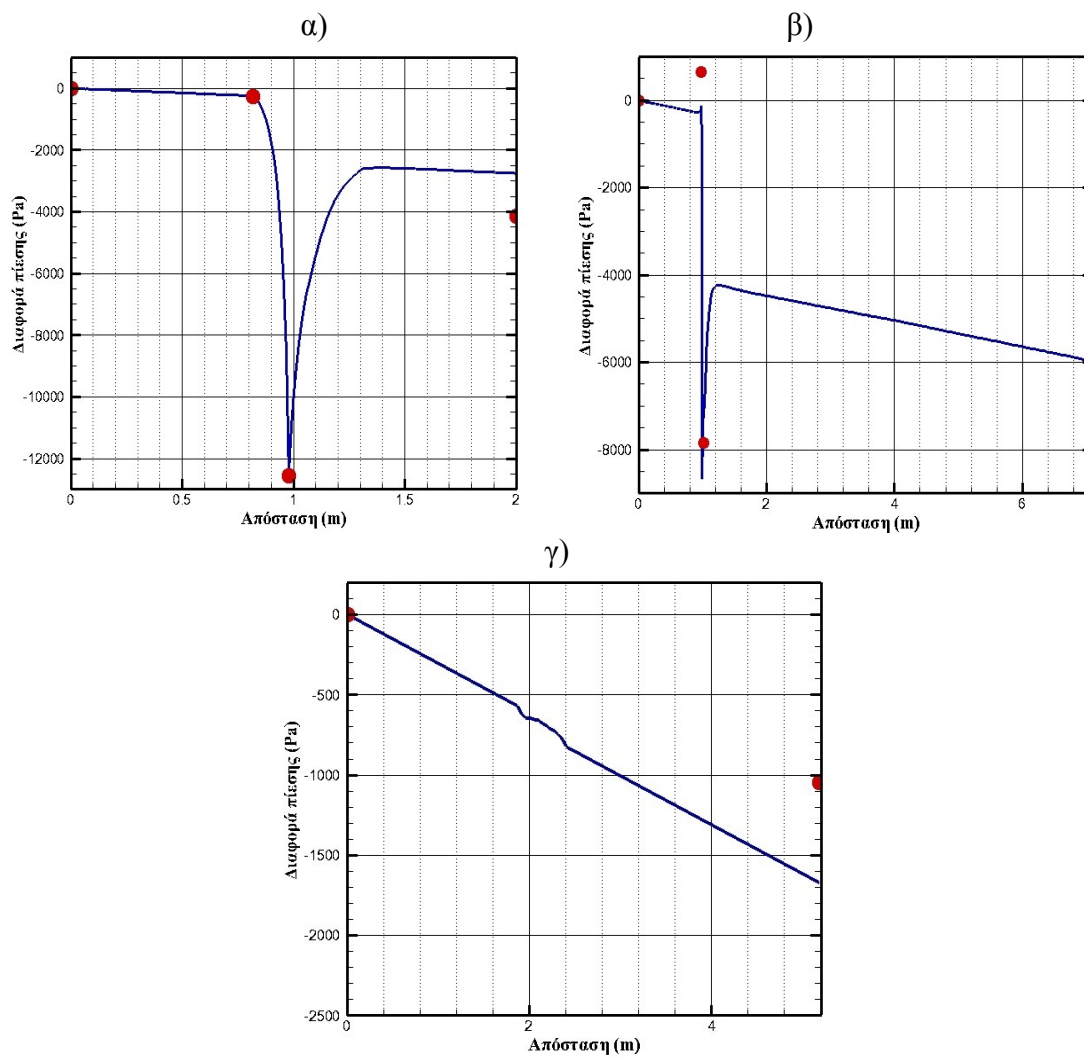
Μελετήθηκαν πειραματικά και υπολογιστικά, δέκα παροχές εισόδου, α) 5.91 l/s, β) 5.78 l/s, γ) 5.56 l/s, δ) 5.03 l/s, ε) 4.12 l/s, στ) 3.92 l/s, ζ) 3.47 l/s, η) 3.34 l/s, θ) 3.14 l/s και ι) 2.17 l/s. Συνολικά αναλύθηκαν 80 περιπτώσεις (10 παροχές x 8 μοντέλα τύρβης). Τα αποτελέσματα που ελήφθησαν αφορούν τις τιμές των πιέσεων στα χαρακτηριστικά σημεία του αγωγού, τις γραμμές ίσων πιέσεων και ταχυτήτων σε όλο το μήκος του αγωγού. Εκ των ανωτέρω επιλέχθηκαν να παρουσιαστούν αυτά που αντιστοιχούν στο μοντέλο Transition k-kl-ω, που εμφανίζει και τη μεγαλύτερη σύμπτωση με τις μετρήσεις.

Στο Σχήμα 4 φαίνονται οι μετρήσεις με κόκκινα σημεία και οι υπολογισμοί με συνεχή κυανή γραμμή της πτώσης πίεσης κατά μήκος του αγωγού Venturi, του διαφράγματος και της στροφής των 180.0° για την μέγιστη παροχή 5.91 l/s. Τόσο η τάση όσο και η σύμπτωση των πειραματικών με τα υπολογιστικά αποτελέσματα θα μπορούσε να περιγραφεί ως ικανοποιητική.

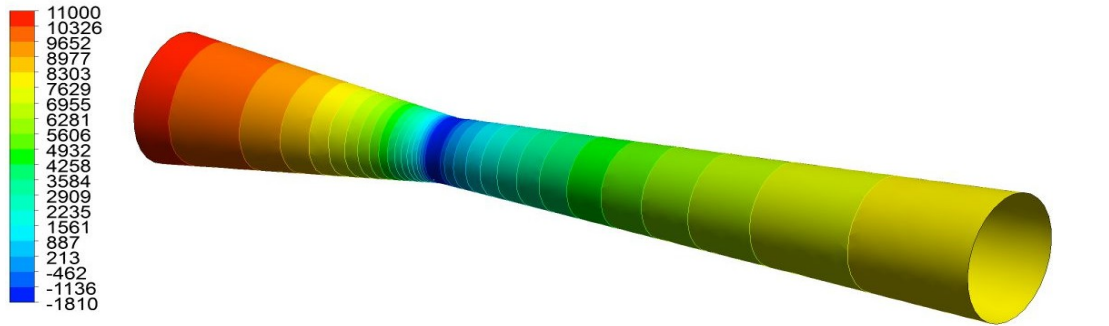
Στο Σχήμα 5 δείχνονται οι ισοϋψείς των στατικών πιέσεων για τις τρεις χαρακτηριστικές περιοχές της διάταξης.

Στο Σχήμα 6, φαίνονται τα αποτελέσματα της ταχύτητας ροής σε μορφή ροϊκών γραμμών. Ενδεικτικό των αποτελεσμάτων είναι η μεταβολή του πεδίου των ταχυτήτων εξ αιτίας της διαφοροποίησης (απότομη στένωση-διεύρυνση, στροφή) της γεωμετρίας. Χαρακτηριστικό δε είναι το γεγονός ότι στα κατάντη του διαφράγματος παρατηρείται αναστροφή ροής.

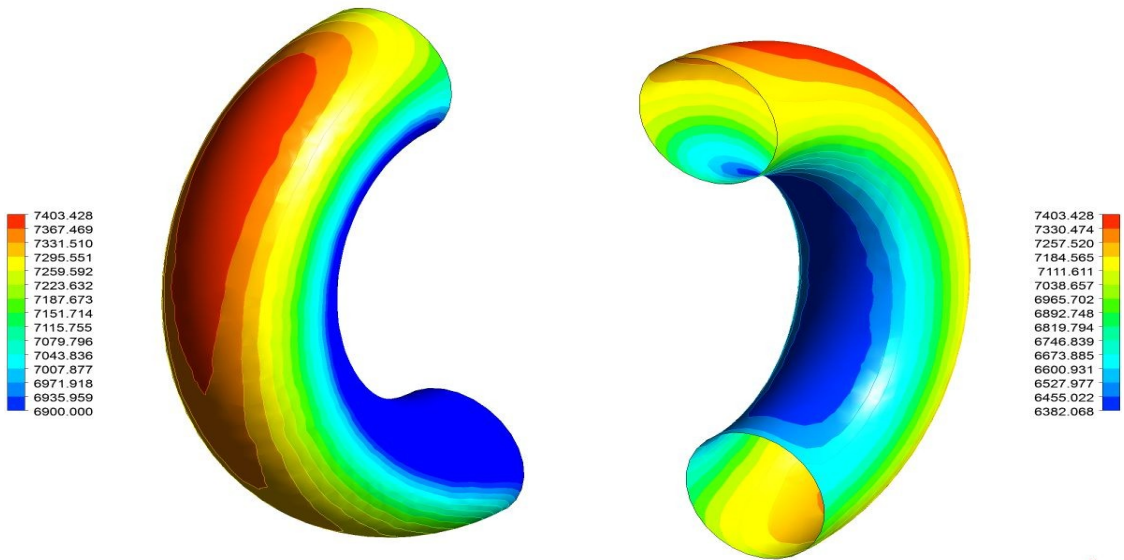
Στο Σχήμα 7 φαίνεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων των διαφόρων υπολογιστικών μοντέλων τύρβης με τα εξαγόμενα των πειραματικών μετρήσεων πτώσης πίεσης στα 10 χαρακτηριστικά σημεία της πειραματικής διάταξης (Ενότητα 2). Μετά από σύγκριση των διαφόρων μοντέλων προέκυψε το συμπέρασμα ότι το μοντέλο τύρβης Transition k-kl-ω, ερυθρή γραμμή στο Σχήμα 7, προσομοιώνει καλύτερα την πτώση πίεσης του ύδατος στην υπό εξέταση διάταξη. Στο Σχήμα 8 δείχνονται τα προφίλ της ταχύτητας και της τυρβώδους κινητικής ενέργειας στη στένωση του αγωγού Venturi, στο μέσο της στροφής των 180.0° και στη στένωση του διαφράγματος, για τις εξεταζόμενες παροχές. Τα εν λόγω αποτελέσματα, αναφέρονται στις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν με χρήση του μοντέλου τύρβης Transition k-kl-ω. Είναι προφανές ότι τόσο τα προφίλ της ταχύτητας όσο και της κινητικής ενέργειας επηρεάζονται από την παροχή εισόδου ύδατος, ακολουθώντας όμως πάντα ένα σταθερό μοτίβο (για δεδομένο μοντέλο τύρβης).



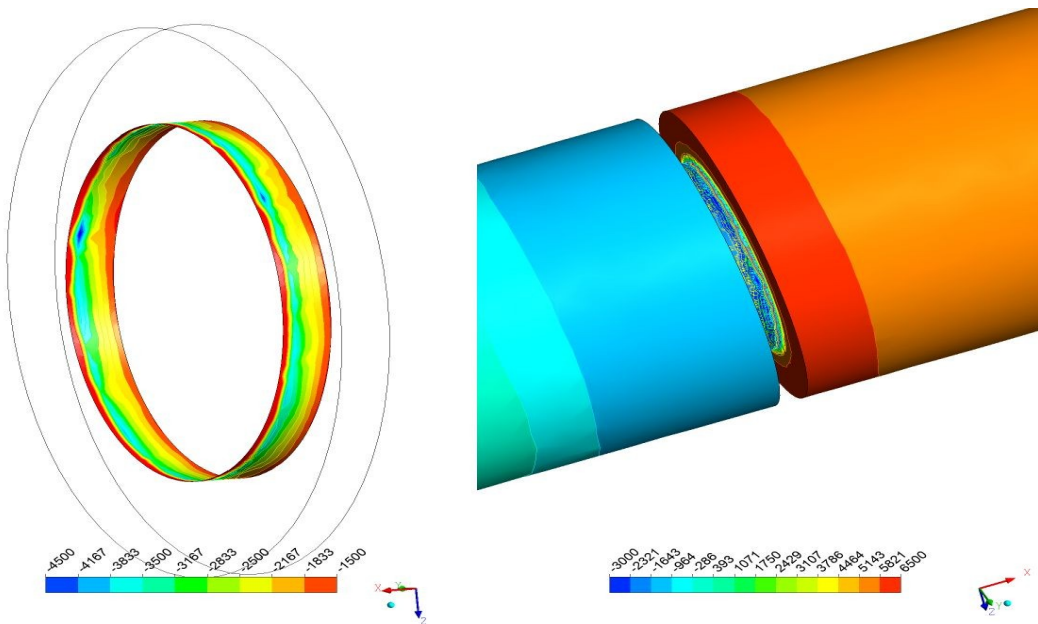
Σχήμα 4. Πτώση πίεσης (Pa), α) στον αγωγό Venturi μεταξύ των σημείων 3-6, β) στο διάφραγμα μεταξύ των σημείων 8-10 και γ) στη στροφή των 180.0° μεταξύ των σημείων 7-8 για παροχή 5.91 l/s (βλέπε Ενότητα 2 για τα σημεία). Η συνεχής γραμμή συμβολίζει υπολογιστικά αποτελέσματα, ενώ τα κόκκινα σημεία τις μετρήσεις



α)

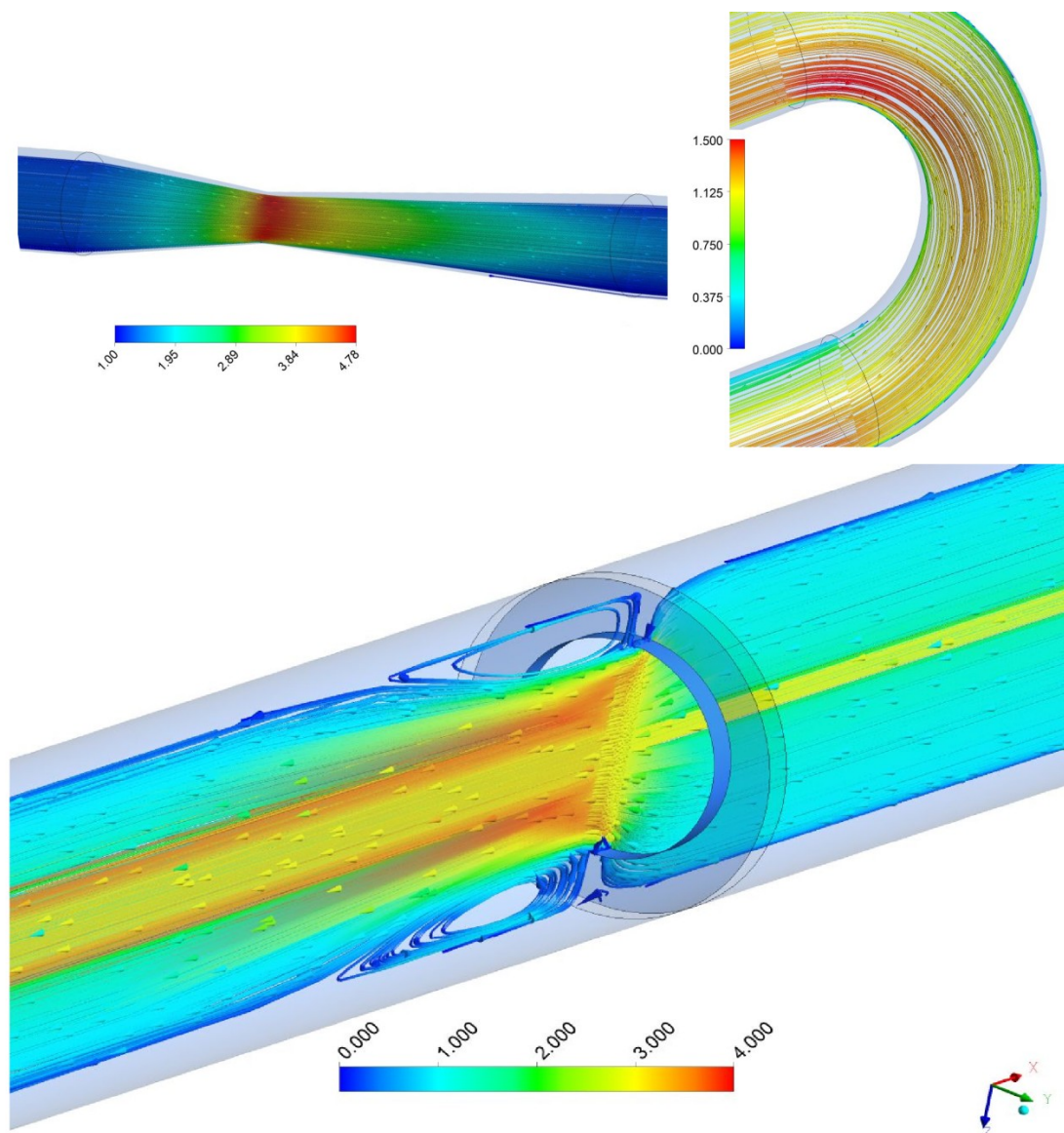


β)

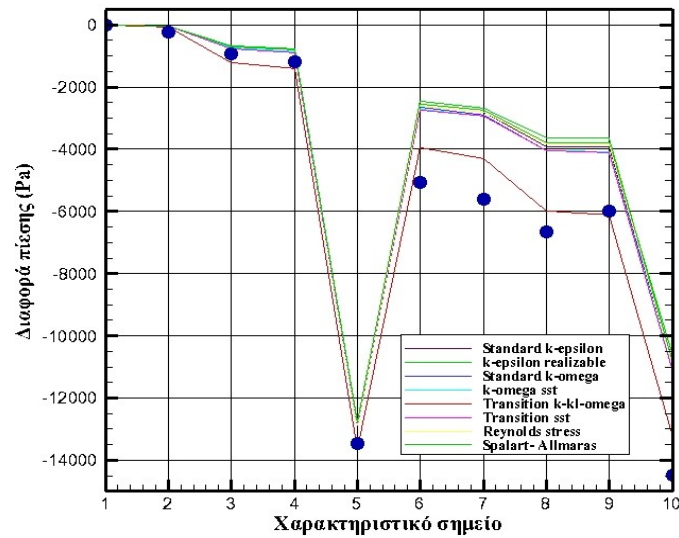


γ)

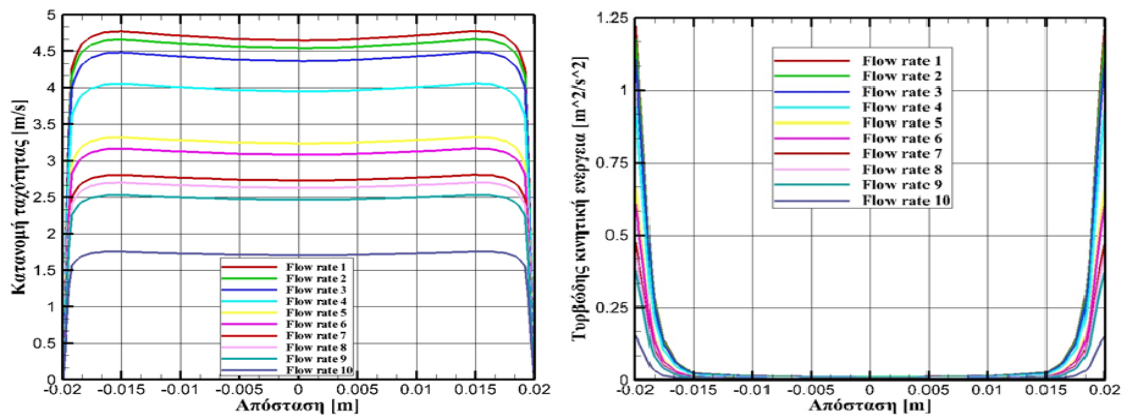
Σχήμα 5. Γραμμές ίσων πιέσεων (Pa) στα τοιχώματα της περιοχής, α) του αγωγού Venturi, β) της στροφής 180.0°, γ) του διαφράγματος για παροχή 5.911/s



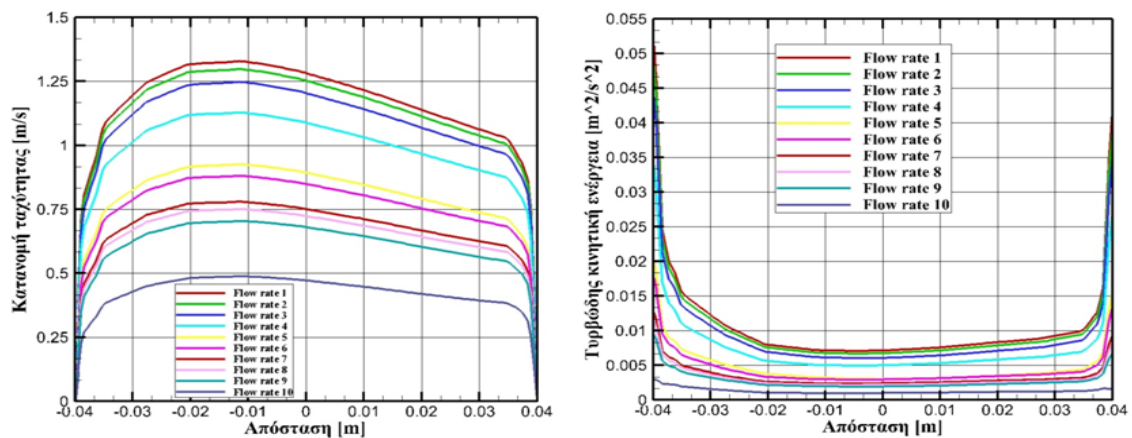
Σχήμα 6. Ταχύτητα ροής (m/s) εντός, α) του αγωγού Venturi, β) της στροφής 180.0° και γ) του διαφράγματος για παροχή 5.91 l/s



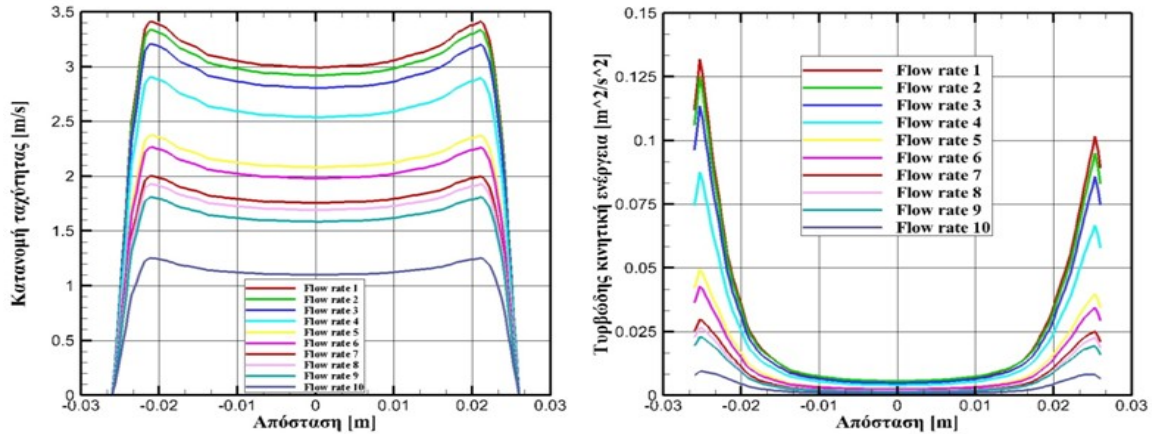
Σχήμα 7. Σύγκριση διαφοράς πίεσης (Pa) υπολογιστικών αποτελεσμάτων διαφόρων μοντέλων τύρβης και πειραματικών. Με συνεχείς καμπύλες δείχνονται τα υπολογιστικά αποτελέσματα και με κυανά σημεία τα πειραματικά



α) στένωση του αγωγού Venturi



β) μέσο στροφής 180.0°



γ) στένωση διαφράγματος

Σχήμα 8. Κατανομή ταχύτητας (m/s) και τυρβώδους κινητικής ενέργειας (m^2/s^2), α) στη στένωση του αγωγού Venturi, β) στο μέσο της στροφής των 180.0° και γ) στη στένωση του διαφράγματος για τις παροχές, α) 5.91 l/s (Flow rate 1), β) 5.78 l/s (Flow rate 2), γ) 5.56 l/s (Flow rate 3), δ) 5.03 l/s (Flow rate 4), ε) 4.12 l/s (Flow rate 5), στ) 3.92 l/s (Flow rate 6), ζ) 3.47 l/s (Flow rate 7), η) 3.34 l/s (Flow rate 8), θ) 3.14 l/s (Flow rate 9) ι) 2.17 l/s (Flow rate 10)

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία έγινε πειραματική και αριθμητική διερεύνηση των στατικών πιέσεων σε εργαστηριακό κλειστό αγωγό που περιλαμβάνει ένα συγκλίνοντα-αποκλίνοντα αγωγό τύπου Venturi, μία στροφή των 180.0° και ένα διάφραγμα. Τα κυριότερα συμπεράσματα που εξήχθησαν είναι τα κάτωθι:

1. Τα αποτελέσματα όλων των μοντέλων τύρβης που χρησιμοποιήθηκαν εμφάνισαν μικρές αποκλίσεις μεταξύ τους.
2. Η σύγκριση μεταξύ των πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων παρουσίασε ορισμένες αξιοσημείωτες διαφορές στον αγωγό Venturi (σημεία 5-6), στο διάφραγμα (σημεία 9-10) και στην περιοχή της στροφής των 180° (σημεία 7-8). Οι διαφορές αυτές είναι πιθανόν να οφείλονται σε σφάλματα των μετρήσεων, αλλά και σε απώλειες του όλου συστήματος του αγωγού. Στην περιοχή του διαφράγματος, τυχούσες διαφορές είναι δυνατόν να οφείλονται σε αποκόλληση της ροής που συμβαίνει αμέσως μετά από αυτό.
3. Οι μεγαλύτερες διαφοροποιήσεις μεταξύ πειραματικών μετρήσεων και αριθμητικών αποτελεσμάτων στην περιοχή του αγωγού Venturi εμφανίζονται στις πολύ υψηλές παροχές (για τα δεδομένα του εργαστηριακού αγωγού). Στην περιοχή του διαφράγματος αντίθετα, οι μέγιστες διαφορές παρουσιάζονται για τις δύο μικρότερες παροχές.
4. Σε γενικές γραμμές, το όλο σύστημα του εργαστηριακού αγωγού προσομοιώθηκε ικανοποιητικά από το αριθμητικό μοντέλο που αναπτύχθηκε στο ANSYS Workbench.
5. Το μοντέλο τύρβης με τη χρήση του οποίου προσομοιώθηκε με το βέλτιστο τρόπο η πειραματική διαδικασία είναι το μοντέλο k-kl- ω για μεταβατική ροή (Transition k-kl- ω model).

6. Η μέγιστη κατανομή της ταχύτητας στη στροφή, που εμφανίζεται στο κοίλο μέρος αυτής, είναι μετατοπισμένη προς τα ανάντη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ANSYS Inc., 2012. *ANSYS Fluent theory guide. Release 13.0.*
- Barre, S., Rolland, J., Boitel, G., Goncalves, E. and Fortes Patella, R., 2009. *Experiments and modeling of cavitating flows in venturi: attached sheet cavitation.* European Journal of Mechanics B/Fluids, 28: 444- 464.
- Baylar, A., Cihan Aydin, M., Unsal, M. and Ozkan, F., 2009. *Numerical modeling of venturi flows for determining air injection rates using fluent v6.2.* Mathematical and Computational Applications, 14: 97- 108.
- Ben-Mansour, R., Habib, M.A., Khalifa A., Youcef-Toumi K. and Chatzigeorgiou D., 2012. *Computational fluid dynamic simulation of small leaks in water pipelines for direct leak pressure transduction.* Computers and Fluids, 57: 110-123.
- Brki, D., 2012. *Can pipes be actually really that smooth?* International Journal of Refrigeration, 35(1): 209-215.
- Colebrook, C.F., 1939. *Turbulent flow in pipes, with particular reference to the transition region between smooth and rough pipe laws.* Journal of the Institution of Civil Engineers., 11(4): 133 –156.
- Ghassemi, H. and Farshi Fasih, H. 2011. *Application of small size cavitating venturi as flow controller and flow meter.* Flow Measurement and Instrumentation, 22: 406- 412.
- Jirkovsky, L. and Muriel, A., 2012, *Pipe flow and wall turbulence using a modified Navier- Stokes equation.* Commun. Theor. Phys., 57(3): 477- 481.
- National Instruments, 2012. *DAQ M Series NI USB - 621x User Manual.*
- Ozkan, F., Ozturk, M. and Baylar, A. 2006. *Experimental investigations of air and liquid injection by venturi tubes.* Water and Environment Journal, 20: 114- 122.
- Patankar, S.V., 1980. *Numerical heat transfer and fluid flow.* Hemisphere Publishing Corp., Washington, DC, 210 p.p.
- Rudman, M. and Blackburn, H.M., 1999. *Large eddy simulation of turbulent pipe flow.* Second International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries, Melbourne, Australia 503- 508,
- Xanthopoulos, E.I., Tzempelikos, D.A., Filios, A.E. and Margaritis, D.P., 2011. *Use of virtual instrumentation and computational fluid dynamics in an undergraduate research project.* 7th GRACM International Congress on Computational Mechanics, Athens, Greece.

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΥΡΒΩΔΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΡΟΗΣ ΥΠΕΡΑΝΩ ΠΥΘΜΕΝΑ ΜΕ Ή ΧΩΡΙΣ ΦΥΤΟΚΑΛΥΨΗ

Γ.Η. Πεχλιβανίδης¹, Ε. Κεραμάρης¹, Η.Γ. Πεχλιβανίδης²

¹Αλεξάνδρειο Τεχνολογικό Ίδρυμα Θεσσαλονίκης, Τμήμα Πολιτικών Έργων Υποδομής, Θεσσαλονίκη, 57400, Σίνδος

²Ινστιτούτο Ερευνών Περιβάλλοντος και Βιώσιμης Ανάπτυξης, Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, Αθήνα, Ελλάδα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή προσδιορίζονται τα χαρακτηριστικά της τυρβώδους ροής σε ένα ανοικτό κανάλι με διαπερατό πυθμένα (εύκαμπτη βλάστηση) και αδιαπέρατο πυθμένα. Με τη βοήθεια συσκευής Particle Image Velocimetry (P.I.V) μελετάται πειραματικά το διδιάστατο πεδίο στον άξονα της ροής. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε ανοικτό κανάλι μήκους 6.5m, πλάτους 7.5cm και ύψους 25cm. Για την προσομοίωση του πορώδους του πυθμένα χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι βλάστησης με διαφορετικό ύψος (2cm και 6cm). Ερευνήθηκαν η επίδραση των υδραυλικών τυρβωδών χαρακτηριστικών (τυρβώδεις εντάσεις, τυρβώδης κινητική ενέργεια και τάσεις Reynolds) και οι θέσεις εμφάνισης των δινών. Τα αποτελέσματα έδειξαν σημαντική επίδραση του διαπερατού πυθμένα στα τυρβώδη χαρακτηριστικά της ροής σε σχέση με τον αδιαπέρατο πυθμένα.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ : Particle Image Velocimetry (P.I.V), Τυρβώδεις Εντάσεις, Τάσεις Reynolds, Εύκαμπτη Βλάστηση, Ανοικτοί Αγωγοί

INFLUENCE OF TURBULENT CHARACTERISTICS OF FLOW OVER BED WITH OR WITHOUT VEGETATION

G.I Pechlivanidis¹, E. Keramaris¹, I.G. Pechlivanidis²

¹Alexander Technological Educational Institute of Thessaloniki, Department of Civil Infrastructure Engineering, School of Technological Applications, 57400 Sindos, Thessaloniki, Greece

²Institute of Environmental Research and Sustainable Development, National Observatory of Athens, Athens, Greece

ABSTRACT

In this study, we experimentally investigated the characteristics of turbulent flow in an open channel with permeable (vegetation) and impermeable bed. We used a Particle Image Velocimetry (P.I.V) to describe the two dimensional field of the flow in an open channel of 6.5m length, 7.5cm width and 25cm depth. Two vegetation types with different height (2cm and 6cm) were used to represent the porous bed. The hydraulic turbulent characteristics (turbulent intensities, the turbulent kinetic energy and Reynolds stresses) and the location of vortices were investigated. Results show that the bed type can significantly influence the turbulent characteristics of the flow.

KEYWORDS : Particle Image Velocimetry, Turbulent Intensity, Reynolds Stress, Vegetation, Open Channel

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μελέτη των τυρβωδών χαρακτηριστικών της ροής σε ανοικτούς αγωγούς είναι ένα θέμα σημαντικού ενδιαφέροντος. Ειδικότερα η επίδραση της τραχύτητας διαπερατού και αδιαπερατού πυθμένα είναι δύσκολο να εξηγηθεί με θεωρητική μόνο ανάλυση. Είναι αναγκαίες λοιπόν οι πειραματικές έρευνες για την καλύτερη κατανόηση της τύρβης.

Εργαστηριακά πειράματα αλλά και μετρήσεις πεδίου δείχνουν ότι η δομή της ροής κάτω από συνθήκες τραχύ πυθμένα είναι πολυπλοκότερη σε σύγκριση με λείο πυθμένα (Kirkgoz (1989), Ferro and Biamonte (1994), Hoover and Ackerman (2004)). Πολλές μελέτες έχουν ερευνήσει τα τυρβώδη χαρακτηριστικά σε τραχύ πυθμένα (Nakagawa et al. (1975), Roy et al. (2004)).

Οι Wilson et al. (2003) ερεύνησαν πειραματικά της επίδραση εύκαμπτης βλάστησης σε ένα ανοικτό κανάλι. Δύο διαφορετικά είδη βλάστησης χρησιμοποιήθηκαν : α) εύκαμπτοι ράβδοι σταθερού ύψους και β) οι ίδιοι ράβδοι με προσαρτημένο φύλλωμα. Ένα Acoustic Doppler Velocimeter χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση της ταχύτητας και των τυρβωδών χαρακτηριστικών της ροής. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι στην περίπτωση των ράβδων με το φύλλωμα οι μέσες ταχύτητες μειώνονταν σημαντικά συγκρινόμενες με τη περίπτωση ράβδων χωρίς φύλλωμα. Αυτό δείχνει ότι σε περιοχές με προδιάθεση για διάβρωση τα φυτά με φύλλωμα προστατεύουν καλύτερα την περιοχή σε σχέση με ισοδύναμα χωρίς φύλλωμα. Ο Jarvela (2005) ερεύνησε τη δομή της ροής πάνω από εύκαμπτη βλάστηση (σιτάρι). Ταχύτητες και τυρβώδη χαρακτηριστικά μετρήθηκαν με ένα 3-D Acoustic Doppler Velocimeter. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η ροή πάνω από το σιτάρι ακολουθεί το λογαριθμικό νόμο. Οι μέγιστες τιμές των τυρβωδών εντάσεων και διατμητικών τάσεων βρέθηκαν περίπου στο επίπεδο της μέγιστης παρατηρούμενης παρέκκλισης των φυτών.

Οι Bigillon et al. (2006) ερεύνησαν πειραματικά τα τυρβώδη χαρακτηριστικά σε ροή σε ανοικτό κανάλι με τραχύ πυθμένα. Οι κατακόρυφες κατανομές ταχυτήτων, οι τυρβώδεις εντάσεις και η τυρβώδης κινητική ενέργεια ερευνήθηκαν με τη χρήση ενός Particle Image Velocimetry (P.I.V). Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με αυτά πάνω από λείο πυθμένα. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η τεχνική του P.I.V μπορεί να εφαρμοστεί ανεπιφύλακτα και με μεγάλη επιτυχία. Οι Agelin-Chaab and Tachie (2006) πραγματοποίησαν πειράματα σε ανοικτό κανάλι για την μελέτη της ροής πάνω από ημισφαιρικές ράβδους που τοποθετήθηκαν κάθετα και εγκάρσια στη ροή. Μια σειρά από ράβδους τοποθετήθηκαν η μία δίπλα στην άλλη καλύπτοντας όλο το μήκος του καναλιού. Οι μετρήσεις των ταχυτήτων μέσα και πάνω από τις ράβδους έγιναν με τη χρήση του P.I.V. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι κάθετες ημισφαιρικές ράβδοι έχουν μικρότερη αντίσταση στη ροή σε σχέση με τις εγκάρσιες ημισφαιρικές ράβδους.

Σε παρόμοια μελέτη οι Κεραμάρης και Πρίνος (2009) μελέτησαν πειραματικά τα χαρακτηριστικά τυρβώδους ροής σε ανοικτό κανάλι με πορώδη πυθμένα. Οι μετρήσεις της ταχύτητας πραγματοποιήθηκαν με τη χρησιμοποίηση ανεμομετρίας θερμού φιλμ (hot-film anemometry). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι ταχύτητες πάνω από τον πορώδη πυθμένα είναι πολύ μικρότερες σε σχέση με τις αντίστοιχες σε ροή πάνω από αδιαπερατο πυθμένα. Αυτό οφείλεται στις τυρβώδεις διατμητικές τάσεις και στη διεύδυση της τύρβης από την περιοχή του ρευστού στην πορώδη περιοχή η οποία μειώνει τις μέσες ταχύτητες πάνω από τη πορώδη περιοχή.

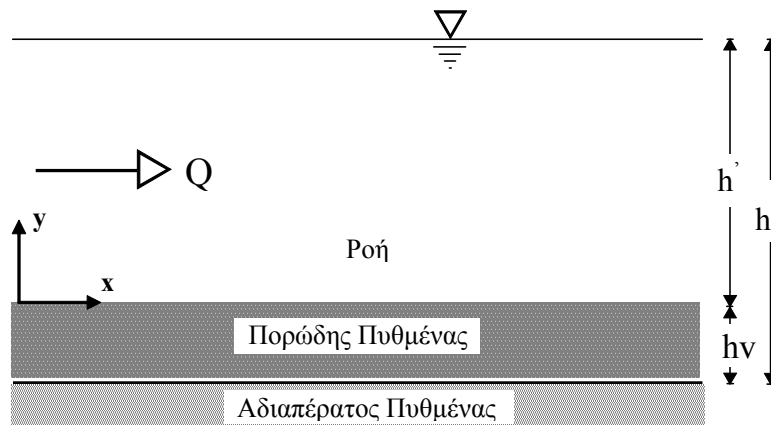
Πρόσφατα οι Wang et al. (2011) ερεύνησαν πειραματικά την επίδραση της τραχύτητας στη δομή της ροής σε πορώδη πυθμένα (ακατέργαστο χαλίκι) με την χρήση του Particle Image Velocimetry (P.I.V). Τα τρία βασικά στοιχεία που ήθελαν να μελετήσουν ήταν : α) η διερεύνηση της κατανομής των μέσων ταχυτήτων της ροής β) ο

υπολογισμός της αντίστασης της ροής και γ) η περιγραφή του ορίου επίδρασης της τραχύτητας. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι η αντίσταση της ροής μπορεί να δηλωθεί είτε με τον αριθμό Froude είτε με τον αριθμό Reynolds.

Στην παρούσα εργασία προσδιορίστηκαν τα χαρακτηριστικά της τυρβώδους ροής σε ένα ανοικτό κανάλι με διαπερατό πυθμένα (εύκαμπτη βλάστηση) και αδιαπέρατο πυθμένα. Με τη βοήθεια του P.I.V μελετήθηκε πειραματικά το δισδιάστατο πεδίο στον άξονα της ροής, ερευνήθηκε η επίδραση των υδραυλικών τυρβωδών χαρακτηριστικών (τυρβώδεις εντάσεις και τάσεις Reynolds) και προσδιορίστηκαν η τυρβώδης κινητική ενέργεια και οι θέσεις εμφάνισης των δινών. Τα αποτελέσματα έδειξαν σημαντική επίδραση του διαπερατού πυθμένα στα τυρβώδη χαρακτηριστικά της ροής σε σχέση με τον αδιαπέρατο πυθμένα.

2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ-ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Υδραυλικών Έργων και Τεχνικής Περιβάλλοντος του τμήματος Πολιτικών Έργων Υποδομής του Αλεξάνδρειου Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Θεσσαλονίκης. Το ανοικτό κανάλι είχε μήκος 6.5m, πλάτος 7.5cm και ύψος 25cm. Χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικοί τύποι βλάστησης με διαφορετικό ύψος (2cm και 6cm) για την προσομοίωση του διαπερατού πυθμένα. Η μορφολογία της εύκαμπτης βλάστησης φαίνεται στην φωτογραφία 1. Τα υδραυλικά τυρβώδη χαρακτηριστικά μετρήθηκαν σε 4 διαφορετικά βάθη ροής πάνω από τον αδιαπέρατο πυθμένα ($h=7, 9, 11$ και 13cm , με $h=h'+h_v$, h : ολικό βάθος ροής, h' : βάθος ροής πάνω από τη βλάστηση και h_v : ύψος βλάστησης) και πάνω από τη βλάστηση ($h'=5, 7, 9, 11\text{ cm}$ για τη βλάστηση με ύψος 2cm και 1, 3, 5 και 7cm για τη βλάστηση με ύψος 6 cm, έτσι ώστε το ολικό βάθος ροής να είναι ίδιο σε όλες τις περιπτώσεις και ίσο με $h=7, 9, 11$ και 13cm) και για τρεις διαφορετικές παροχές (0.735, 0.845 και 0.970lt/s). Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της βλάστησης φαίνονται στο σχήμα 1 και τα χαρακτηριστικά των πειραμάτων απεικονίζονται στον πίνακα 1.



Σχήμα 1. Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά της Ροής

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά των Πειραμάτων
Αδιαπέρατος Πυθμένας

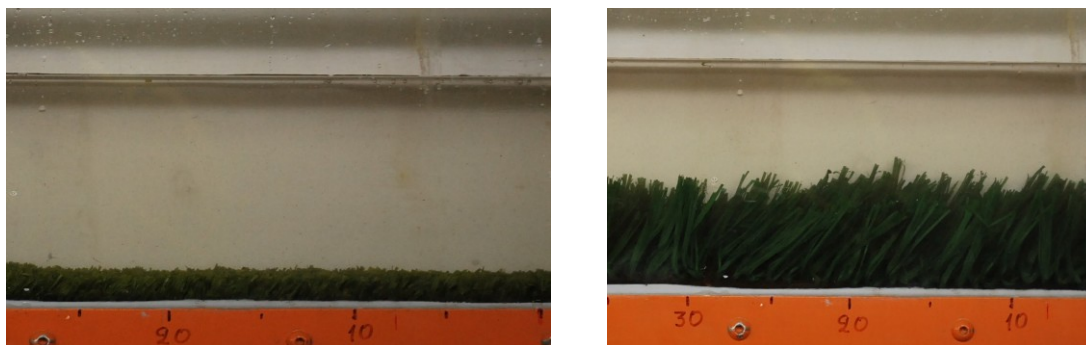
Παροχή Q (lt/s)	Ολικό Βάθος Ροής h (cm)	U_{mean} (m/s)	Αριθμός Reynolds $Re = \frac{Uh}{\nu}$
0.735	7	0.188	13160
0.735	9	0.136	12240
0.735	11	0.103	11330
0.735	13	0.085	11050
0.845	7	0.197	13790
0.845	9	0.153	13770
0.845	11	0.119	13090
0.845	13	0.098	12740
0.970	7	0.251	17570
0.970	9	0.193	17370
0.970	11	0.138	15180
0.970	13	0.115	14950

Βλάστηση $h_v=2\text{cm}$

Παροχή Q (lt/s)	Ολικό Βάθος Ροής h (cm)	U_{mean} (m/s)	Αριθμός Reynolds $Re = \frac{Uh}{\nu}$
0.735	7	0.149	10430
0.735	9	0.129	11610
0.735	11	0.101	11110
0.735	13	0.084	10920
0.845	7	0.147	10290
0.845	9	0.113	10170
0.845	11	0.091	10010
0.845	13	0.080	10400
0.970	7	0.186	13020
0.970	9	0.133	11970
0.970	11	0.116	12760
0.970	13	0.089	11570

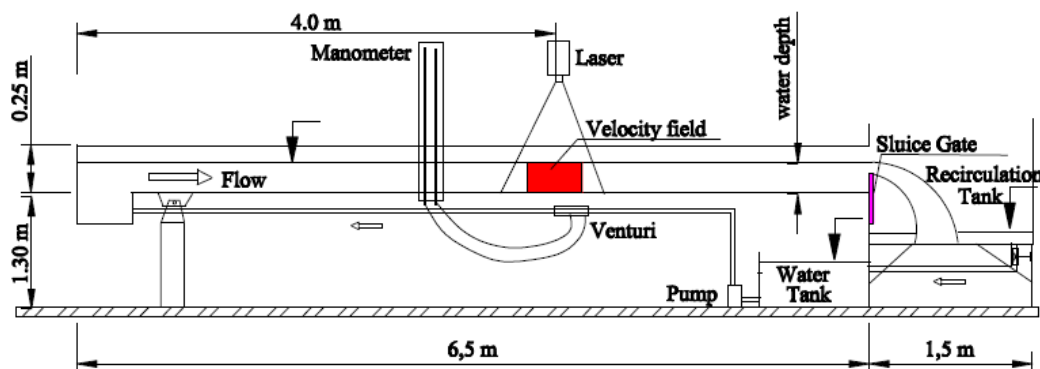
Βλάστηση $h_v=6\text{m}$

Παροχή Q (lt/s)	Ολικό Βάθος Ροής h (cm)	U_{mean} (m/s)	Αριθμός Reynolds $Re = \frac{Uh}{\nu}$
0.735	7	0.089	6230
0.735	9	0.068	6120
0.735	11	0.054	5940
0.735	13	0.039	5070
0.845	7	0.103	7210
0.845	9	0.078	7020
0.845	11	0.063	6930
0.845	13	0.049	4550
0.970	7	0.118	8260
0.970	9	0.087	7830
0.970	11	0.070	7700
0.970	13	0.035	4550



Φωτογραφία 1. Εύκαμπτη βλάστηση με α) 2 cm και β) 6 cm ύψος

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε οριζόντιο κανάλι. Οι μετρήσεις τη ταχύτητας σε διδιάστατο επίπεδο έγιναν με τη βοήθεια συσκευής Particle Image Velocimetry (σχήμα 2). Στη συνέχεια υπολογίστηκαν οι τυρβώδεις εντάσεις, οι τάσεις Reynolds και η τυρβώδης κινητική ενέργεια με τη βοήθεια του Matlab καθώς και οι θέσεις εμφάνισης των δινών. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας ένα TSI PowerView Plus 1660 x 1200 px² 2M-pixel 12-bit CCD camera. Χρησιμοποιήθηκαν δύο δέσμες φωτός που προέρχονταν από τα δύο laser που χρησιμοποιήθηκαν. Σε κάθε πείραμα τα σωματίδια που χρησιμοποιήθηκαν ήταν φυσικές ακαθαρσίες της ροής του νερού οι οποίες δρούσαν σαν σωματίδια μεγέθους περίπου 10 μm. Με τη βοήθεια CCD κάμερας έγινε λήψη 500 φωτογραφιών με την επεξεργασία των οποίων έγινε η στατιστική ανάλυση της τύρβης. Ο συγχρονισμός των παλμών του laser και της CCD camera πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας ένα TSI synchronizer με ανάλυση 200ns. Οι μέσες ταχύτητες (U_{mean}) του πίνακα 1 υπολογίστηκαν με τη βοήθεια του Matlab μετά την επεξεργασία των 500 αυτών φωτογραφιών.



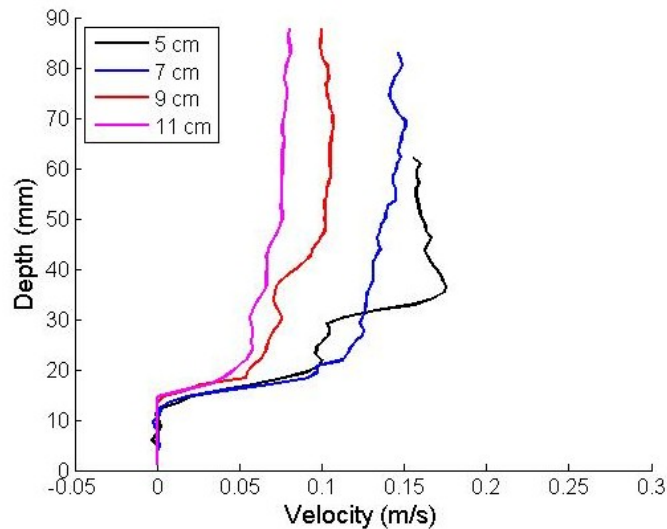
Σχήμα 2. Πειραματική διάταξη

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε απόσταση 4 m από την είσοδο του καναλιού και πάνω από τη βλάστηση. Η απόσταση αυτή είναι ικανή ώστε η ροή να θεωρηθεί πλήρως αναπτυγμένη όπως αποδεικνύεται και από τα πειράματα. Η πλήρης ανάπτυξη της ροής αποτιμήθηκε συγκρίνοντας τις κατανομές των ταχυτήτων πάνω από τη βλάστηση σε δύο κατακόρυφες τομές σε απόσταση 60 cm. Η ομοιομορφία της ροής ελέγχθηκε μετρώντας το βάθος ροής με τη βοήθεια κανόνων τοποθετημένων ανά 0.5 m. Το επιθυμητό βάθος ροής ελεγχόταν με τη βοήθεια ορθογωνικού εκχειλιστή που βρισκόταν στην έξοδο του καναλιού. Το λάθος στο μετρούμενο βάθος ροής ήταν της τάξης του ± 0.1 mm. Η παροχή μετρήθηκε με την βοήθεια Venturi που ήταν

τοποθετημένος στον καταθλιπτικό αγωγό της αντλίας, η οποία παρείχε το ανακυκλούμενο νερό στο κανάλι.

3. ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων έχει ως σκοπό να προσδιορίσει τη σχέση ανάμεσα στην παροχή, το βάθος ροής, το ύψος της βλάστησης, την κατανομή των ταχυτήτων και τα τυρβώδη χαρακτηριστικά της ροής. Στο σχήμα 3 απεικονίζεται η επίδραση του βάθους ροής πάνω από το πορώδες ($h'=5, 7, 9$ και 11cm) στο προφίλ ταχυτήτων. Το ύψος της βλάστησης είναι 2cm και η παροχή 0.735lt/s . Όπως φαίνεται στο σχήμα 3 η ταχύτητα ροής μειώνεται με την αύξηση του βάθους ροής, όπως ήταν αναμενόμενο.



Σχήμα 3. Επίδραση του βάθους ροής στην κατανομή ταχυτήτων

Η επίδραση του πορώδους πυθμένα στις τυρβώδεις εντάσεις u' και v' είναι σημαντική. Η ταχύτητα έχει αδιαστατοποιηθεί χρησιμοποιώντας την ταχύτητα τριβής U_* ($U_* = \sqrt{\tau_0/\rho}$, όπου τ_0 είναι η διατμητική τάση στο οριακό στρώμα που εμφανίζεται πάνω από την βλάστηση ($\tau_0 = \mu \frac{\partial U}{\partial y}$), όπου μ είναι το δυναμικό ιξώδες και ρ η πυκνότητα του νερού. Στο σχήμα 4 παρουσιάζεται η κατανομή της τυρβώδους έντασης u'/U_* σε σχέση με το βάθος ροής (u'/U_* με y/h' , όπου $u' = \sqrt{\bar{u}^2}$ και $\bar{u}^2 = \text{ορθή τυρβώδης τάση στη διεύθυνση της ροής}$) για τους δύο τύπους της βλάστησης και για αδιαπέρατο πυθμένα με την ίδια παροχή ($Q=0.845\text{lt/s}$) και για το ίδιο βάθος ροής ($h=11\text{cm}$). Στο ίδιο σχήμα φαίνεται και η ημι-εμπειρική καμπύλη της κατανομής των τυρβωδών εντάσεων για ροή πάνω από αδιαπέρατο πυθμένα που δίνεται από τις σχέσεις των Nezu and Nakagawa (1993). Οι σχέσεις των Nezu and Nakagawa (1993) είναι οι εξής :

$$\frac{u'}{U_*} = 2.30 \exp\left(\frac{-y}{h'}\right) \quad (3.1)$$

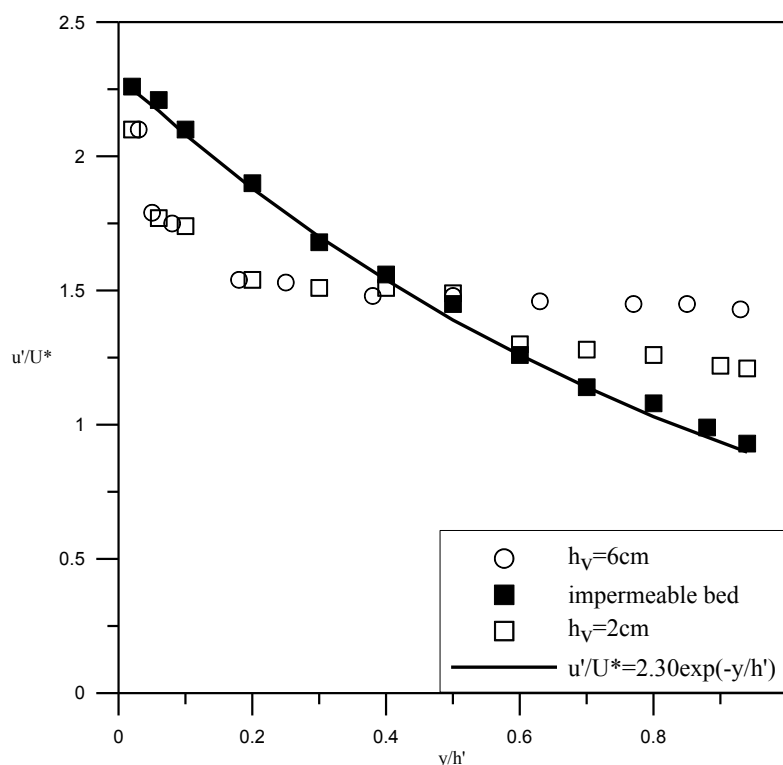
$$\frac{v'}{U_*} = 1.27 \exp\left(\frac{-y}{h'}\right) \quad (3.2)$$

$$\frac{k}{U_*^2} = 4.78 \exp\left(\frac{-2y}{h'}\right) \quad (3.3)$$

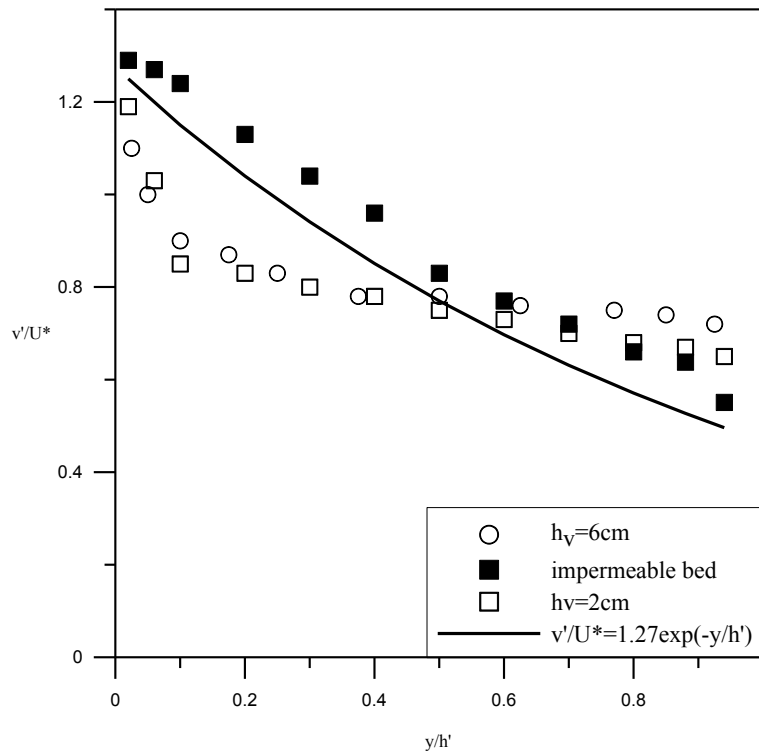
$$\frac{-\overline{u'v'}}{U_*} = 1 - \left(\frac{y}{h'}\right) \quad (3.4)$$

Στο σχήμα 4 φαίνεται ότι η κλίση της καμπύλης της παραπάνω εξίσωσης (3.1) είναι παρόμοια μόνο με την κλίση στην περίπτωση του αδιαπέρατου πυθμένα. Η παρουσία της βλάστησης επηρεάζει σημαντικά την κλίση της τυρβώδους έντασης u'/U_* πάνω από τη διεπιφάνεια ρευστού-πορώδους. Ειδικά για την περίπτωση $y/h' < 0.5$ (y : απόσταση από τη διεπιφάνεια) η τυρβώδης ένταση u'/U_* μειώνεται σε σχέση με τον αδιαπέρατο πυθμένα γεγονός που οφείλεται στην διείσδυση της τύρβης από την περιοχή του ρευστού στην πορώδη περιοχή η οποία μειώνει την τύρβη. Για την περίπτωση $y/h' > 0.5$ η τυρβώδης ένταση u'/U_* αυξάνεται κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια σε σχέση με τον αδιαπέρατο πυθμένα γεγονός που οφείλεται στην σχεδόν ομοιομορφία των μέσων ταχυτήτων που παρατηρείται στο άνω τμήμα του καναλιού η οποία κρατά σχεδόν σταθερή την τυρβώδη ένταση u'/U_* .

Στο σχήμα 5 απεικονίζεται η κατανομή της κατακόρυφης τυρβώδους έντασης v'/U_* με το βάθος ροής y/h' για διαπερατό και αδιαπέρατο πυθμένα. Και σε αυτή την περίπτωση η κλίση της καμπύλης της εξίσωσης (3.2) είναι παρόμοια μόνο με την κλίση στην περίπτωση του αδιαπέρατου πυθμένα ενώ η παρουσία της βλάστησης επηρεάζει σημαντικά την κλίση της τυρβώδους έντασης v'/U_* πάνω από τη διεπιφάνεια ρευστού-πορώδους. Τα ίδια αποτελέσματα παρατηρούνται για $y/h' < 0.5$ και για $y/h' > 0.5$.

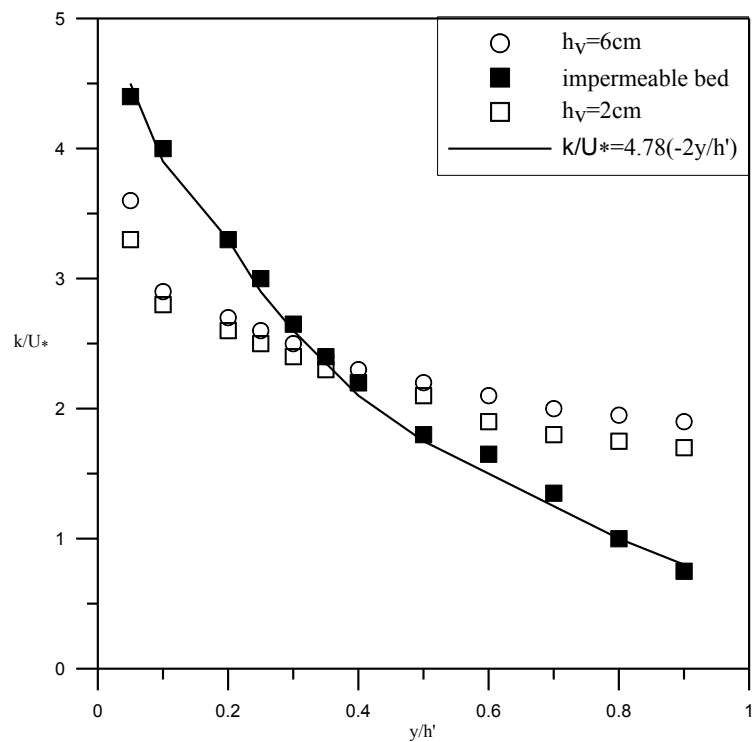


Σχήμα 4. Κατανομή της τυρβώδους έντασης u'/U_* με το βάθος ροής y/h'



Σχήμα 5. Κατανομή της τυρβώδους έντασης v'/U_* με το βάθος ροής y/h'

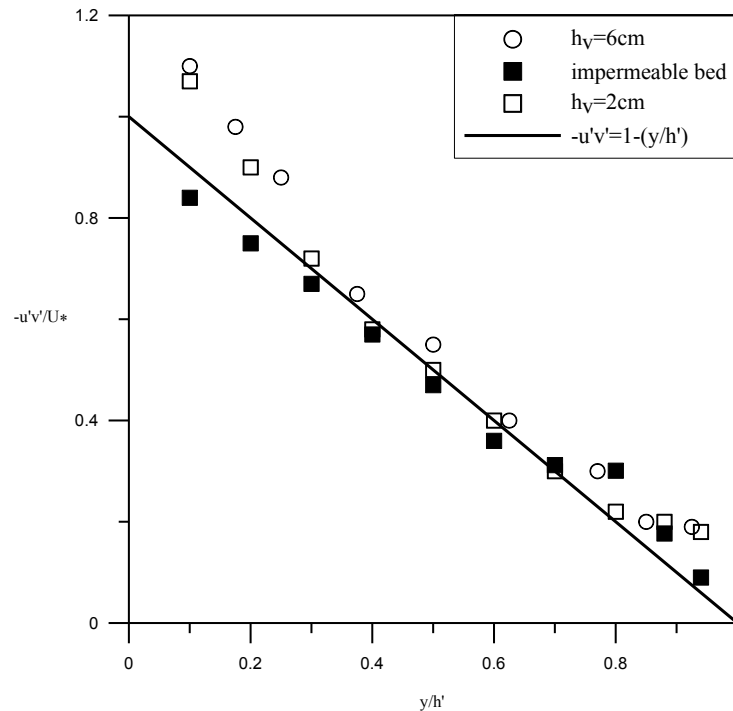
Η κατανομή της τυρβώδους κινητικής ενέργειας k στο βάθος ροής y/h' παρουσιάζεται στο σχήμα 6. Το k υπολογίστηκε από τη σχέση $k = \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2})$. Και σε αυτή την περίπτωση η παρουσία της βλάστησης επηρεάζει σημαντικά την κλίση της τυρβώδους έντασης v'/U_* πάνω από τη διεπιφάνεια ρευστού-πορώδους. Τα ίδια αποτελέσματα παρατηρούνται για $y/h' < 0.5$ και για $y/h' > 0.5$.



Σχήμα 6. Κατανομή της τυρβώδους κινητικής ενέργειας k ως προς το βάθος y/h'

Η κατανομή της τυρβώδους διατμητικής τάσης $\overline{u'v'}$ με το βάθος ροής ($\frac{-\overline{u'v'}}{U_*}$ vs y/h') παρουσιάζεται στο σχήμα 7. Ικανοποιητική συμφωνία παρατηρείται μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και της θεωρητικής εξίσωσης $\frac{-\overline{u'v'}}{U_*} = 1 - \left(\frac{y}{h'}\right)$.

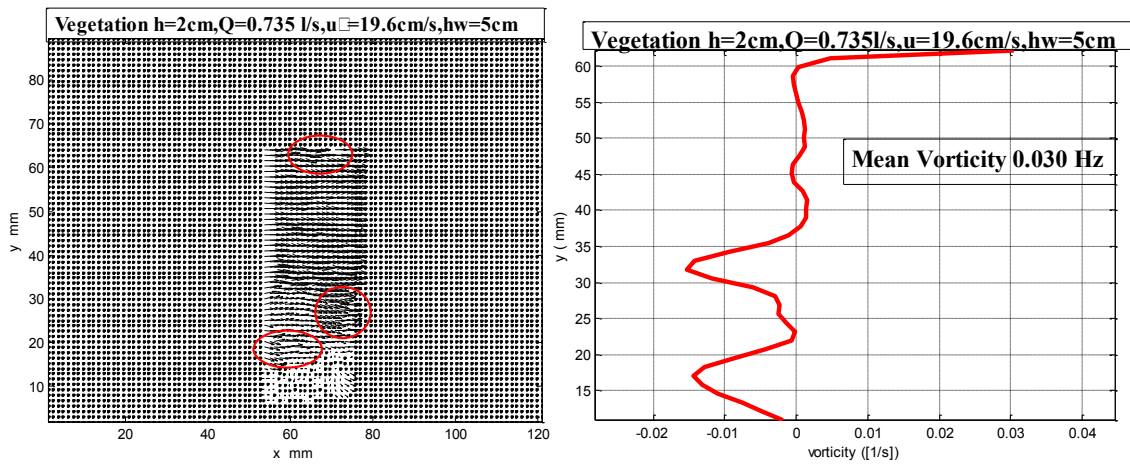
Αποκλίσεις παρατηρούνται στην περίπτωση της βλάστησης ύψους 6 cm κοντά στη διεπιφάνεια εκεί όπου τα πειραματικά δεδομένα έδωσαν μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με τη θεωρητική εξίσωση (3.4). Αυτό οφείλεται στην αλληλεπίδραση της ροής μέσα και πάνω από τη βλάστηση.



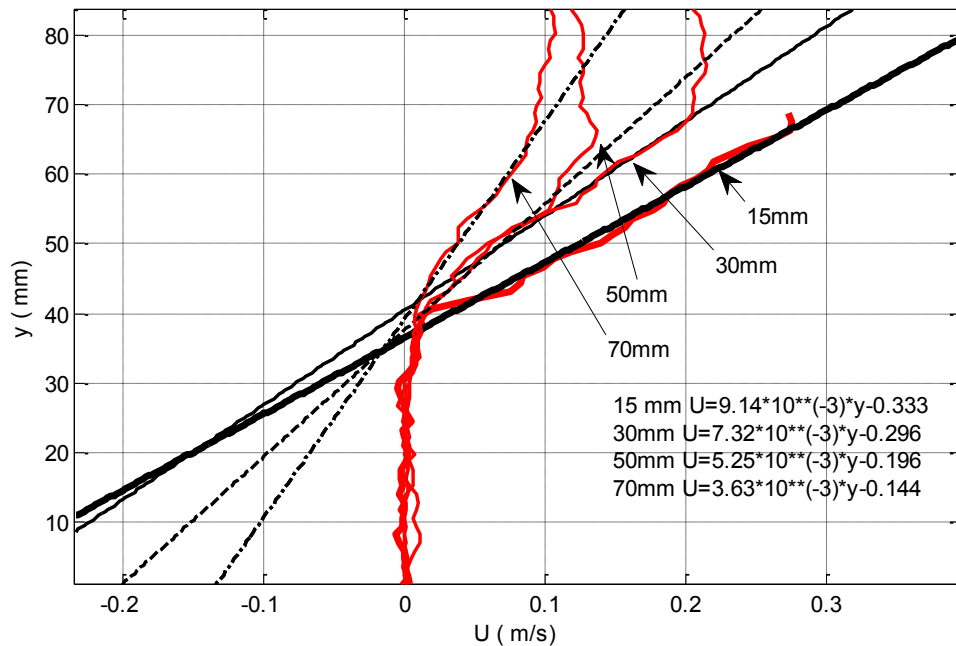
Σχήμα 7. Κατανομή της τυρβώδους διατμητικής τάσης $\overline{u'v'}$ με το βάθος ροής y/h'

Στις θέσεις όπου παρατηρείται σημαντική κλίση των προφίλ ταχυτήτων εμφανίζονται δίνες μεγάλης κλίμακας. Έτσι στην διεπιφάνεια του νερού με τη βλάστηση παρατηρούνται οι δίνες καθώς και στην ελεύθερη επιφάνεια. Στο σχήμα 8α παρατηρούμε ένα πεδίο ροής καθώς και τις θέσεις εμφάνισης των δινών, ενώ στο σχήμα 8β παρατηρείται η μεταβολή σε ύψος της μέσης τιμής των δινών.

Στο σχήμα 9 παρατηρούνται οι κλίσεις των προφίλ ταχύτητας στη διεύθυνση της ροής στην περιοχή του οριακού στρώματος πάνω από τη βλάστηση για διάφορα βάθη ροής πάνω από τη βλάστηση καθώς και τις εξισώσεις αυτών. Η επίδραση των δινών δημιουργεί και την κίνηση της εύκαμπτης βλάστησης ενώ δεν είναι τόσο έντονη σε άκαμπτη βλάστηση. Η εμφάνιση των δινών δημιουργεί και απώλεια της κινητικής ενέργειας της ροής, μείωση της ταχύτητας και συνεπώς αύξηση του βάθους ροής. Η διατμητική τάση μεταβάλλεται με το βάθος ροής, όπως φαίνεται και από το παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 8. α) Πεδίο ροής καθώς και τις θέσεις εμφάνισης δινών, β) μεταβολή σε ύψος της μέσης τιμής των δινών



Σχήμα 9. Προφίλ ταχυτήτων για παροχή 0.735l/sec, ύψος βλάστησης 6cm και για διάφορα βάθη ροής

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα τελικά συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν από την εργασία αυτή, είναι τα ακόλουθα :

- Η παρουσία της βλάστησης επηρεάζει σημαντικά : α) την κατανομή των τυρβωδών εντάσεων u'/U_* και v'/U_* και β) την κατανομή της τυρβώδους κινητικής ενέργειας k . Οι τυρβώδεις εντάσεις και η τυρβώδης κινητική ενέργεια μειώνονται κοντά στη διεπιφάνεια ρευστού-πορώδους σε σύγκριση με τον αδιαπέρατο πυθμένα γεγονός που οφείλεται στην διείσδυση της τύρβης από την περιοχή του ρευστού προς την περιοχή της βλάστησης. Οι τυρβώδεις εντάσεις και η τυρβώδης κινητική ενέργεια

αυξάνονται κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια γεγονός που οφείλεται στην ομοιομορφία των μέσων ταχυτήτων που παρατηρείται στο άνω τμήμα του καναλιού η οποία διατηρεί σχεδόν σταθερά τα τυρβώδη χαρακτηριστικά.

- Ικανοποιητική συμφωνία παρατηρείται μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και της θεωρητικής εξίσωσης $\frac{-\overline{u'v'}}{U_*} = 1 - \left(\frac{y}{h'}\right)$.

Αποκλίσεις παρατηρούνται στην περίπτωση της βλάστησης ύψους 6 cm κοντά στη διεπιφάνεια εκεί όπου τα πειραματικά δεδομένα είναι αυξημένα σε σχέση με τα δεδομένα της θεωρητικής εξίσωσης. Αυτό οφείλεται στην αλληλεπίδραση της ροής μέσα και πάνω από τη βλάστηση.

- Η επίδραση των δινών δημιουργεί και την κίνηση της εύκαμπτης βλάστησης ενώ δεν είναι τόσο έντονη σε άκαμπτη βλάστηση. Η εμφάνιση των δινών δημιουργεί και απώλεια της κινητικής ενέργειας της ροής, μείωση της ταχύτητας και συνεπώς αύξηση του βάθους ροής.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Agelin-Chaab, M., and Tachie, M. F. 2006. *Open channel turbulent flow over hemispherical ribs*. Int. J. Heat Fluid Flow, 27(6), 1010–1027.
- Bigillon, F., Nino, Y. and Garcia, M. 2006. *Measurements of turbulence characteristics in an open-channel flow over a transitionally-rough bed using particle image velocimetry*. Experiments in Fluids, 41(6), 857-867.
- Ferro, V., and Baiamonte, G. 1994. *Flow velocity profiles in gravel-bed rivers*. J. Hydraul. Eng., 120(1), 60–80.
- Hoover, T. M., and Ackerman, J. D. 2004. *Near-bed hydrodynamic measurements above boulders in shallow torrential streams: Implications for stream biota*. J. Environ. Eng. Sci., 3(5), 365–378.
- Jarvela, J. 2005. *Effect of submerged flexible vegetation on flow structure and resistance*. Journal of Hydrology, 307, 233-241.
- Kirkgoz, M. S. 1989. *Turbulent velocity profiles for smooth and rough open channel flow*. J. Hydraul. Eng., 115(11), 1543–1561.
- Κεραμάρης, Ε. και Πρίνος, Π. 2009. *Μετρήσεις Τυρβώδους Ροής σε Ανοικτό Αγωγό με Ανεμομετρία Θερμού Φίλμ*, Υδροτεχνικά, 18-19: 3-20.
- Nakagawa, H., Nezu, I., and Ueda, H. 1975. *Turbulence of open channel flow over smooth and rough beds*. Proc. Jpn. Soc. Civ. Eng., 241, 155–168.
- Nezu, I. and Nakagawa, H. 1993. *Turbulence in Open-Channel-Flows*, Balkema Publishers, Rotterdam, The Netherlands.
- Roy, A. G., Buffin-Blanger, T., Lamarre, H., and Kirkbride, A. D. 2004. *Size, shape and dynamics of large-scale turbulent flow structures in a gravel-bed river*. J. Fluid Mech., 500, 1–27.
- Wang, X., Sun, Y., Lu, W. and Wang, X., 2011. *Experimental Study of the Effects of Roughness on the Flow Structure in a Gravel-bed Channel Using PIV*. J. Hydraul. Eng., 16, 710.
- Wilson, C.A.M.E, Stoesser, T., Bates, P.D. and Batemann Pinzen, A. 2003. *Open channel flow through different forms of submerged flexible vegetation*. J. of Hydraul. Eng., 129(11), 847-853.

**ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΤΥΡΒΩΔΟΥΣ
ΑΝΩΣΤΙΚΗΣ ΦΛΕΒΑΣ ΣΕ ΚΙΝΟΥΜΕΝΟ ΑΠΟΔΕΚΤΗ
Αριστείδης Α. Μπλούτσος¹, Παναγιώτης Χρ. Γιαννόπουλος^{1*}**

¹Εργαστήριο Τεχνολογίας του Περιβάλλοντος, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών
Πανεπιστήμιο Πατρών, 265 04 Πάτρα
*Η.τ.: yannopp@upatras.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Εφαρμόζοντας την ολοκληρωματική μέθοδο προβλέπονται τα μέσα χαρακτηριστικά του πεδίου ροής από την εκροή οριζόντιας κυκλικής τυρβώδους φλέβας άνωσης εντός κινούμενου υδάτινου αποδέκτη. Οι διαφορικές εξισώσεις μερικών παραγώγων της συνεχείας, της ορμής και της διατήρησης της μάζας του ιχνηθέτη εκφράζονται σε ένα σύστημα κυλινδρικών καμπυλόγραμμων συντεταγμένων. Η συμβολή των φαινομένων 2^{ου} τάξεως λαμβάνεται υπόψη στις εισροές ορμής και άνωσης. Οι εξισώσεις ολοκληρώνονται στην εγκάρσια επιφάνεια της φλέβας. Το σύστημα των συνήθων διαφορικών εξισώσεων που προκύπτει επιλύεται αριθμητικά χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Runge-Kutta 4^{ης} τάξεως, θεωρώντας μη γραμμική την εξάπλωση της φλέβας. Τα αποτελέσματα των χαρακτηριστικών του πεδίου ροής συγκρίνονται με πειραματικά δεδομένα παρουσιάζοντας αρκετά καλή συμπεριφορά.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Κυκλική φλέβα άνωσης, οριζόντια εκροή, κινούμενος αποδέκτης, κυλινδρικές καμπυλόγραμμες συντεταγμένες, πεδίο ροής

**SIMULATION OF A HORIZONTAL ROUND TURBULENT
BUOYANT JET IN A CURRENT
Aristeides A. Bloutsos¹, Panayotis C. Yannopoulos^{1*}**

¹Environmental Engineering Laboratory, Department of Civil Engineering
University of Patras, 265 04 Patras, Greece
*E-mail: yannopp@upatras.gr

ABSTRACT

The mathematical description of a horizontal round turbulent buoyant jet in a uniform moving environment is based on the time-averaged partial differential equations of continuity, momentum and conservation of tracer mass in a curvilinear system of cylindrical coordinates. Applying second order mathematical approximation, the contribution of turbulence to momentum and buoyancy fluxes has been taken into account. The final equations are integrated on the cross-sectional area of the jet applying similarity assumption and actual boundary conditions. A system of ordinary differential equations is produced which is solved numerically using the 4th order Runge-Kutta method, assuming a nonlinear jet spreading. The results regarding centerline trajectories and dilutions are compared to experimental data available in the literature showing a good performance of the model.

KEY WORDS: Round buoyant jet; horizontal discharge; moving environment; curvilinear cylindrical coordinates; flow field

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η τελική διάθεση των υγρών αστικών και βιομηχανικών αποβλήτων, κατόπιν της απαιτούμενης επεξεργασίας, γίνεται συνήθως σε υδάτινους αποδέκτες μεγάλου όγκου ύδατος (θάλασσες, ποταμούς, λίμνες) μέσω υποθαλασσίων αγωγών προσαγωγής των αποβλήτων στον διαχύτη. Ο διαχύτης αποτελείται από ακροφύσια, συνήθως κατακόρυφα, οριζόντια ή κεκλιμένα, αναλόγως των τοπικών συνθηκών του αποδέκτη και των ειδικών απαιτήσεων σχεδιασμού. Παρόμοια συστήματα σχεδιάζονται επίσης για τη διάθεση των αποβλήτων από εγκαταστάσεις αφαλάτωσης καθώς και για την απόρριψη θερμού ύδατος που προκύπτει από ψύξη μηχανών παραγωγής ενέργειας. Η διάθεση αερίων ρύπων και καπνού στην ατμόσφαιρα από βιομηχανικές εγκαταστάσεις και σταθμούς παραγωγής ενέργειας, καθώς και η απόρριψη αερίων θερμικών αποβλήτων, πραγματοποιείται με καμινάδες και πύργους ψύξεως. Η πρόβλεψη των πεδίων ροής και μίξεως που λαμβάνουν χώρα σε όλες τις προαναφερόμενες περιπτώσεις γίνεται με παρόμοιες μαθηματικές και υπολογιστικές μεθόδους (Fischer et al., 1979, Doneker & Jirka, 1988-2007, Schnelle and Dey, 2000, Lee and Chu, 2003).

Στην παρούσα εργασία αναπτύσσεται θεωρητικά η προσομοίωση της διάχυσης ρευστού το οποίο εξέρχεται οριζόντια από κυκλική πηγή σε κινούμενο και ομοιόμορφο αποδέκτη, του οποίου η πυκνότητα διαφέρει λίγο από την αρχική πυκνότητα του διαχεόμενου ρευστού. Η θεωρητική αντιμετώπιση του φαινομένου γίνεται χρησιμοποιώντας τη διαδεδομένη ολοκληρωματική μέθοδο που συνήθως εφαρμόζεται στην πρόβλεψη του πεδίου ροής ανωστικών φλεβών (Jirka, 2004). Τα ολοκληρωματικά μοντέλα διακρίνονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο πλήρωσης του συστήματος των συνήθων διαφορικών εξισώσεων (Lee and Chu, 2003). Η πρώτη κατηγορία στηρίζεται στην υπόθεση της συμπαράσυρσης (Schatzmann, 1979) ενώ η δεύτερη σε εκείνη της εγκάρσιας διασποράς (Lee & Jirka, 1981). Έτσι αποκτάται ημιεμπειρικά μια εξίσωση αναγκαία για την πλήρωση και επίλυση του συστήματος των εξισώσεων συνεχείας, ορμής και διάχυσης. Τα εν λόγω μοντέλα από πλευράς μαθηματικής προσέγγισης είναι 1^{ης} τάξεως, καθόσον οι όροι 2^{ας} τάξεως που προκύπτουν κατά την ολοκλήρωση, αναφορικά με τις τυρβώδεις συνεισφορές στις εισροές ορμής και ανώσεως, καθώς και η δυναμική πίεση έχουν παραληφθεί ή δεν έχουν ληφθεί υπόψη χωριστά. Οι προσεγγίσεις αυτές σε ορισμένες περιπτώσεις είναι αιτία για σημαντικές αποκλίσεις από τις πειραματικές παρατηρήσεις.

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης γίνεται με τα πειραματικά αποτελέσματα της εργασίας του Ayoub (1971). Τα συγκεκριμένα δεδομένα αναφέρονται σε οριζόντιες κυκλικές φλέβες και αφορούν μετρήσεις τροχιών και αξονικών αραιώσεων και χρησιμοποιούνται άμεσα από την παρούσα εργασία. Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν πειραματικά αποτελέσματα και άλλων ερευνητών τα οποία όμως παρουσιάζονται με ελλιπή στοιχεία, επομένως δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν.

Καινοτομίες της παρούσας εργασίας είναι, αφενός, η ακριβής μαθηματική περιγραφή μέσω καμπυλόγραμμου συστήματος ορθογωνίων συντεταγμένων και, αφετέρου, η εφαρμογή της ολοκληρωματικής μεθόδου 2ας τάξεως, ακολουθώντας παρόμοια μεθοδολογία με την προτεινόμενη από τον πρώτο συγγραφέα για κατακόρυφες δισδιάστατες και κυκλικές φλέβες με άνωση (Yannopoulos, 2006). Η σχετικώς καλή συμφωνία των αποτελεσμάτων του προτεινόμενου μοντέλου με πειράματα από τη διεθνή βιβλιογραφία, ιδιαίτερος όσον αφορά τις τροχιές και τις αραιώσεις, επιβεβαιώνει την αξιοπιστία του μοντέλου, το οποίο δύναται να αποτελέσει χρήσιμο εργαλείο κατά το σχεδιασμό συστημάτων διάθεσης υγρών, θερμικών και αερίων αποβλήτων σε ομοειδή περιβάλλοντα. Επίσης, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί

για την επαλήθευση πολύπλοκων αριθμητικών μοντέλων, αλλά και για εργαστηριακές μελέτες σχετικών ομοιωμάτων.

Το πεδίο ροής της οριζόντιας τυρβώδους κυκλικής φλέβας εντός κινούμενου περιβάλλοντος ρευστού προσδιορίζεται από τις αρχικές εισροές όγκου μ_0 , ορμής m_0 και άνωσης β_0 , την αξονική απόσταση ξ από το ακροφύσιο εξόδου, την ταχύτητα του ρεύματος u_a και τη γωνία ω . Οι αρχικές ποσότητες των εισροών περιγράφονται από τις σχέσεις $\mu_0 = A_0 w_{d0}$, $m_0 = A_0 w_{d0}^2$, $\beta_0 = g_0' A_0 w_{d0} c_0$ όπου $g_0' = g (\rho_a - \rho_0) / \rho_0$, $A_0 = \pi D^2 / 4 = \eta$ επιφάνεια του στομίου εξόδου, $D = \eta$ διάμετρος του ακροφυσίου, $\rho_0 = \eta$ πυκνότητα του ρευστού στην έξοδο, $\rho_a = \eta$ πυκνότητα του αποδέκτη, $w_{d0} = \eta$ αρχική ταχύτητα εξόδου και η συγκέντρωση του ιχνηθέτη στην έξοδο του ακροφυσίου είναι $c_0 = 1$. Μέσω της διαστατικής ανάλυσης προκύπτει ότι το πρόβλημα περιγράφεται από τέσσερις αδιάστατες μεταβλητές. Αυτές οι μεταβλητές είναι ο αρχικός πυκνομετρικός αριθμός Froude $F_0 = w_{d0} (g_0' D)^{-1/2}$, η ανηγμένη ταχύτητα ρεύματος $U_a^* = u_a / \beta_0^{1/3} = (u_a / w_{d0}) F_0$ που αντιστοιχεί σε ένα τύπο Froude ρεύματος/φλέβας, η γωνία ω του επιπέδου της φλέβας ως προς την οριζόντια και η ανηγμένη αξονική απόσταση $X = (\xi / D) F_0^{-1}$, ή διαφορετικά οι αδιάστατες τεταγμένες $X = (x / D) F_0^{-1}$ και τετμημένες $Z = (z / D) F_0^{-1}$ που προσδιορίζουν τον άξονα της φλέβας.

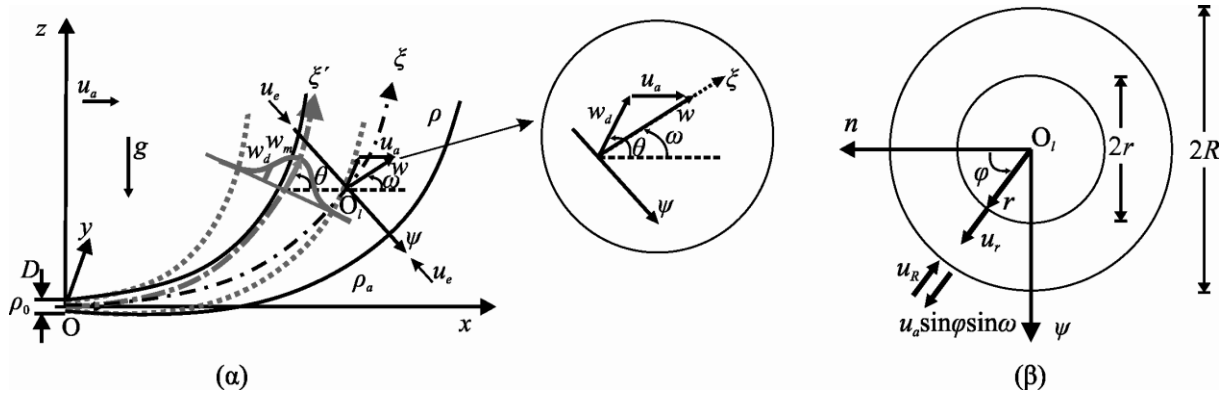
Η παρούσα εργασία καινοτομεί καθώς ενσωματώνει την ακριβή περιγραφή του πεδίου ροής μέσω καμπυλόγραμμου συστήματος κυλινδρικών συντεταγμένων και την εφαρμογή της ολοκληρωματικής μεθόδου 2ας τάξεως, ακολουθώντας παρόμοια μεθοδολογία με την προτεινόμενη από τον δεύτερο συγγραφέα για κατακόρυφες δισδιάστατες και κυκλικές φλέβες με άνωση (Yannopoulos, 2006). Η ανάπτυξη του μοντέλου οδηγεί στην πρόβλεψη της τροχιάς, των μέσων αξονικών ταχυτήτων και αξονικών αραιώσεων μιας οριζόντιας κυκλικής τυρβώδους φλέβας με άνωση εντός κινούμενου ομοιόμορφου υδάτινου αποδέκτη. Η καλή συμφωνία των αποτελεσμάτων του προτεινόμενου μοντέλου με πειράματα από τη διεθνή βιβλιογραφία επιβεβαιώνει την αξιοπιστία του μοντέλου. Έτσι, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί στο σχεδιασμό συστημάτων διάθεσης υγρών, θερμικών και αερίων αποβλήτων σε αυτές τις συνθήκες. Επίσης, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την επαλήθευση πολύπλοκων αριθμητικών μοντέλων, αλλά και για εργαστηριακές μελέτες σχετικών ομοιωμάτων.

2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

2.1 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΘΕΩΡΗΣΗ

Θεωρείται κυκλική φλέβα με άνωση αρχικής πυκνότητας ρ_0 , η οποία εκρέει από κυκλικό ακροφύσιο διαμέτρου D , εντός κινούμενου ρευστού αποδέκτη ταχύτητας u_a μεγάλων διαστάσεων και ομοιόμορφης πυκνότητας ρ_a . Στην έξοδο, το ρευστό της φλέβας έχει αρχική οριζόντια ταχύτητα w_{d0} και πυκνότητα ρ_0 , λίγο μικρότερη από την πυκνότητα του περιβάλλοντος ρευστού ($\rho_a \geq \rho_0$). Η φλέβα διαγράφει καμπυλόγραμμη τροχιά λόγω των δυνάμεων ορμής και άνωσης. Τα αναπτυσσόμενα πεδία ροής και μίξεως σε κάθε εγκάρσια διατομή της φλέβας θεωρείται ότι παραμένουν αρκούντως συμμετρικά ως προς τον άξονά της. Ο άξονας της φλέβας συνήθως ορίζεται ως ο γεωμετρικός τόπος όπου παρουσιάζεται η μεγιστοποίηση των τιμών των μέσων ταχυτήτων ή συγκεντρώσεων και το επίπεδό του είναι παράλληλο στη διεύθυνση ροής του περιβάλλοντος ρευστού (coflowing). Το σχηματιζόμενο πεδίο ροής περιγράφεται μαθηματικά χρησιμοποιώντας ένα καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων $O(x,y,z)$ και ένα σύστημα καμπυλόγραμμων κυλινδρικών συντεταγμένων $O(r,\varphi,\xi)$. Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται η μορφή των πεδίων ροής και μίξεως που σχηματίζονται, καθώς και τα συστήματα συντεταγμένων. Οι εγκάρσιες κατανομές των ταχυτήτων και των συγκεντρώσεων προσεγγίζονται αρκετά καλά με κατανομές τύπου Gauss. Η

υπερέχουσα ταχύτητα w_d ακολουθεί τη Gauss κατανομή όντας συμμετρική ως προς τον άξονα ξ' και σχηματίζοντας γωνία θ με το οριζόντιο επίπεδο. Σημειώνεται ότι ο άξονας ξ' θα ήταν ο άξονας της τροχιάς της φλέβας, εάν ο αποδέκτης ήταν ακίνητος. Η ύπαρξη του ρεύματος στο περιβάλλον ρευστό μετατοπίζει τη φλέβα στον άξονα ξ . Έτσι, η υπερέχουσα ταχύτητα που εισέρχεται στο σύστημα των εξισώσεων που περιγράφουν μαθηματικά τη ροή είναι η γεωμετρική προβολή της υπερέχουσας ταχύτητας w_d στον άξονα ξ .



Σχήμα 1: Πεδίο ροής και διάχυσης κυκλικής ανωστικής φλέβας σε κινούμενο αποδέκτη (α) κάτοψη (β) τομή.

2.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΚΑΙ ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Η μαθηματική περιγραφή του φαινομένου βασίζεται στις διαφορικές εξισώσεις μερικών παραγώγων της συνεχείας, της ορμής και της διατήρησης της μάζας του διαχεόμενου ρευστού (ιχνηθέτη) σε σύστημα Καρτεσιανών συντεταγμένων. Η διατύπωσή τους γίνεται βάσει της παραδοχής Reynolds, κατά την οποία κάθε βασική μεταβλητή X του προβλήματος δύναται να αναλυθεί σε άθροισμα της μέσης της τιμής \bar{X} και της διακύμανσής της X' , οι εξισώσεις μετασχηματίζονται σε εξισώσεις μέσης ροής και διάχυσης. Στις εξισώσεις αυτές οι όροι μοριακού ιξώδους παραλείπονται, επειδή είναι πολύ μικροί συγκριτικά με τους αντίστοιχους όρους τυρβώδους ιξώδους, οι οποίοι διατηρούνται. Λαμβάνονται υπόψη οι συνήθεις βασικές παραδοχές-προσεγγίσεις, όπως Boussinesq για μικρές αρχικές διαφορές πυκνοτήτων, τύπου οριακού στρώματος του Prandtl, αμελητέας μοριακής διάχυσης συγκριτικά με την τυρβώδη, παραβολικού τύπου ροής κατά την κύρια διεύθυνση και ανυπαρξίας περιδίνησης (Yannopoulos, 2006). Επίσης περιλαμβάνονται οι όροι 2ας τάξεως, οι οποίοι εισάγουν τη συμβολή της τύρβης στις εισροές της ορμής και της ανώσεως. Στη συνέχεια, οι εξισώσεις μετασχηματίζονται στο καμπυλόγραμμο σύστημα κυλινδρικών συντεταγμένων $O_I(r, \phi, \xi)$ και καταλήγουν στις ακόλουθες μορφές:

Συνεχείας:

$$\frac{\partial(rw)}{\partial \xi} + \frac{\partial(rhu)}{\partial r} = 0 \tag{2.1}$$

Ορμή στη διεύθυνση ξ :

$$\frac{\partial}{\partial \xi} \left[r \left(w^2 + w'^2 + \frac{P_d}{\rho_0} \right) \right] + \frac{\partial(rhuw)}{\partial r} + r \sin \phi \left(uw - \frac{\tau_{r\xi}}{\rho_0} \right) \frac{d\omega}{d\xi} = g'_0 r h c \sin \omega + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial(rh\tau_{r\xi})}{\partial r} \tag{2.2}$$

Ορμή στη διεύθυνση ψ :

$$\frac{\partial}{\partial \xi} \left[r \sin \phi \left(uw - \frac{\tau_{r\xi}}{\rho_0} \right) \right] + \frac{\partial (r \sin \phi hu^2)}{\partial r} - r \left(w^2 + w'^2 + \frac{P_d}{\rho_0} \right) \frac{d\omega}{d\xi} = -g'_0 r h c \cos \omega - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial (r \sin \phi h P_d)}{\partial r} \quad (2.3)$$

Διατήρησης της μάζας του ιχνηθέτη:

$$\frac{\partial [r(wc + w'c')]}{\partial \xi} + \frac{\partial (rhuc)}{\partial r} = -\frac{\partial (rhu'c')}{\partial r} + S_1 \quad (2.4)$$

όπου $h = 1 + r \sin \phi d\omega/d\xi$ είναι ο μετρικός συντελεστής του συστήματος συντεταγμένων, ω η γωνία του άξονα της φλέβας στη θέση ξ ως προς το οριζόντιο επίπεδο, u , w και u' , w' οι μέσες και διακυμαινόμενες ταχύτητες ροής στην ακτινική και τη διαμήκη διεύθυνση αντιστοίχως, $c = (\rho_\alpha - \rho)/(\rho_\alpha - \rho_0)$ οι μέσες και c' οι διακυμαινόμενες συγκεντρώσεις του ιχνηθέτη, ρ είναι η μέση πυκνότητα, w'^2 , $w'c'$, $u'c'$ οι τοπικές εισροές εξαιτίας των τυρβωδών διακυμάνσεων των w , u και c , αντιστοίχως, $\tau_{r\xi}$ η μέση τυρβώδης διατμητική τάση, p_d η δυναμική πίεση, $g'_0 = g(\rho_\alpha - \rho_0)/\rho_0$ η φαινόμενη επιτάχυνση της βαρύτητας στην έξοδο της φλέβας και S_1 είναι ο όρος πηγής, εφ' όσον υφίσταται. Η μέση συγκέντρωση στην έξοδο της φλέβας άνωσης έχει τιμή $c_0=1$.

2.3 ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΤΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ

Στη Ζώνη Εγκαταστημένης Ροής (ZEF) θεωρείται ότι η ροή απλώς μεταφέρεται, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1, όπου w είναι η ταχύτητα της ροής και w_d η υπερέχουσα ταχύτητα. Υποθέτοντας ότι η ταχύτητα του περιβάλλοντος ρεύματος είναι μικρή συγκριτικά με τη μέση ταχύτητα της ανωστικής φλέβας, η κατανομή των περιοδικών στροβίλων παραμένει ανεπηρέαστη καθώς κινείται με τη ταχύτητα του περιβάλλοντος ρευστού u_a . Συνεπάγεται, επομένως, ότι η εγκάρσια κατανομή της ταχύτητας της ανωστικής φλέβας εξακολουθεί να ακολουθεί την κατανομή τύπου Gauss (Davidson et al., 2002) σύμφωνα με την εξίσωση:

$$w_{d\xi} = w_d \cos(\theta - \omega) = w_m \exp \left[-\left(\frac{r}{b_w} \right)^2 \right] \cos(\theta - \omega) \quad (2.5)$$

όπου w_m είναι η μέση υπερέχουσα ταχύτητα στον άξονα ξ' της φλέβας. Το ονομαστικό πλάτος της φλέβας για το πεδίο των ταχυτήτων b_w προσδιορίζεται από εκείνο το σημείο της Gauss κατανομής στο οποίο η τιμή της ταχύτητας λαμβάνει την $1/e$ της μέγιστης τιμής. Ο ρυθμός εξάπλωσης της φλέβας άνωσης προσδιορίζεται από την παρακάτω ημιεμπειρική εξίσωση (Wood, 1993, Lee & Seo, 2000, Davidson & Wang, 2002, Kim et al., 2002).

$$\frac{db_w}{d\xi} = \frac{K_s}{1 + C_{jk} \frac{U_a \cos \omega}{w_m}} \quad (2.6)$$

όπου C_{jk} είναι εμπειρική σταθερά. Οι Wood et al. (1993), Knudsen (1988) προτείνουν ότι $C_{jk} = 1$, ενώ οι Chu et al. (1999), Wright (1994) προτείνουν την τιμή 2. Η σταθερά K_s είναι η τιμή του συντελεστή διεύρυνσης της κυκλικής ανωστικής φλέβας σε ακίνητο

αποδέκτη (Davidson & Wang, 2002). Στην παρούσα εργασία ελήφθησαν $C_{jk} = 2$ και $K_s = 0.110$ (Yannopoulos, 2006).

Η εγκάρσια κατανομή των συγκεντρώσεων c θεωρείται ότι ακολουθεί τη Gauss κατανομή στη Ζώνη Εγκατάστασης της Ροής (ZFE) και εκτός αυτής (ZEF) σύμφωνα με την ακόλουθη μαθηματική διατύπωση:

$$c = c_m \exp \left[- \left(\frac{r}{b_c} \right)^2 \right], \quad (2.7)$$

όπου c_m είναι η μέση τιμή της συγκέντρωσης στον άξονα της φλέβας. Το ονομαστικό πλάτος b_c των συγκεντρώσεων προσδιορίζεται από εκείνο το σημείο της Gauss κατανομής στο οποίο η τιμή της συγκέντρωσης λαμβάνει την $1/e$ της μέγιστης και $b_c = \lambda b_w$. Πρακτικά το όριο της τυρβώδους φλέβας εκτείνεται μέχρι τη θέση $B_w = B/2 + r_b b_w$ (Yannopoulos & Bloutsos, 2012). Κατά την ολοκλήρωση του συστήματος των εξισώσεων με μερικές παραγώγους (2.1)-(2.4) ο συντελεστής r_b λαμβάνει την τιμή $\sqrt{2}$.

Σε κινούμενο αποδέκτη, η συμπαράσυρση του περιβάλλοντος ρευστού που προκαλείται από την κίνηση της ανωστικής φλέβας οφείλεται στην υπερέχουσα ταχύτητα. Η συμπαράσυρση στη τυρβώδη περιοχή έχει τρεις συνιστώσες: η πρώτη πηγάζει από την κατανομή τύπου Gauss, η δεύτερη οφείλεται στην παρουσία της κίνησης του αποδέκτη και η τρίτη οφείλεται στο ζεύγος των στροβίλων (vortex pair) που δημιουργείται από την αλληλεπίδραση της ανωστικής φλέβας και του ρεύματος. Στην παρούσα εργασία η κίνηση του αποδέκτη θεωρείται ότι έχει μικρή ταχύτητα οπότε η συμπαράσυρση του περιβάλλοντος ρευστού προς το εσωτερικό της φλέβας εξαιτίας του ζεύγους των στροβίλων μπορεί να αγνοηθεί (Davidson et al., 2002). Επομένως, καθώς η εξίσωση της κατανομής της ταχύτητας w_d είναι γνωστή, δύναται να εξαχθεί η εξίσωση της εγκάρσιας ταχύτητας της φλέβας $u_e = hu$, ολοκληρώνοντας την εξίσωση της συνεχείας. Η εξίσωση που προκύπτει έχει την παρακάτω μαθηματική διατύπωση:

$$u_e = \frac{w_m b_w \cos(\theta - \omega)}{\xi} \left\{ I_1 \left[2s_b + s_1 - \xi \tan(\theta - \omega) \frac{d(\theta - \omega)}{d\xi} \right] - n s_b \exp(-n^2) \right\} - \frac{n}{2} b_w U_a \sin \omega \frac{d\omega}{d\xi} \quad (2.8)$$

όπου $n = r/b_w$ και $I_1 = [1 - \exp(-n^2)]/2$. Η λογαριθμική κλίση της μείωσης της μέσης αξονικής ταχύτητας s_1 και της αύξησης της διεύρυνσης s_b της φλέβας άνωσης δίνονται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$s_1 = \frac{\xi}{w_m} \frac{dw_m}{d\xi} \quad (2.9)$$

$$s_b = \frac{\xi}{b_w} \frac{db_w}{d\xi} \quad (2.10)$$

Το σύστημα των διαφορικών εξισώσεων με μερικές παραγώγους απαρτίζεται από τις εξισώσεις (2.1) έως (2.4), οι οποίες πρέπει να ικανοποιούν τις παρακάτω οριακές συνθήκες:

$$\text{Για } r = 0 \quad w = w_m \cos(\theta - \omega) + u_a \cos \omega, \quad u = 0, \quad c = c_m, \quad h = 1,$$

για $r = R$ $w = u_a \cos \omega$, $u = u_R + u_a \sin \omega$, $c = 0$, $\overline{u'c'} = \tau_{r\xi} = 0$,
 $h = h_R = 1 - R \sin \varphi (d\omega/d\xi)$.

Η δυναμική πίεση p_d εισάγεται στις εξισώσεις μέσω του συντελεστή λ_M όπως αναφέρθηκε νωρίτερα. Ολοκληρώνοντας την εξίσωση (2.3), η δυναμική πίεση του τελευταίου όρου του δευτέρου μέλους υπολογίζεται χρησιμοποιώντας το θεώρημα Bernoulli:

$$p_d = \frac{\rho_0}{2} \left\{ (u + u_a \sin \omega)^2 + [w_{d\xi} \cos(\theta - \omega) + u_a \cos \omega]^2 \right\} \quad (2.11)$$

Ολοκληρώνοντας τις εξισώσεις (2.1) έως (2.4) προκύπτει το προς επίλυση σύστημα των συνήθων διαφορικών εξισώσεων (ΣΔΕ):

$$\frac{d\tilde{\mu}}{d\xi} = 2\pi R u_e \quad (2.12)$$

$$\frac{d\tilde{m}}{d\xi} = \zeta \sin \omega + 2 \left[\pi R u_e - \frac{d\tilde{\mu}}{d\xi} + \left(\tilde{\mu} \tan \omega + \frac{\pi}{2} R^2 u_a \sin \omega \right) \frac{d\omega}{d\xi} \right] u_a \cos \omega \quad (2.13)$$

$$\frac{d\omega}{d\xi} = \frac{\zeta \cos \omega - \pi R \left(3u_e + \frac{dR}{d\xi} u_a \cos \omega \right) u_a \sin \omega}{\tilde{m} + \left(2\tilde{\mu} + \pi R^2 \frac{dR}{d\xi} u_e \right) u_a \cos \omega + \frac{\pi}{2} R^2 \left[3u_e^2 + u_a^2 \cos^2 \omega - \frac{9}{4} u_a^2 \sin^2 \omega \right]} \quad (2.14)$$

$$\frac{d}{d\xi} \left(\frac{\tilde{\beta}}{g'_0} + \frac{\zeta}{g'_0} u_a \cos \omega \right) = S_1 \quad (2.15)$$

όπου $\tilde{\mu} = \pi b_w^2 w_m \cos(\theta - \omega)$ είναι η εισροή όγκου, $\tilde{m} = \lambda_M \frac{\pi}{2} b_w^2 w_m^2 \cos^2(\theta - \omega)$ η εισροή ορμής, $\zeta = g'_0 \pi \lambda^2 b_w^2 c_m$ η εισροή ελλείμματος μάζας και

$\tilde{\beta} = \lambda_B \pi \frac{\lambda^2}{1 + \lambda^2} b_w^2 w_m c_m \cos(\theta - \omega)$ η εισροή άνωσης για τη μέση ροή στον άξονα ξ , $u_e = hu$ υπολογίζεται από τις σχέσεις (2.8)-(2.10), λ_M και λ_B είναι συντελεστές που εισάγουν τη συμβολή των τυρβωδών εισροών στις ποσότητες της ορμής και της άνωσης. Ο συντελεστής λ_M είναι σταθερός και λαμβάνει την τιμή 1.10. Οι συντελεστές λ και λ_B υπολογίζονται χρησιμοποιώντας την ακόλουθη ημειπειρική εξίσωση (Yannopoulos and Bloutsos, 2012):

$$\frac{1}{\Phi} = \frac{1}{\Phi_p} - \left(\frac{1}{\Phi_p} - \frac{1}{\Phi_j} \right) \exp(-0.35 \Xi) \quad (2.16)$$

όπου Φ αντιστοιχεί είτε στο συντελεστή λ είτε στο λ_B . Ο δείκτης p δηλώνει πλούμιο και ο j δηλώνει φλέβα χωρίς άνωση (jet), $\lambda_{Bj} = 1.076$, $\lambda_{Bp} = 1.15$, $\lambda_j = 1.23$ και $\lambda_p = 1.04$ (Yannopoulos, 2006). Η εξίσωση (2.16) επιτρέπει τον άμεσο υπολογισμό της ποσότητας Φ μέσω της ανεξάρτητης μεταβλητής $\Xi = (\xi/D) F_0^{-1}$ με ικανοποιητική

ακρίβεια. Η αδιάστατη αξονική υπερέχουσα ταχύτητα είναι $W_d = (w_d / w_{d0})F_0$ και η αδιάστατη συγκέντρωση $C = c_m F_0$. Το σύστημα των συνήθων διαφορικών εξισώσεων συμπληρώνεται με την εξίσωση του ρυθμού διεύρυνσης της φλέβας (2.6). Ο υπολογισμός της γωνίας θ γίνεται γεωμετρικά από το Σχήμα 1, χρησιμοποιώντας την εξίσωση:

$$\theta = \omega + \arcsin\left(\frac{u_a}{w_m} \sin \omega\right). \quad (2.17)$$

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

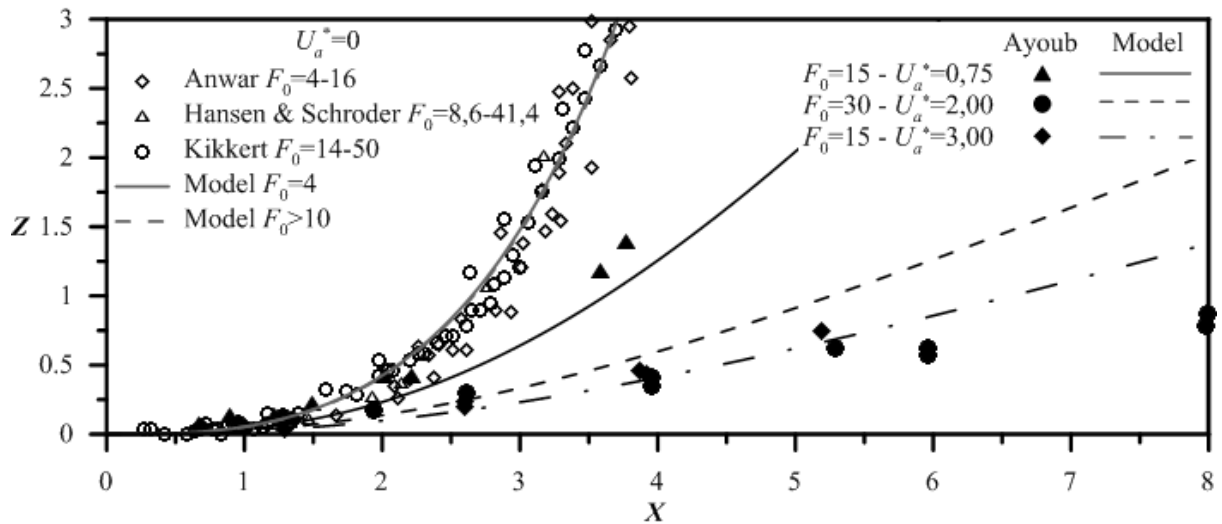
Οι βασικές εξηρημένες μεταβλητές είναι της ποσότητας του όγκου $\tilde{\mu}$, της ποσότητας της ορμής \tilde{m} , της ποσότητας της άνωσης $\tilde{\beta}$ και της γωνίας ω . Το πλήρες σύστημα των εξισώσεων περιλαμβάνει τις βασικές εξισώσεις (2.12) έως (2.15). Όλες οι υπόλοιπες εξισώσεις συνιστούν βοηθητικές σχέσεις για τον προσδιορισμό των υπεισερχομένων παραμέτρων. Η επίλυση των βασικών εξισώσεων πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο Runge-Kutta 4^{ης} τάξεως (Kreyszig, 1998). Ο προγραμματισμός του αλγορίθμου έγινε στο λογισμικό Microsoft Excel. Το βήμα αξονικής απόστασης που χρησιμοποιήθηκε ήταν $\Delta\xi = D/10$. Από τις βασικές εξηρημένες μεταβλητές και με τη χρήση των καταλλήλων βοηθητικών σχέσεων υπολογίστηκαν οι τιμές όλων των υπολοίπων παραμέτρων. Ο υπολογισμός των συντεταγμένων x και z του άξονα της ανωστικής φλέβας υπολογίζεται από τις σχέσεις:

$$x_{i+1} = x_i + \Delta\xi \cos \omega \quad \text{και} \quad z_{i+1} = z_i + \Delta\xi \sin \omega \quad (3.1)$$

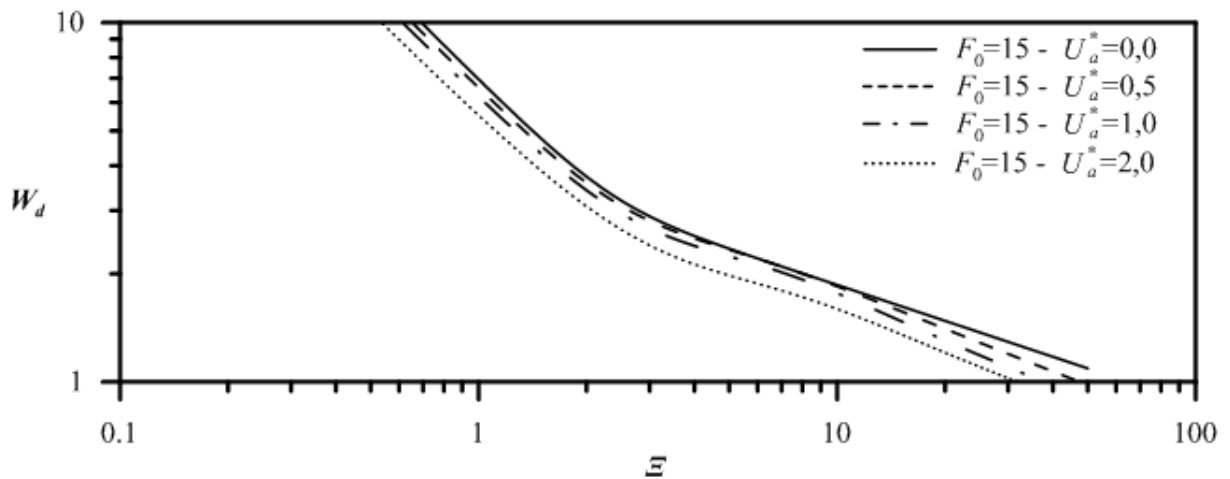
για $i=1$ έως N βήματα και $x_0 = z_0 = 0$. Η προβλεπόμενη τροχιά της φλέβας φαίνεται στο Σχήμα 1 σε σύγκριση με πειραματικά δεδομένα της βιβλιογραφίας (Ayoub, 1971).

Στο διάγραμμα του Σχήματος 2 παρουσιάζονται τρεις διαφορετικές επιλύσεις του προβλήματος σε αδιάστατους άξονες X, Z , όπου $X = (x/D)F_0^{-1}$ και $Z = (z/D)F_0^{-1}$. Παρατηρείται ότι το μοντέλο που προτείνεται προβλέπει αρκετά ικανοποιητικά τις τροχιές, συγκρινόμενο με τα αντίστοιχα πειραματικά σημεία του Ayoub (1971). Στο διάγραμμα του ίδιου Σχήματος παρατίθεται και η περίπτωση του ήρεμου αποδέκτη ($U_a^* = 0$). Η σύμπτωση του μοντέλου, όπως περιγράφεται από τους Yannopoulos & Bloutsos (2012), είναι εξαιρετική συγκρινόμενη τα αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα των Hansen & Schroder (1968), Anwar (1972) και Kikkert (2006).

Τα αποτελέσματα της μεταβολής της ανηγμένης αξονικής ταχύτητας W_d ως προς την αξονική απόσταση X δίδονται στο διάγραμμα του Σχήματος 3. Παρουσιάζονται οι περιπτώσεις για ακίνητο αποδέκτη για τρεις τιμές της μεταβλητής $U_a^* = 0,5, 1,0$ και $2,0$. Στο διάγραμμα του Σχήματος 4 παρουσιάζονται οι ανηγμένες αξονικές αραιώσεις $S=1/C$ συναρτήσεως των αντιστοίχων τεταγμένων. Οι προβλέψεις συγκρίνονται με τις αντίστοιχες τιμές των πειραματικών δεδομένων που αναφέρονται στη διεθνή βιβλιογραφία (Ayoub, 1971).

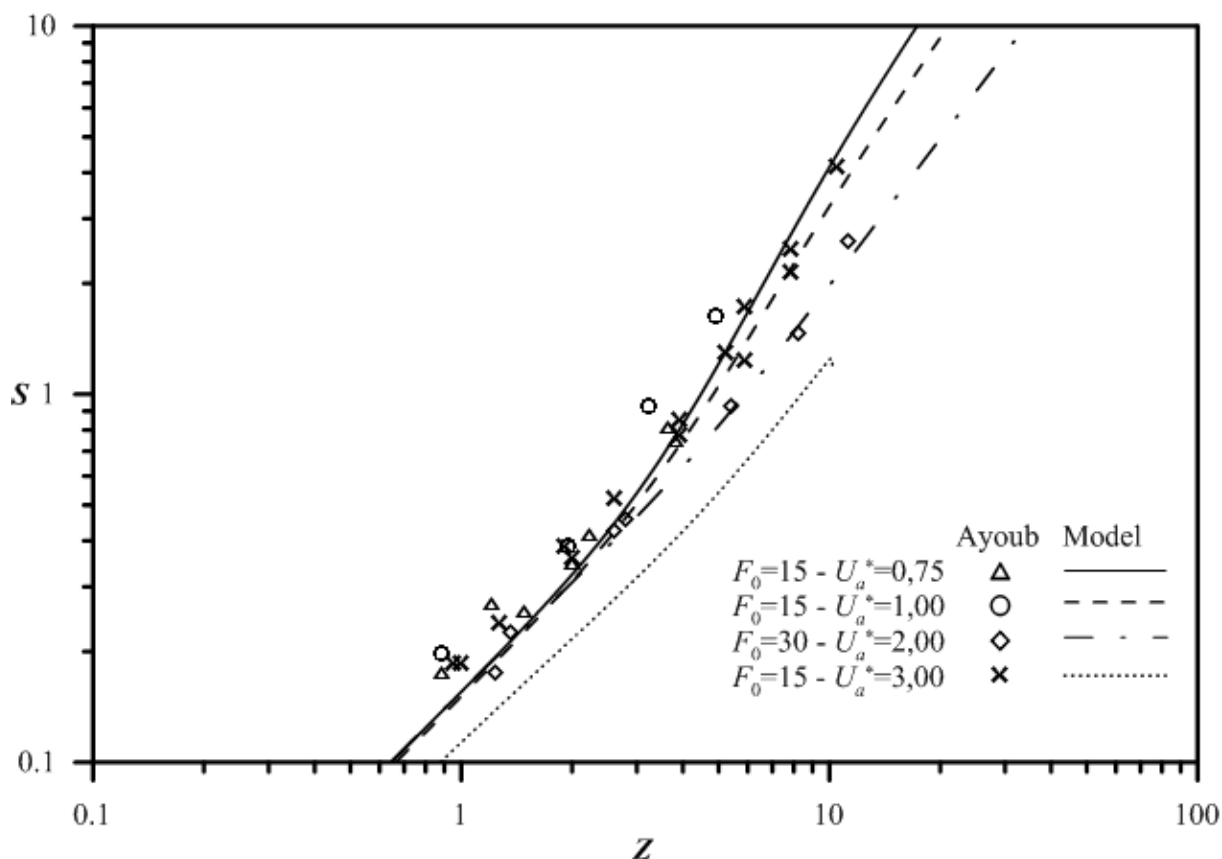


Σχήμα 2: Προσομοίωση τροχιάς οριζόντιας κυκλικής φλέβας με άνωση εντός κινούμενου αποδέκτη και σύγκριση με πειραματικά δεδομένα



Σχήμα 3: Προσομοίωση μεταβολής αξονικής ταχύτητας W_d οριζόντιας κυκλικής φλέβας με άνωση εντός κινούμενου αποδέκτη.

Η σύμπτωση των προβλέψεων του μοντέλου με τα πειραματικά δεδομένα είναι πολύ καλή εκτός της περίπτωσης $F_0 = 15$ και $U_a^* = 3,0$ όπου παρατηρείται εμφανής απόκλιση μεταξύ των σημείων και της αντίστοιχης καμπύλης. Η συγκεκριμένη απόκλιση είναι φανερό ότι οφείλεται είτε σε πειραματικό σφάλμα είτε σε σφάλμα παρουσίασης των αποτελεσμάτων καθώς εύκολα μπορεί να διαπιστωθεί αυτό αν εξεταστούν τα συγκεκριμένα πειραματικά σημεία σε σχέση με εκείνα των υπολοίπων περιπτώσεων.



Σχήμα 4: Προσομοίωση αραίωσης S οριζόντιας κυκλικής φλέβας με άνωση εντός κινούμενου αποδέκτη και σύγκριση με πειραματικά δεδομένα.

4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία προτείνεται ένα ολοκληρωματικό μοντέλο 2ας τάξεως κυκλικής οριζόντιας τυρβώδους ανωστικής φλέβας σε κινούμενο αποδέκτη. Η μαθηματική περιγραφή του φαινομένου γίνεται σε σύστημα καμπυλόγραμμων κυλινδρικών συντεταγμένων. Η ολοκλήρωση των εξισώσεων συνεχείας, ορμής και διατήρησης της μάζας του ιχνηθέτη γίνεται χωρίς την παράλειψη των όρων 2ας τάξεως, εκτός εκείνων του μοριακού ιξώδους. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα παρουσιάζοντας αρκετά καλή συμπεριφορά.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς ευχαριστούν την Επιτροπή Ερευνών του Πανεπιστημίου Πατρών για τη χρηματοδότηση της παρούσα έρευνας με κωδ. C.148 από το Πρόγραμμα «Κ. Καραθεοδωρή 2007-2010».

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Anwar, H. O. 1972. *Measurements on horizontal buoyant jets in calm ambient fluid*. La Houille Blanche, 27: 311-320
- Ayoub, G. M. 1971. *Dispersion of buoyant jets in a flowing ambient fluid*. PhD. Imperial College, London, 904pp.
- Chu, P.C.K., Lee, J.H. and Chu, V.H. 1999. *Spreading of turbulent round jet in coflow*. Journal of Hydraulic Engineering, 125, 2: 193-204.

- Davidson M.J., Gaskin S. and Wood I.R. 2002. *A study of a buoyant axisymmetric jet in a small co-flow*. Journal of Hydraulic Research, 40, 4: 477-489.
- Davidson, M.J. and Wang, H.J. 2002. *Strongly advected jet in coflow* Journal of Hydraulic Engineering, 128, 8: 742-752.
- Doneker, R.L. and Jirka, G.H. 1988-2007. *CORMIX User Manual. A Hydrodynamic Mixing Zone Model and Decision Support System for Pollutant Discharges into Surface Waters*. Technical Report, EPA-823-K-07-001, Project Officer: H. Biswas, Washington.
- Fischer, H. B., List, E. J., Koh, R. C. Y., Imberger, J. and Brooks, N. H. 1979. *Mixing in Inland and Coastal Waters*. Academic Press, New York.
- Jirka, G.H. 2004 *Integral model for turbulent buoyant jets in unbounded stratified flows Part I: Single round jet*. Environmental Fluid Mechanics, 4: 1-56.
- Hansen, J. and Schroder, H. 1968 *Horizontal Jet Dilution Studies by Use of Radioactive Isotopes*. Acta Polytechnica Scandinavica, 49. Danish Academy of Technical Sciences
- Kikkert, G.A. 2006. *Buoyant jets with two and three dimensional trajectories*. Ph.D. Dissertation, University of Canterbury, Christchurch. New Zealand, 353pp.
- Kim, Y.D., I.W. Seo, Kang, S.W. and Oh, B.C. 2002. *Jet integral-particle tracking hybrid model for single buoyant jets*. Journal of Hydraulic Engineering, 128, 8: 753-760.
- Knudsen, M. 1988. *Buoyant horizontal jets in an ambient flow*. PhD. Univ. of Canterbury. Christchurch. New Zealand, 168pp.
- Kreyszig, E. 1998. *Advanced engineering mathematics – 9th Edition*. Willey, 1246pp
- Lee, J.H.W and Jirka, G.H. 1981. *Vertical round buoyant jet in shallow water*. Journal of the Hydraulics Division, 107, 12: 1651-1675.
- Lee, J. and II Won Seo 2000. *Numerical simulation of advected thermal using Gaussian-Vortex model*. Journal of Engineering Mechanics, 126, 10: 1098-1106.
- Lee, J.H.W. and Chu, V.H. 2003. *Turbulent jets and plumes – A Lagrangian approach*. Kluwer Academic Publishers, Boston, 391pp.
- Schatzmann, M. 1979. *An integral model of plume rise*. Atmospheric Environment, 13, 5: 721-731.
- Schnelle, K. B. Jr. and Dey, P. R. 2000. *Atmospheric dispersion modeling compliance guide*. McGraw-Hill, New York, 560pp.
- Wood, I.R., Bell, R.G. and Wilkinson, D.L. 1993. *Ocean disposal of wastewater*. World Scientific, Singapore, 425pp.
- Wright, S.J. 1994. *The effect of ambient turbulence on jet mixing*. In: P.A. Davies and M. J. Valente Neves (Editors), Recent research advances in the fluid mechanics of turbulent jets and plumes. Kluwer Academic. Dordrecht. The Netherlands.
- Yannopoulos, P.C. 2006. *An improved integral model for plane and round turbulent buoyant jets*. Journal of Fluid Mechanics, 547: 267-296.
- Yannopoulos, P. C. and Bloutsos, A.A. 2012. *Escaping mass approach for inclined plane and round buoyant jets*. Journal Fluid Mechanics, 695: 81-111.

ΕΞΑΠΛΩΣΗ ΦΛΕΒΑΣ ΒΑΡΥΤΕΡΗΣ ΤΟΥ ΑΠΟΔΕΚΤΗ ΣΕ ΚΕΚΛΙΜΕΝΟ ΠΥΘΜΕΝΑ

Γ. Χριστοδούλου, Ι. Νικηφοράκης, Η. Παπακωνσταντής

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Ηρώων Πολυτεχνείου 5, Ζωγράφου 15780

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Μελετάται πειραματικά η εξάπλωση σε κεκλιμένο πυθμένα ρευμάτων πυκνότητας που προκύπτουν από την πρόσπτωση φλεβών βαρύτερων από τον αποδέκτη. Ο πυθμένας είχε κλίση 5° και οι φλέβες παροχετεύονταν προς τα πάνω υπό γωνίες 30° , 45° , 60° , καθώς και οριζοντίως (0°) ή κατακορύφως προς κάτω (-90°). Η φλέβα ήταν από χρωματισμένο αλατόνερο και η εξέλιξη του οπτικού ορίου του ρεύματος καταγραφόταν με βιντεοκάμερα. Από την επεξεργασία των δεδομένων προκύπτουν οι σχέσεις που διέπουν τις διαστάσεις του ρεύματος κατά μήκος του πυθμένα και εγκαρσίως συναρτήσει του χρόνου. Οι σχετικοί νόμοι παρουσιάζονται σε αδιάστατη μορφή και διερευνάται η επίδραση του πυκνομετρικού αριθμού Froude και της γωνίας εκτόξευσης. Τέλος, προτείνεται θεωρητική ερμηνεία των αποτελεσμάτων και γίνεται σύγκριση με συναφή στοιχεία σε πυθμένα οριζόντια ή μεγαλύτερης κλίσης.

SPREADING OF A JET DENSER THAN AMBIENT ON AN INCLINED BOTTOM

G. Christodoulou, I. Nikiforakis, I. Papakonstantis

School of Civil Engineering
National Technical University of Athens
5 Heron Polytechniou, Zografou 15780, Greece

ABSTRACT

An experimental study is presented for the spreading on an inclined bottom of the density current arising from the impingement of jets denser than ambient. The bottom slope was 5° and the discharge angles 0° , 30° , 45° , 60° and -90° to the horizontal. The jet consisted of colored saltwater solution and the visual boundary of the current was monitored by a video camera. Data analysis led to experimental relations describing the evolution of the current with time, along and across the slope. The relevant governing laws are presented in dimensionless form and the effect of the densimetric Froude number and the discharge angle is investigated. A theoretical explanation of the observed behavior is proposed and comparison is made to respective findings for a horizontal or a steeper bottom.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διάχυση υγρών φλεβών διαφορετικής πυκνότητας σε υδάτινους αποδέκτες είναι ένα φαινόμενο με σημαντικό θεωρητικό και πρακτικό ενδιαφέρον, καθώς συναντάται σε ποικίλα προβλήματα διάθεσης αποβλήτων στη θάλασσα ή άλλα επιφανειακά ύδατα. Ενώ τα συνήθη οικιακά απόβλητα είναι ελαφρύτερα από τον αποδέκτη, αρκετά άλλα απόβλητα είναι βαρύτερα, όπως π.χ. από εγκαταστάσεις αφαλάτωσης, γεωθερμικά ή μεταλλευτικά πεδία, ορισμένες βιομηχανίες κλπ. Στην περίπτωση αυτή οι φλέβες, ανεξάρτητα από τον τρόπο εισόδου στον αποδέκτη, τελικώς προσπίπτουν στον πυθμένα και δημιουργούν ρεύμα πυκνότητας, δηλαδή στρώμα βαρύτερου υγρού που κινείται σε επαφή με το στερεό όριο. Στο βαθμό που οι διοχετευόμενες φλέβες περιέχουν επιβλαβή στοιχεία, η εξέλιξη του ρεύματος στον πυθμένα συνδέεται με την εκτίμηση ενδεχόμενων περιβαλλοντικών επιπτώσεων στους φυτικούς ή ζωϊκούς βενθικούς οργανισμούς. Ρεύματα πυκνότητας εμφανίζονται εξ άλλου και στη φύση, π.χ. κατά την εισροή ποταμών που είναι ψυχρότεροι ή μεταφέρουν φερτά υλικά σε λίμνες και ταμιευτήρες.

Τα χαρακτηριστικά φλεβών βαρύτερων από τον αποδέκτη έχουν αποτελέσει αντικείμενο σημαντικής ερευνητικής δραστηριότητας κατά τα τελευταία χρόνια (π.χ. Roberts *et al.*, 1997, Cipollina *et al.*, 2005, Papakonstantis *et al.*, 2011(a,b), Kikkert *et al.*, 2007), ωστόσο αυτή περιορίζεται ως επί το πλείστον στις φλέβες καθ' εαυτές, μέχρι την πρόσπτωσή τους στον πυθμένα. Οι Παπακωνσταντής και Χριστοδούλου (2009) και Papakonstantis and Christodoulou (2010) μελέτησαν πειραματικά την εξάπλωση του ρεύματος πυκνότητας που προκύπτει από την επιστροφή φλεβών αρνητικής άνωσης σε οριζόντιο πυθμένα και διαπίστωσαν ότι το ρεύμα αναπτύσσεται σχεδόν κυκλικά, ανεξάρτητα από τη γωνία εκτόξευσης. Τα πειραματικά τους αποτελέσματα είναι παραπλήσια εκείνων για κατακόρυφη φλέβα προσπίπτουσα σε οριζόντιο πυθμένα ή στην ελεύθερη επιφάνεια (Chen, 1980), ή παγιδευόμενη σε ενδιάμεσο ύψος σε στρωματωμένο αποδέκτη (Kotsovinos, 2000). Ωστόσο, σε φυσικούς αποδέκτες, ο πυθμένας συνήθως δεν είναι οριζόντιος και η κλίση αναμένεται να επηρεάζει την ανάπτυξη του ρεύματος. Ρεύματα πυκνότητας μη περιορισμένα πλευρικά σε κεκλιμένο όριο έχουν μελετηθεί, μεταξύ άλλων, από τους Hauenstein and Dracos (1984), Alavian (1986), Tsihrintzis and Alavian (1996). Εν τούτοις στις έρευνες αυτές, το πυκνότερο υγρό διοχετευόταν στον πυθμένα από μικρό κανάλι γνωστών διαστάσεων και παροχής, ενώ στην περίπτωση της φλέβας οι συνθήκες στην αρχή του ρεύματος είναι άγνωστες. Οι Christodoulou *et al.* (2011) παρουσίασαν πειραματικά αποτελέσματα από την πρόσπτωση φλέβας σε πυθμένα με κλίση 10° .

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται αποτελέσματα από 35 πειράματα ρευμάτων πυκνότητας που δημιουργούνται από την πρόσπτωση βαρύτερων φλεβών που εισάγονται σε ακίνητο και ομογενή αποδέκτη και προσπίπτουν σε πυθμένα με κλίση 5° . Τα πειράματα έγιναν για οριζόντιες φλέβες (γωνία 0°), για 3 γωνίες παροχέτευσης προς τα πάνω, δηλ. 30° , 45° και 60° ως προς το οριζόντιο επίπεδο, καθώς και για κατακόρυφες φλέβες παροχέτευόμενες προς τα κάτω (-90°). Απώτερος στόχος αυτής της έρευνας είναι η σύνδεση μεταξύ της φλέβας και του τρισδιάστατου ρεύματος πυκνότητας που αναπτύσσεται στον κεκλιμένο πυθμένα.

2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ

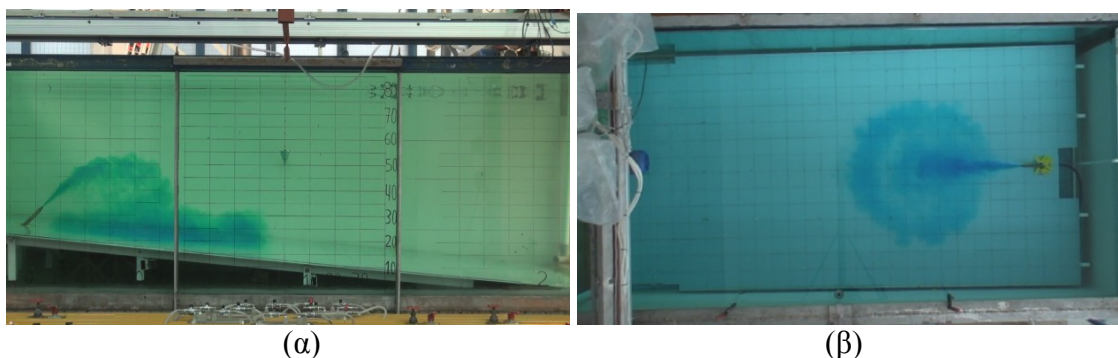
Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε ειδική πειραματική διάταξη στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Υδραυλικής του ΕΜΠ. Η διάταξη περιλαμβάνει δεξαμενή διαστάσεων κάτοψης 3.0 m x 1.5 m και ύψους περίπου 0.9 m, που αποτελείται από δύο συμπαγείς παρειές και δύο διαφανείς που επιτρέπουν την παρατήρηση. Στη δεξαμενή

τοποθετήθηκε πρόσθετος πυθμένας από πλεξιγκλάς με κλίση 5° , όπου χαράχθηκε πλέγμα με τετράγωνα διαστάσεων $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ για τη διευκόλυνση του προσδιορισμού των διαστάσεων του ρεύματος πυκνότητας. Η δεξαμενή ήταν γεμάτη με νερό του δικτύου ύδρευσης, ενώ οι φλέβες ήταν διάλυμα αλατόνευρου που ετοιμαζόταν σε χωριστό δοχείο και χρωματιζόταν με χρωστική μπλε χρώματος. Μέσω μιας ψηφιακής βιντεοκάμερας (Sony DCR-HC90E) που βρισκόταν σε ύψος περίπου 4 m πάνω από τον πυθμένα της δεξαμενής καταγραφόταν η εξέλιξη του ρεύματος πυκνότητας στον πυθμένα, ενώ παράλληλα γινόταν βιντεοσκόπηση (κάμερα Sony HDR-XR550) και της τροχιάς της φλέβας από το πλάι της δεξαμενής ώστε να προσδιοριστεί η θέση πρόσκρουσης της φλέβας στον πυθμένα.

Η υπό γωνία παροχέτευση της φλέβας γινόταν από τον πυθμένα μέσω σωληνίσκου τοποθετημένου σε οπή με ειδικό μηχανισμό που επιτρέπει το σχηματισμό γωνίας με το οριζόντιο επίπεδο, και το στόμιο του σωληνίσκου προεξείχε περίπου 12 cm από τον πυθμένα. Στην περίπτωση της οριζόντιας παροχέτευσης το στόμιο ήταν τοποθετημένο κοντά στο κατακόρυφο τοίχωμα της δεξαμενής και απείχε περίπου 34 cm από τον πυθμένα, ενώ στις κατακόρυφες φλέβες το στόμιο απείχε περίπου 48 cm από τον πυθμένα. Η επεξεργασία των εικόνων του βίντεο έγινε με τη βοήθεια τριών πακέτων λογισμικού, των Windows Movie Maker, Adobe Photoshop and AutoCad. Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται οι κύριες παράμετροι των 35 πειραμάτων, δηλαδή η γωνία παροχέτευσης θ , η διάμετρος του στομίου d , η παροχή εκροής της φλέβας Q_0 , η σχετική διαφορά πυκνότητας $\Delta\rho_0/\rho_0$, ($\Delta\rho_0 = \rho_0 - \rho_a$, όπου ρ_0 η (αρχική) πυκνότητα της φλέβας και ρ_a η πυκνότητα του αποδέκτη) και ο πυκνομετρικός αριθμός Froude, $F_0 = U_0 / (dg\Delta\rho_0/\rho_0)^{1/2}$, όπου U_0 η ταχύτητα εκροής της φλέβας. Όλες οι φλέβες ήταν τυρβώδεις με αρ. Reynolds μεταξύ 3670 και 9367. Στο Σχήμα 1 εικονίζεται η κάτοψη και η πλευρική όψη ενός τυπικού πειράματος.

Πίνακας 1. Αρχικές συνθήκες πειραμάτων

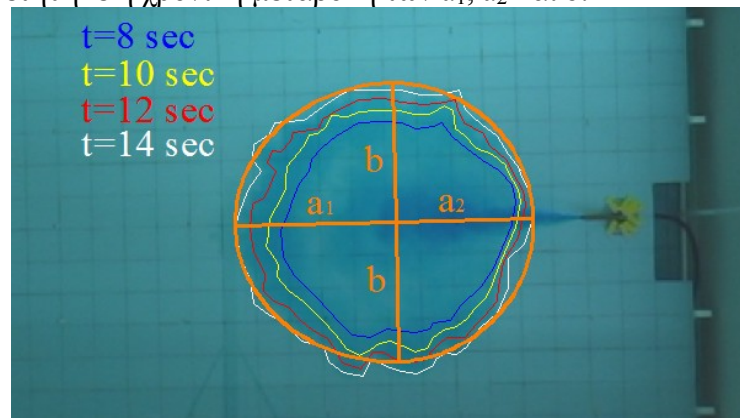
Αριθμός πειραμάτων	θ	d	Q_0	$\Delta\rho_0/\rho_0$	F_0
-	(deg)	(cm)	(cm^3/s)	(%)	-
5	0°	0.6, 0.8	32.41-52.01	2.94	17.24-36.75
7	30°	0.6, 0.8	29.39-55.99	2.11-2.36	13.68-42.08
7	45°	0.6, 0.8	29.25-54.75	2.21-2.43	13.50-39.33
5	60°	0.6, 0.8	27.99-48.65	2.56-2.96	14.97-27.42
11	-90°	0.8, 1.6	27.45-73.09	1.66-3.86	4.25-35.53



Σχήμα 1. Φωτογραφίες ενός τυπικού πειράματος ($\theta=30^\circ$, $F_0 = 17.37$).
(α) πλευρική όψη, (β) κάτοψη.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

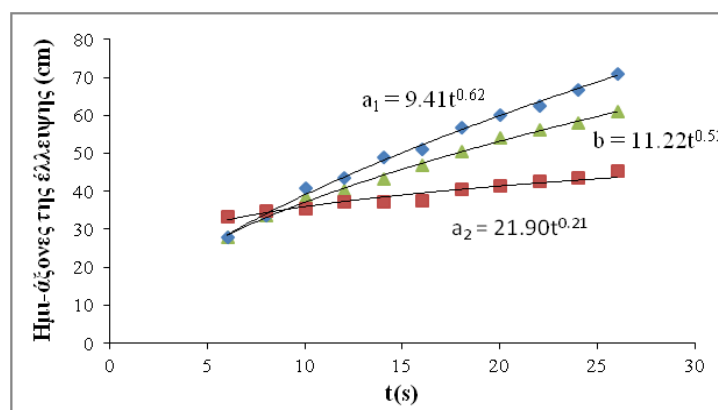
Από την ανάλυση των οπτικών στιγμιότυπων που καταγράφηκαν, προσδιορίστηκε για κάθε πείραμα η χρονική εξέλιξη του ορίου του ρεύματος πυκνότητας. Ως αρχή της μέτρησης του χρόνου ($t=0$) θεωρήθηκε η στιγμή της πρόσπτωσης της φλέβας στον πυθμένα όπως καταγράφηκε από την πλαϊνή κάμερα. Το σημείο πρόσπτωσης προσδιορίστηκε σε κάθε πείραμα από την επεξεργασία πολλαπλών στιγμιότυπων της πλαϊνής όψης (περίπου 20) καλύπτοντας μία χρονική περίοδο 10 s. Από αυτή την επεξεργασία προσδιορίστηκε η μέση εικόνα της φλέβας και του άξονά της (σημεία με το πιο έντονο χρώμα) και επομένως του σημείου πρόσπτωσης ως σημείου της τομής του άξονα της φλέβας με το επίπεδο του πυθμένα. Μετά από αρκετές δοκιμές διαπιστώθηκε πως το σχήμα του ορίου του ρεύματος πυκνότητας κατά το χρονικό διάστημα των πειραματικών παρατηρήσεων μπορεί να προσεγγιστεί μαθηματικά ως συνδυασμός δύο ημι-ελλείψεων των οποίων το κέντρο είναι κοινό όπως χαρακτηριστικά απεικονίζεται στο Σχήμα 2. Ο πλευρικός ημι-άξονας συμβολίζεται ως b και είναι κοινός στις δύο ημι-ελλείψεις ενώ ο κατάντι a_1 είναι εν γένει μεγαλύτερος από τον ανάντι a_2 . Ο ημι-άξονας b προσδιορίστηκε ως ο μέσος όρος των αποστάσεων του πλευρικού ορίου του ρεύματος πυκνότητας εκατέρωθεν του σημείου πρόσπτωσης. Για κάθε πείραμα μελετήθηκε η χρονική μεταβολή των a_1 , a_2 και b .



Σχήμα 2. Χρονική εξέλιξη του οπτικού ορίου του ρεύματος και προσέγγισή του με δύο ημι-ελλείψεις ($\theta = 30^\circ$, $F_0 = 17.37$).

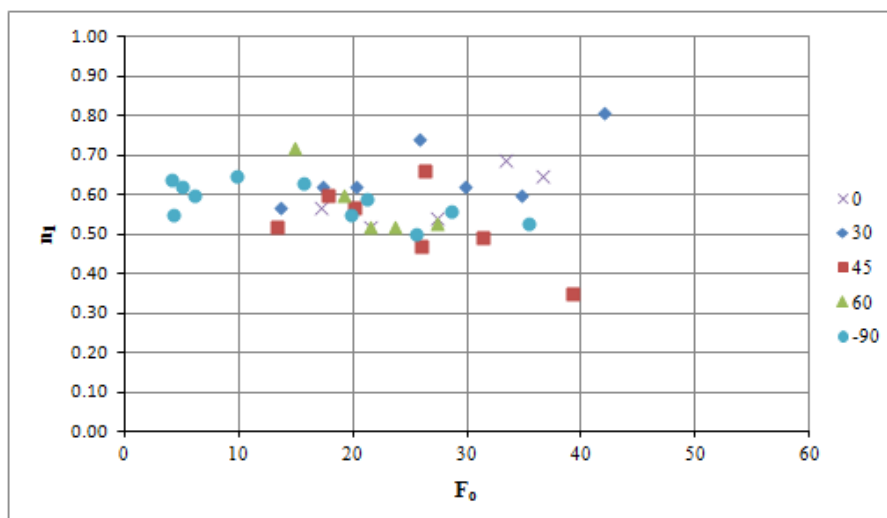
Στο Σχήμα 3 παρουσιάζεται η μεταβολή των ημιαξόνων a_1 , a_2 και b συναρτήσει του χρόνου σε ένα συγκεκριμένο πείραμα και η προσαρμογή σχέσεων της μορφής:

$$a_1 = c_1 t^{n_1} \quad b = c_2 t^{n_2} \quad a_2 = c_3 t^{n_3} \quad (3.1)$$

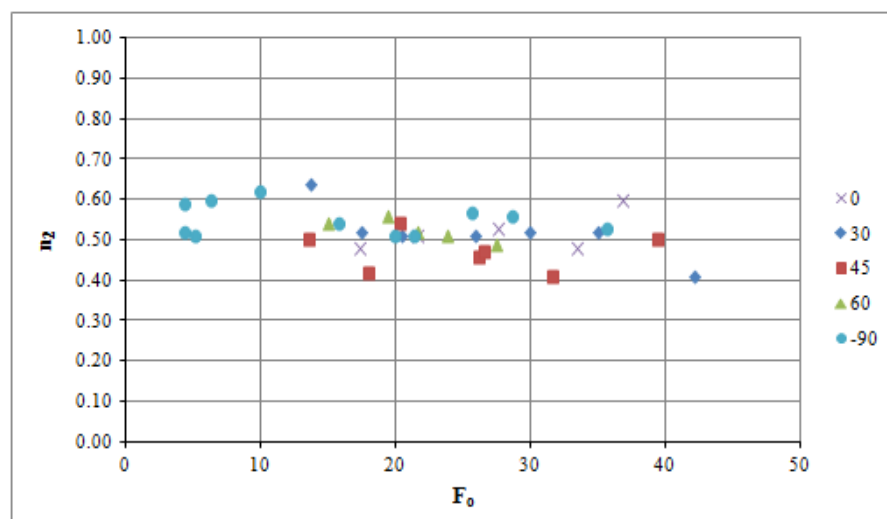


Σχήμα 3. Μεταβολή των διαστάσεων των αξόνων a_1 , a_2 και b των ημι-ελλείψεων συναρτήσει του χρόνου ($\theta=30^\circ$, $F_0 = 17.37$).

Οι εκθέτες n_1 , n_2 και n_3 υπολογίστηκαν για κάθε πείραμα προσαρμόζοντας τις σχέσεις (3.1) στα αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα. Η μεταβολή των n_1 , n_2 συναρτήσει του πυκνομετρικού αριθμού Froude για όλες τις γωνίες φαίνεται στο Σχήμα 4, ενώ στον Πίνακα 2 συνοψίζονται οι μέσες τιμές των n_1 , n_2 για κάθε γωνία. Η συμπεριφορά του n_3 δεν μελετήθηκε περαιτέρω στο πλαίσιο αυτής της εργασίας, δεδομένου ότι η προς τα ανάντη εξάπλωση του ρεύματος είναι αρκετά περίπλοκη, όπως αναλύεται παρακάτω.



(α)



(β)

Σχήμα 4. Μεταβολή με τον αρ. Froude των εκθετών (α) n_1 και (β) n_2 .

Πίνακας 2. Μέσες τιμές των εκθετών n_1 και n_2 για κάθε γωνία παροχέτευσης

θ	n_1	n_2
0°	0.59 ± 0.07	0.52 ± 0.05
30°	0.65 ± 0.09	0.52 ± 0.07
45°	0.52 ± 0.10	0.46 ± 0.05
60°	0.58 ± 0.09	0.52 ± 0.03
-90°	0.58 ± 0.05	0.55 ± 0.04
Μ. Όρος	0.58 ± 0.09	0.51 ± 0.05

4. ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Η εξάπλωση του ρεύματος πυκνότητας που αναπτύσσεται μετά την πρόσπτωση της φλέβας αποτελεί μη μόνιμο φαινόμενο, δεδομένου ότι η γεωμετρία των ορίων του ρεύματος εξελίσσεται συνεχώς συναρτήσει του χρόνου. Επειδή κατά την πρόσπτωση η φλέβα έχει αποκτήσει χαρακτηριστικά πλουμίου, οι κύριες δυνάμεις που αναμένεται να δρουν κατά την εξέλιξη του φαινομένου είναι η βαρύτητα, η αδράνεια, η πίεση (άνωση) και η αντίσταση λόγω τριβών. Ο Kotsovinos (2000), μελετώντας την αξονοσυμμετρική οριζόντια εξάπλωση ρεύματος από παγίδευση κατακόρυφης φλέβας σε διεπιφάνεια, διέκρινε 4 περιοχές, εκ των οποίων οι δύο πρώτες συνδέονται με την ποσότητα κίνησης, η τρίτη προκύπτει από την ισορροπία πίεσης – αδράνειας, και η τελευταία από την ισορροπία πίεσης – αντίστασης τριβών. Οι Papakonstantis and Christodoulou (2010) εξετάζοντας την εξάπλωση του ρεύματος πυκνότητας που σχηματίζεται από την επιστροφή φλέβας αρνητικής άνωσης σε οριζόντιο πυθμένα διαπίστωσαν ότι αυτή είναι κατά προσέγγιση κυκλική και διέπεται από την ισορροπία πίεσης – τριβών. Οι Tsihrintzis and Alavian (1996) διερεύνησαν διεξοδικά την εξάπλωση τριδιάστατου στρωτού ρεύματος πυκνότητας που προκύπτει από τη συνεχή παροχέτευση βαρύτερου υγρού από μικρή ορθογωνική πηγή σε κεκλιμένο πυθμένα. Από την ανάλυσή τους προκύπτει μια πληθώρα περιοχών που διέπονται από την ισορροπία διαφορετικών ζευγών από τις παραπάνω 4 δυνάμεις, εξαρτώμενες από την κλίση, τις αρχικές συνθήκες και τον χρόνο. Σε όλες τις περιπτώσεις διαπιστώνεται ότι η καταληκτική ισορροπία σε κεκλιμένο πυθμένα είναι μεταξύ βαρύτητας και αντίστασης τριβών.

Στην παρούσα περίπτωση, το πρόβλημα είναι ιδιαίτερα σύνθετο, αφού υπεισέρχονται τρεις οριζόντιες κλίμακες μήκους, ενώ και η παροχή διαμοιράζεται άνισα γύρω από το σημείο πρόσπτωσης. Για μια πρώτη ενδεικτική προσέγγιση της τάξης μεγέθους των δυνάμεων που διέπουν τη ροή, λαμβάνεται υπόψη παρακάτω μια χαρακτηριστική διάσταση L στο επίπεδο του πυθμένα και μια h κάθετα προς αυτό, καθώς και το σύνολο της παροχής Q . Τότε, λόγω συνεχείας, θα είναι

$$L^2 h \sim Q \quad (4.1)$$

Η τάξη μεγέθους των δυνάμεων που αναπτύσσονται, εκτιμάται ως εξής:

(α) Δύναμη βαρύτητας

$$F_g \sim O(\Delta\rho g L^2 h \sin\varphi) \sim O(\Delta\rho g Q t \sin\varphi) \quad (4.2)$$

όπου $\Delta\rho$ η διαφορά πυκνότητας ($\rho - \rho_a$) και φ η γωνία κλίσης του πυθμένα.

(β) Δύναμη πίεσης

$$F_p \sim O(\Delta\rho g h^2 L \cos\varphi) \sim O(\Delta\rho g Q^2 t^2 L^{-3} \cos\varphi) \quad (4.3)$$

(γ) Δύναμη αδράνειας

$$F_i \sim O(\rho L^2 h U t^{-1}) \sim O(\rho L Q t^{-1}) \quad (4.4)$$

(δ) Δύναμη αντίστασης (τριβών) πυθμένα, εκφρασμένη μέσω της συνεκτικότητας

$$F_v \sim O(\mu L^3 h^{-1} t^{-1}) \sim O(\mu L^5 Q^{-1} t^{-2}) \quad (4.5)$$

Επομένως, η ισορροπία δυνάμεων βαρύτητας – αντίστασης τριβών συνεπάγεται

$$\Delta\rho g Q t \sin \varphi \sim \nu \rho L^5 Q^{-1} t^{-2} \quad \rightarrow \quad L \sim \left(\frac{g'}{\nu} Q^2 \sin \varphi \right)^{\frac{1}{5}} t^{\frac{3}{5}} \quad (4.6)$$

όπου $\nu = \mu/\rho$ η κινηματική συνεκτικότητα και $g' = g\Delta\rho/\rho$ η φαινόμενη επιτάχυνση της βαρύτητας. Η ισορροπία δυνάμεων πίεσης – αντίστασης οδηγεί στη σχέση

$$\Delta\rho g Q^2 t^2 L^{-3} \cos \varphi \sim \nu \rho L^5 Q^{-1} t^{-2} \quad \rightarrow \quad L \sim \left(\frac{g'}{\nu} Q^3 \cos \varphi \right)^{\frac{1}{8}} t^{\frac{1}{2}} \quad (4.7)$$

ενώ η ισορροπία δυνάμεων πίεσης – αδράνειας συνεπάγεται:

$$\Delta\rho g Q^2 t^2 L^{-3} \cos \varphi \sim \rho L Q t^{-1} \quad \rightarrow \quad L \sim (g' Q \cos \varphi)^{\frac{1}{4}} t^{\frac{3}{4}} \quad (4.8)$$

5. ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4, οι τιμές των εκθετών n_1 , n_2 παραμένουν κατά προσέγγιση σταθερές, ανεξάρτητες από τη γωνία παροχέτευσης της φλέβας και τον πυκνομετρικό αριθμό Froude. Οι πειραματικά παρατηρούμενες τιμές είναι κατά μέσο όρο $n_1 \approx 0.58$ και $n_2 \approx 0.51$. Συγκρίνοντας τις τιμές αυτές με τις θεωρητικές εκτιμήσεις, συνάγεται ότι η χρονική εξέλιξη του ημιάξονα της έλλειψης προς τα κατάντη είναι συμβατή με την ισορροπία βαρύτητας – τριβών, ενώ εκείνη του εγκάρσιου ημιάξονα με την ισορροπία πίεσης – τριβών. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η τιμή του n_2 συμφωνεί με την τιμή 0.5 που έχει παρατηρηθεί στην ακτινική εξάπλωση ρεύματος πυκνότητας από κεκλιμένη φλέβα αρνητικής άνωσης σε οριζόντιο πυθμένα (Parakonstantis and Christodoulou, 2010), καθώς και στο τελευταίο στάδιο ακτινικής εξάπλωσης κατακόρυφης φλέβας σε πυθμένα, ελεύθερη επιφάνεια και διεπιφάνεια (Chen, 1980, Kotsovinos, 2000), και η οποία έχει επίσης ερμηνευθεί ως αποτέλεσμα της ισορροπίας δυνάμεων πίεσης – τριβών (συνεκτικότητας).

Η εμφάνιση μιας μόνο περιοχής ισορροπίας δυνάμεων παρατηρήθηκε και σε αρκετά πειράματα του Kotsovinos (2000). Πάντως σε ορισμένα πειράματα της παρούσας εργασίας οι εκθέτες της μεταβολής των ημιαξόνων φαίνεται να διαφοροποιούνται με την πάροδο του χρόνου από τις μέσες τιμές που προαναφέρθηκαν, πράγμα που μπορεί να υποδηλώνει την παρουσία και άλλων περιοχών ισορροπίας δυνάμεων και απαιτεί περαιτέρω διερεύνηση. Επίσης, η θεώρηση διαφορετικών κλιμάκων για τις οριζόντιες διαστάσεις του ρεύματος πιθανώς να επηρεάζει τους εκθέτες του χρόνου που προκύπτουν θεωρητικά από την ισορροπία δυνάμεων.

Θεωρώντας ότι ισχύουν οι σχέσεις (4.6), (4.7), μπορούμε να ορίσουμε τα αδιάστατα μεγέθη των ημιαξόνων του ρεύματος πυκνότητας ως εξής:

$$\frac{a_1}{\left(\frac{g'}{\nu} Q^2 \sin \varphi \right)^{\frac{1}{5}} t^{\frac{3}{5}}} = C_1 \quad (5.1)$$

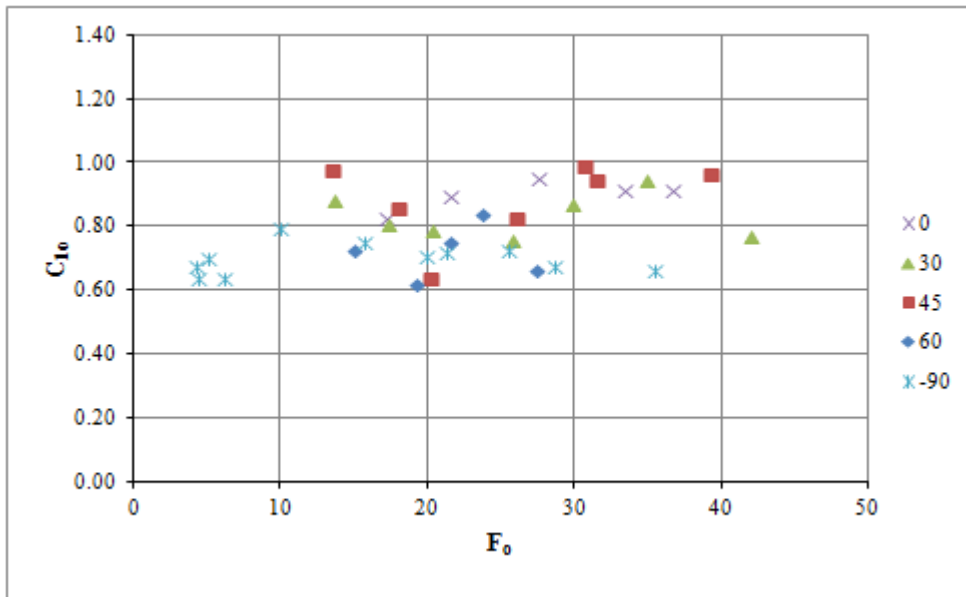
$$\frac{b}{\left(\frac{g'}{\nu} Q^3 \cos \varphi \right)^{\frac{1}{8}} t^{\frac{1}{2}}} = C_2 \quad (5.2)$$

Οι αδιάστατες σταθερές C_1 και C_2 μπορούν να υπολογιστούν είτε με τις τοπικές τιμές (στη θέση πρόσπτωσης) των Q και g' , είτε με τις αρχικές τιμές τους στην πηγή, οπότε διακρίνονται με τον δείκτη o . Στο Σχήμα 5 εικονίζεται η μεταβολή των σταθερών αυτών υπολογισμένων με τις αρχικές τιμές των παραμέτρων για τις διάφορες γωνίες συναρτήσεως του αριθμού Froude. Αντίστοιχα, στο Σχήμα 6 εικονίζεται η μεταβολή των ίδιων σταθερών υπολογισμένων με τις τοπικές παραμέτρους. Οι τελευταίες υπολογίστηκαν με χρήση του μοντέλου CorJet (Jirka, 2004). Ως τιμή του ν ελήφθη η μοριακή κινηματική συνεκτικότητα $\nu=10^{-2}$ cm²/s, όπως συνήθως γίνεται στη βιβλιογραφία (Chen, 1980, Kotsovinos, 2000), νοουμένου ότι η επίδραση της τύρβης (αρ. Reynolds) ενσωματώνεται στην τιμή της σταθεράς.

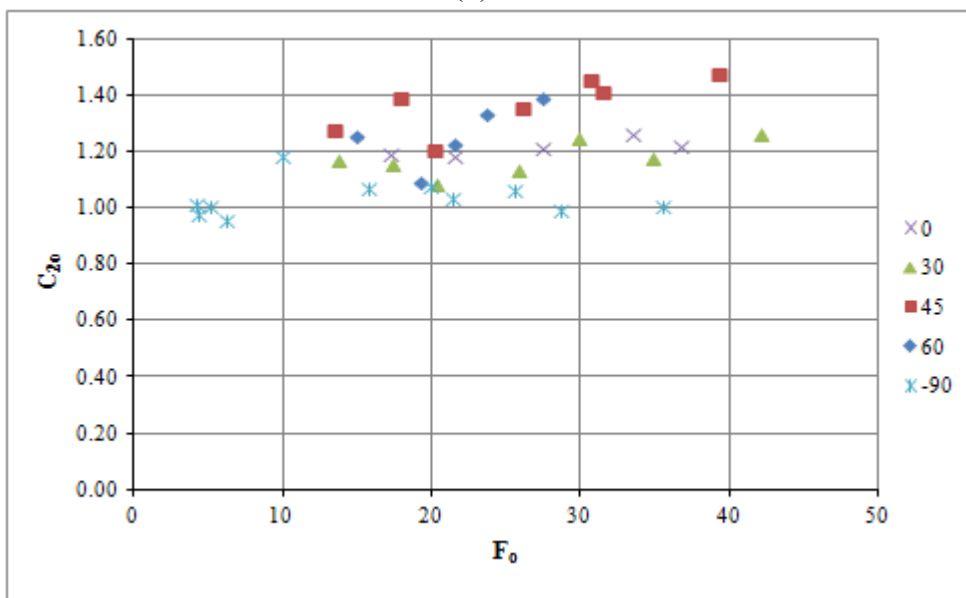
Στον Πίνακα 3 συνοψίζονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών των ανωτέρω σταθερών. Στον ίδιο Πίνακα παρουσιάζονται επίσης για λόγους σύγκρισης και τα αντίστοιχα αποτελέσματα που έχουν προκύψει σε οριζόντιο πυθμένα (Papakonstantis and Christodoulou, 2010) και σε πυθμένα με κλίση 10° (Christodoulou et al., 2011).

Παρατηρείται κατ' αρχήν ότι οι τιμές των C_1 , C_2 διατηρούνται κατά προσέγγιση σταθερές στο εύρος των αριθμών Froude και γωνιών που μελετήθηκαν. Μάλιστα, η διασπορά των τιμών είναι σαφώς μικρότερη όταν υπολογίζονται με τις τοπικές παραμέτρους. Διαπιστώνεται επίσης ότι τα C_1 και C_{10} είναι μικρότερα από τα C_2 και C_{20} , αντίστοιχα. Εξ άλλου, οι τιμές του C_2 και του C_{20} είναι πολύ κοντά στις αντίστοιχες του οριζόντιου πυθμένα, όσο και εκείνου με μεγαλύτερη κλίση. Τούτο φαίνεται να επιβεβαιώνει ότι η πλευρική εξάπλωση διέπεται κατά βάση από την ισορροπία των δυνάμεων πίεσης - τριβής και δεν διαφοροποιείται υπό την επίδραση της κλίσης. Τέλος, οι τιμές των αντίστοιχων αδιάστατων σταθερών για κλίσεις πυθμένα 5° και 10° πρακτικά συμπίπτουν. Τούτο υποδηλώνει την επιτυχή μορφή της (5.1), που ενσωματώνει την κλίση (μέσω του $\sin\phi$).

Η εξάπλωση του ρεύματος προς τα ανάντη επηρεάζεται από την παρουσία του σωληνίσκου παροχέτευσης της φλέβας που παρεμβάλλεται στην πορεία του, καθώς και από την αποκόλληση τμημάτων του βαρύτερου υγρού κοντά στο υψηλότερο σημείο της τροχιάς και πτώση αυτών στον πυθμένα ανάντη του σημείου πρόσπτωσης του άξονα. Σύμφωνα με τις πειραματικές παρατηρήσεις, ο ανάντη ημιάξονας a_2 αυξάνεται με τον χρόνο πολύ βραδύτερα από τους άλλους δύο (βλ. Σχήμα 3). Θα πρέπει να αναμένεται ότι κατά την εξέλιξη του φαινομένου η εξάπλωση προς τα ανάντη θα επιβραδύνεται συνεχώς λόγω της αύξησης των δυνάμεων βαρύτητας και τριβής που είναι αντίθετες προς την κίνηση, μέχρι που τελικά η εξάπλωση θα σταματήσει με την εμφάνιση σημείου στασιμότητας (stagnation point). Από αυτό το χρονικό σημείο και μετά, ουσιαστικά ολόκληρη η παροχή της φλέβας θα κατευθύνεται προς τα κατάντη και το ρεύμα εκτιμάται ότι θα αποκτήσει τελικά μορφή προσομοιάζουσα με εκείνη των ρευμάτων που εισάγονται από στόμιο ορισμένου πλάτους, όπως έχουν μελετηθεί από τους Tsihrintzis and Alavian (1996) και άλλους ερευνητές. Ωστόσο στα παρόντα πειράματα το μέγεθος της συσκευής και άρα η χρονική διάρκεια των πειραμάτων δεν επαρκούσαν για να παρατηρηθεί το σημείο στασιμότητας. Έτσι, θα πρέπει να είναι σαφές ότι τα παρόντα πειραματικά αποτελέσματα και η σχετική ανάλυση αναφέρονται στα πρώτα στάδια της εξάπλωσης του ρεύματος μετά την πρόσπτωση της φλέβας.

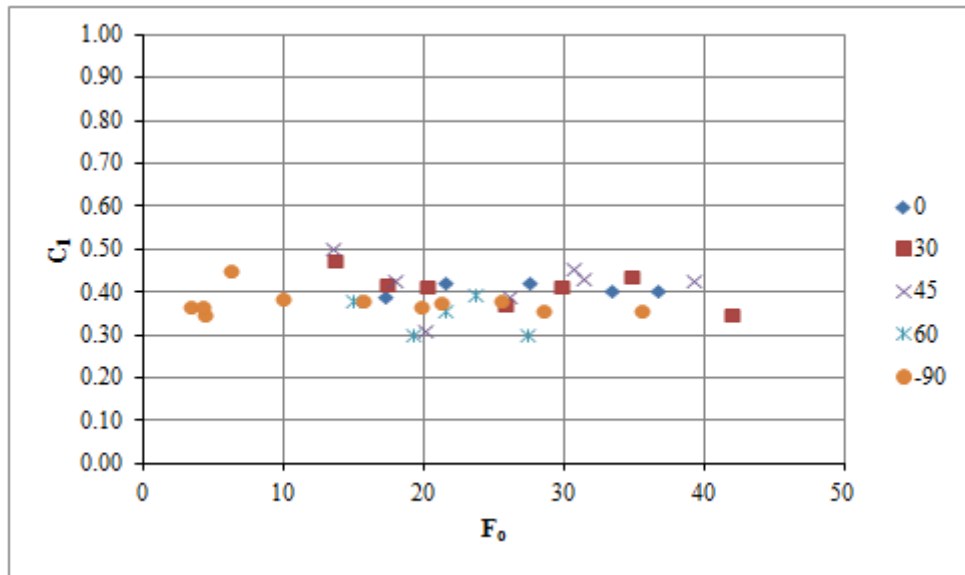


(α)

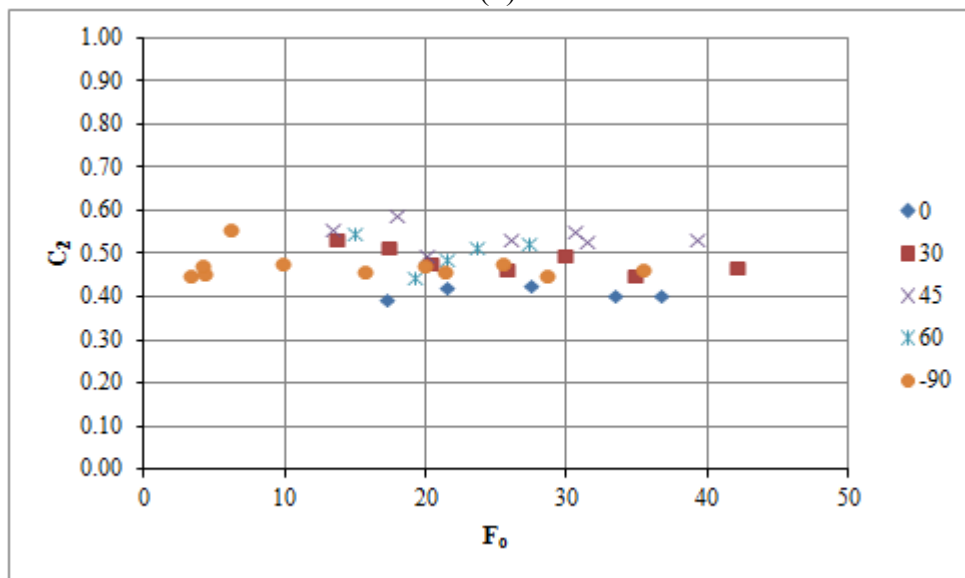


(β)

Σχήμα 5. Μεταβολή με τον αρ. Froude των αδιάστατων μεγεθών του ρεύματος πυκνότητας υπολογισμένων με τις αρχικές παραμέτρους της φλέβας.



(α)



(β)

Σχήμα 6. Μεταβολή με τον αρ. Froude των αδιάστατων μεγεθών του ρεύματος πυκνότητας, υπολογισμένων με τις τοπικές παραμέτρους της φλέβας.

Πίνακας 3. Σύνοψη πειραματικών αποτελεσμάτων

Γωνία θ	Πυθμένας κλίσης 10°				Πυθμένας κλίσης 5°				Πυθμένας οριζόντιος	
	C_{10}	C_{20}	C_1	C_2	C_{10}	C_{20}	C_1	C_2	C_{R0}	C_R
0	0.84	1.05	0.4	0.41	0.90	1.21	0.41	0.45	-	-
30	0.80	1.14	0.40	0.46	0.83	1.18	0.41	0.49	-	-
45	0.77	1.23	0.39	0.51	0.89	1.37	0.42	0.54	$F_0 < 20, 1.16$ $F_0 > 20, 1.38$	0.49
60	0.71	1.33	0.35	0.55	0.72	1.26	0.35	0.50		0.50
-90	-	-	-	-	0.70	1.04	0.38	0.47	1.15	0.48
Μ. Όρος	0.78	1.19	0.38	0.51	0.81	1.21	0.39	0.49	-	0.49

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα κύρια συμπεράσματα της εργασίας αυτής συνοψίζονται ως εξής:

1. Το ρεύμα πυκνότητας που αναπτύσσεται στον κεκλιμένο πυθμένα δεν παρουσιάζει ακτινική συμμετρία. Το περίγραμμά του στα πρώτα στάδια ανάπτυξης μπορεί να προσεγγιστεί από δύο ημι-ελλείψεις με κέντρο το σημείο πρόσπτωσης της φλέβας.
2. Ο εγκάρσιος ημιάξονας αυξάνεται με τον χρόνο με σχέση της μορφής $b \sim t^{0.5}$, που φαίνεται να υποδηλώνει ισορροπία δυνάμεων πίεσης- τριβών και είναι όμοια με εκείνη της ακτινικής εξάπλωσης σε οριζόντιο πυθμένα.
3. Ο προς τα κατάντη ημιάξονας αυξάνεται με σχέση της μορφής $a_1 \sim t^{0.6}$, που φαίνεται να υποδηλώνει ισορροπία των δυνάμεων βαρύτητας και τριβής.
5. Οι προσδιορισθέντες εκθέτες της χρονικής εξέλιξης του ορίου είναι κατά προσέγγιση ανεξάρτητοι από τη γωνία παροχέτευσης και από τον πυκνομετρικό αριθμό Froude, και πρακτικά ταυτίζονται με τους αντίστοιχους εκθέτες για κλίση πυθμένα 10° .
6. Τα αδιαστατοποιημένα μεγέθη των ημιαξόνων είναι επίσης κατά προσέγγιση σταθερά, ανεξάρτητα από τη γωνία και τον αρ. Froude, και οι τιμές τους είναι πολύ κοντά στις αντίστοιχες της κλίσης των 10° και του οριζόντιου πυθμένα.
7. Από τα συμπεράσματα (5) και (6) προκύπτει ότι οι πειραματικές συσχετίσεις που προτείνονται ενσωματώνουν την επίδραση της κλίσης, ενώ τα όσα αφορούν στην εγκάρσια εξάπλωση έχουν εφαρμογή και για οριζόντιο πυθμένα.
8. Σχετικά με την εξάπλωση προς τα ανάντη, απαιτείται περαιτέρω έρευνα σε μεγαλύτερη συσκευή για τον προσδιορισμό της απόστασης και του χρόνου εμφάνισης του σημείου στασιμότητας.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα έρευνα διεξήχθη ως επί το πλείστον στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος βασικής έρευνας ΠΕΒΕ 2009 του ΕΜΠ με τίτλο «Πειραματική διερεύνηση της ανάπτυξης ρεύματος πυκνότητας σε κεκλιμένο πυθμένα από φλέβα αρνητικής άνωσης».

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Alavian, V., 1986. *Behavior of density currents on an incline*. J. Hydraulic Eng. ASCE, 112 (1): 1473-1496.
- Chen, J.C., 1980. *Studies on gravitational spreading currents*. Rep. No. KH-40, PhD thesis, California Institute of Technology, Pasadena, California.
- Christodoulou, G.C., Nikiforakis, I.K. and Papakonstantis, I.G., 2011. *Spreading of a negatively buoyant jet on a sloping bottom*. 6th International Symposium on Stratified Flows, Rome, August 2011.
- Cipollina, A., Brucato, A., Grisafi, F. and Nicosia, S., 2005. *Benchscale investigation of inclined dense jets*. J. Hydraulic Eng. ASCE, 131 (11): 1017-1022.
- Hauenstein, W. and Dracos, Th., 1984. *Investigation of plunging density currents generated by inflows in lakes*. J. Hydraulic Res., 22(3): 157-179
- Jirka, G.H., 2004. *Integral model for turbulent buoyant jets in unbounded stratified flows. Part I: The single round jet*. Environmental Fluid Mech., 4:1-56.
- Kikkert, G.A., Davidson, M.J. and Nokes, R.I., 2007. *Inclined negatively buoyant discharges*. J. Hydraulic Eng. ASCE, 133 (5): 545-554.
- Kotsovinos, N.E., 2000. *Axisymmetric submerged intrusion in stratified fluid*. J. Hydraulic Eng. ASCE, 126 (6): 446-456.

- Papakonstantis, I.G. and Christodoulou, G.C., 2010. *Spreading of round dense jets impinging on a horizontal bottom*. J. Hydro-environment Res., 4:289-300.
- Papakonstantis, I.G., Christodoulou, G.C. and Papanicolaou, P.N., 2011(a). *Inclined negatively buoyant jets 1: geometrical characteristics*. J. Hydraulic Res, 49(1): 3–12.
- Papakonstantis, I.G., Christodoulou, G.C. and Papanicolaou, P.N., 2011(b). *Inclined negatively buoyant jets 2: concentration measurements*. J. Hydraulic Res, 49(1): 13 - 22.
- Roberts, P.J.W., Ferrier, A. and Daviero, G., 1997. *Mixing of inclined dense jets*. J. Hydraulic Eng. ASCE, 123(8): 693 – 699.
- Tsihrintzis, V.A. and Alavian, V., 1996. *Spreading of three-dimensional inclined gravity plumes*. J. Hydraulic Res., 34(5): 695-711.
- Παπακωνσταντής, Η.Γ. και Χριστοδούλου, Γ.Χ., 2009. *Ρεύματα πυκνότητας σε οριζόντιο πυθμένα από φλέβες αρνητικής άνωσης*. Πρακτικά Πανελληνίου Συνεδρίου ΕΥΕ και ΕΕΔΥΠ, Βόλος, Μάιος 2009, 531-538.

ΑΝΑΜΕΙΞΗ ΣΕ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΕΝΟ ΑΠΟΔΕΚΤΗ ΑΠΟ ΤΥΡΒΩΔΗ ΑΝΩΣΤΙΚΗ ΦΛΕΒΑ ΜΕ ΤΕΧΝΙΚΕΣ LASER

Ηλίας Δ. Παππάς¹, Παναγιώτης Ν. Παπανικολάου²

¹Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, Πεδίον Άρεως,
38334 Βόλος, eldipap@hol.gr

²Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Σχολή Πολιτικών
Μηχανικών ΕΜΠ, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 15780 Ζωγράφου,
panospap@mail.ntua.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μετρήσεων που αφορούν στην ανάμειξη κατακόρυφων κυκλικών ανωστικών φλεβών σε ομογενή, περιορισμένο, ακίνητο αποδέκτη. Η ταχύτητα της οριζόντιας διεπιφάνειας, ανάμεσα στο βαρύτερο αναμειγμένο υγρό της φλέβας και στο υπερκείμενο μη αναμειγμένο νερό του δοχείου προσδιορίστηκε σαν συνάρτηση του χρόνου με τομογραφία laser-induced fluorescence (LIF). Μελετήθηκαν φλέβες θετικής άνωσης που ικανοποιούν την παραδοχή Boussinesq, για ολόκληρη την περιοχή αρχικών αριθμών Richardson, από $R_o \rightarrow 0$ (απλές φλέβες) μέχρι περίπου $R_o \approx 0.60$ (πλούμια). Ο προσδιορισμός της θέσης της διεπιφάνειας με χρήση της γενικευμένης εξίσωσης των List & Imberger (1973) έδωσε συγκρίσιμα αποτελέσματα με τα πειράματα για όλο το εύρος των αριθμών Richardson.

MIXING IN CONFINED AMBIENT BY TURBULENT BUOYANT JETS USING LASER TECHNIQUES

Elias D. Pappas¹, Panos N. Papanicolaou²

¹Department of Civil Engineering, University of Thessaly, Pedion Areos,
38334 Volos, eldipap@hol.gr

²Department of Water Resources and Environmental Engineering, School of
Civil Engineering, NTUA, Heroon Polytechniou 9, 15780 Zografou,
panospap@mail.ntua.gr

ABSTRACT

Measurements regarding the mixing of vertical turbulent buoyant jets in a confined reservoir filled with water of uniform density are presented here. The vertical velocity of the horizontal interface between the upper unmixed tank fluid and the lower mixed fluid has been recorded as a function of time, using laser-induced fluorescence (LIF) imaging tomography. We studied positively buoyant jets that satisfied Boussinesq approximation in the full range of initial flow Richardson numbers R_o , from $R_o \rightarrow 0$ (simple, non buoyant jets) to $R_o \approx 0.60$ (plumes). Computation of the elevation of the density interface via modeling where the 'global' theory developed by List & Imberger (1973) has been employed, is found to give results that are congruent with the present experiment measurements.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ανωστικές φλέβες που διαχέονται σε περιορισμένο αποδέκτη εμφανίζονται στη φύση και την καθημερινή ζωή. Τυπικό παράδειγμα είναι η παραμονή της αέριας ρύπανσης σε πόλεις που περιορίζονται από ορεινούς όγκους σε κοιλάδες σε περιόδους νηνεμίας, από τα καυσαέρια αυτοκινήτων, βιομηχανίας και οικιακής θέρμανσης που συσσωρεύονται στην ατμόσφαιρα πάνω από την πόλη χωρίς περιθώρια πλευρικής διάχυσης. Επίσης, η εξάπλωση επεξεργασμένων ή μη αστικών αποβλήτων που διατίθενται σε κλειστές θάλασσες και λίμνες επηρεάζεται από το περιορισμένο μέγεθος του αποδέκτη. Στη βιομηχανία μετάλλου οι αναθυμιάσεις από την επεξεργασία τους σε κλειστό χώρο συσσωρεύονται κάτω από την οροφή των εγκαταστάσεων και θα πρέπει η διεπιφάνεια ανάμεσα στον αέρα που αναπνέουν οι εργαζόμενοι και στις αναθυμιάσεις να βρίσκεται σε απόσταση τουλάχιστον 2.5-3.0 m πάνω από το δάπεδο. Η ψύξη και θέρμανση κλειστών χώρων από πηγές που βρίσκονται κοντά στην οροφή ή το δάπεδο αντίστοιχα, αποτελούν εφαρμογές της διάθεσης και ανάμειξης ανωστικών φλεβών σε περιορισμένο αποδέκτη.

Μεγάλος αριθμός εργασιών έχει πραγματοποιηθεί κατά το παρελθόν για τη μελέτη της συμπεριφοράς ανωστικών φλεβών σε περιορισμένο αποδέκτη. Οι Baines και Turner (1969) οι οποίοι στο εξής θα αναφέρονται ως B&T, υπήρξαν οι πρώτοι που μελέτησαν ένα πλούμιο σε περιορισμένο ομογενή, ακίνητο αποδέκτη, του οποίου η οριζόντια και κατακόρυφη διάσταση ήταν παρόμοιου μεγέθους, θέλοντας να προσομοιώσουν τη θέρμανση ή ψύξη κλειστού χώρου από σημειακές πηγές θερμότητας ή ψύχους. Η διερεύνησή τους ήταν θεωρητική και πειραματική, αφορούσε δε σε κυκλικά και διδιάστατα κατακόρυφα πλούμια. Υλοποίησαν πειράματα για μια ευρεία περιοχή του λόγου H/R (βάθος αποδέκτη H και οριζόντια διάσταση R) και προσδιόρισαν αφ' ενός τη θέση του αρχικού μετώπου (διεπιφάνειας) με τη θεωρία των πλουμίων (Morton et al. 1956) και αφ' ετέρου το αδιάστατο προφίλ της κατανομής πυκνότητας στην περιοχή με το αναμειγμένο ρευστό.

Οι Hunt, Cooper και Linden (2001) περιέγραψαν με λεπτομέρεια το φαινόμενο της ανατροπής και εγκλωβισμού περιβάλλοντος υγρού κοντά στα κατακόρυφα τοιχώματα όταν η ανωστική φλέβα αρχικά φθάσει το οριζόντιο όριο του αποδέκτη. Παρατήρησαν ότι δεν υφίσταται ανατροπή όταν ο λόγος της χαρακτηριστικής κλίμακας προς το ενεργό (πάνω από το στόμιο της φλέβας) βάθος του δοχείου $l_M/H \ll 1$ και το αντίθετο όταν $l_M/H > 1$. Επίσης μελέτησαν τη στρωμάτωση που δημιουργείται από μια καθαρά ανωστική πηγή (πλούμιο) όταν κάποια άλλη πηγή λειτουργεί συγχρόνως. Οι Auban, Lemoine, Vallete, & Fontaine (2001) μελέτησαν πειραματικά τη στρωμάτωση που δημιουργείται από ένα πλούμιο στη βάση ενός κλειστού χώρου, όπως επίσης και τον προσδιορισμό του ύψους και του πάχους της διεπιφάνειας που δημιουργείται. Οι Caulfield and Woods (2002) μελέτησαν θεωρητικά μια απλή φλέβα (jet) σε περιορισμένο αποδέκτη, περίπτωση που προσομοιώνει την καθολική ανάμειξη του περιορισμένου αποδέκτη όπου οι αρχικές πυκνομετρικές διαφορές έχουν εξομαλυνθεί σημαντικά. Για να πετύχουν μια προσεγγιστική λύση κλειστής μορφής, υπέθεσαν ότι η φλέβα συμπεριφέρεται ως απλή (jet-like) σε ολόκληρο το βάθος, δηλαδή ότι η παροχή μάζας σε κάθε διατομή της φλέβας ήταν γραμμική συνάρτηση της απόστασης από την πηγή. Έρευνες που αναλύουν την μείξη σε περιορισμένο χώρο από πολλαπλές ανωστικές φλέβες, όταν υπάρχει 'αερισμός' δηλαδή ανταλλαγή μάζας του δοχείου από εξωτερική πηγή ή όχι, συνοψίζονται στο άρθρο επισκόπησης του Linden (1999).

Ο Germeles (1975) υπολόγισε αριθμητικά την ταχύτητα της διεπιφάνειας ανάμεσα στην περιοχή ανάμειξης και την περιοχή ομοιόμορφης πυκνότητας, καθώς επίσης και την κατανομή της πυκνότητας στη στρωματωμένη περιοχή για φλέβα θετικής άνωσης υπό γωνία σε σχέση με την κατακόρυφο, μεταβάλλοντας εμπειρικά το

συντελεστή συμπαράσυρσης από 0.057 (jets) μέχρι 0.082 (πλούμια), ώστε οι προγνώσεις να προσεγγίζουν υφιστάμενες μετρήσεις. Ο Mannins (1978) επέκτεινε τη θεωρία των B&T και για δεξαμενές των οποίων η οριζόντια διάσταση είναι σαφώς μεγαλύτερη από το βάθος της δεξαμενής διάχυσης. Οι Worster & Huppert (1983) χρησιμοποίησαν σταθερό συντελεστή συμπαράσυρσης (entrainment coefficient) και ίδιο πλάτος για τις κατανομές της ταχύτητας και πυκνομετρικής διαφοράς για να βελτιώσουν τις ασυμπτωτικές λύσεις των B&T. Επίσης υπέθεσαν ότι ο ρυθμός μεταβολής της διαφοράς πυκνότητας στην περιοχή ανάμειξης είναι ανεξάρτητος της απόστασης από τη διεπιφάνεια, ή την πηγή της φλέβας και κατέληξαν σε μια ασυμπτωτική λύση

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε κατακόρυφη κυκλική φλέβα βαρύτερη από το ρευστό του δοχείου, που εκτοξεύεται από το κέντρο του άνω ορίου ορθογωνικού δοχείου με κατεύθυνση προς τα κάτω (θετικής άνωσης). Σκοπός είναι κυρίως ο προσδιορισμός της ταχύτητας ανόδου της διεπιφάνειας ανάμεσα στην κατώτερη περιοχή ανάμειξης και την ανώτερη περιοχή του ομογενούς ρευστού του δοχείου, πειραματικά και υπολογιστικά, για απλές φλέβες (jets), πλούμια και ανωστικές φλέβες, δηλαδή σε ολόκληρο το εύρος αρχικών αριθμών Richardson της φλέβας.

2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

2.1 ΤΥΡΒΩΔΗΣ ΑΝΩΣΤΙΚΗ ΦΛΕΒΑ

Θεωρούμε κυκλική ανωστική κατακόρυφη φλέβα (jet) διαμέτρου D και πυκνότητας ρ_o που εκβάλλει μέσα σε ήρεμο ομογενή αποδέκτη με πυκνότητα ρ_a ($\rho_o > \rho_a$) όπως φαίνεται στο σχήμα 1. Η αρχική ογκομετρική παροχή της φλέβας Q , η ειδική, ανά μονάδα μάζας του ρέοντος ρευστού, ορμή M (specific momentum flux) και η ειδική άνωση B (specific buoyancy flux) εκφράζονται από τις σχέσεις

$$Q = \frac{\pi D^2}{4} W, \quad M = QW, \quad B = \frac{\rho_a - \rho_o}{\rho_o} gQ \quad (2.1)$$

αντίστοιχα, όπου W είναι η αρχική μέση ταχύτητα εξόδου της φλέβας στο ακροφύσιο. Ορίζουμε σαν απλή φλέβα (jet) αυτή για την οποία αρχικά $B \rightarrow 0$, σαν πλούμιο τη φλέβα για την οποία αρχικά $M \rightarrow 0$ και σαν ανωστική φλέβα αυτή που αρχικά έχει σημαντικό μέγεθος ειδική ορμή και άνωση ($M \neq 0$ και $B \neq 0$). Σε μια ανωστική φλέβα (με αρχικά χαρακτηριστικά Q , M , B) οι Fischer *et al.* (1979) προτείνουν τις κλίμακες μήκους l_Q από την παροχή Q και ειδική ορμή M και l_M , που εμπεριέχει εκτός από τα αδρανειακά και τα ανωστικά χαρακτηριστικά της φλέβας

$$l_Q = \frac{Q}{\sqrt{M}} \quad \text{και} \quad l_M = \frac{M^{3/4}}{B^{1/2}} \quad (2.2)$$

Ο λόγος των δύο κλιμάκων μήκους είναι ο αρχικός αριθμός Richardson της φλέβας

$$R_o = \frac{l_Q}{l_M} = \frac{QB^{1/2}}{M^{5/4}} \quad (2.3)$$

Σε απόσταση z αρκετών διαμέτρων από το ακροφύσιο-πηγή όπου η φλέβα έχει αναπτυχθεί πλήρως, η ογκομετρική παροχή $\mu(z)$ (δηλαδή ο όγκος του ρευστού στη μονάδα χρόνου), η ειδική ορμή ρευστού $m(z)$ και η ειδική άνωση ρευστού $\beta(z)$ που

διέρχονται από μία διατομή A υπολογίζονται από τις κατανομές της μέσης ταχύτητας $w=w(r,z)$ και της (μέσης) διαφοράς πυκνότητας $\Delta\rho=\Delta\rho(r,z)$ με τα ολοκληρώματα

$$\mu = \int_A w dA, \quad m = \int_A w^2 dA \quad \text{και} \quad \beta = \int_A g(\Delta\rho/\rho_o) w dA \quad (2.4)$$

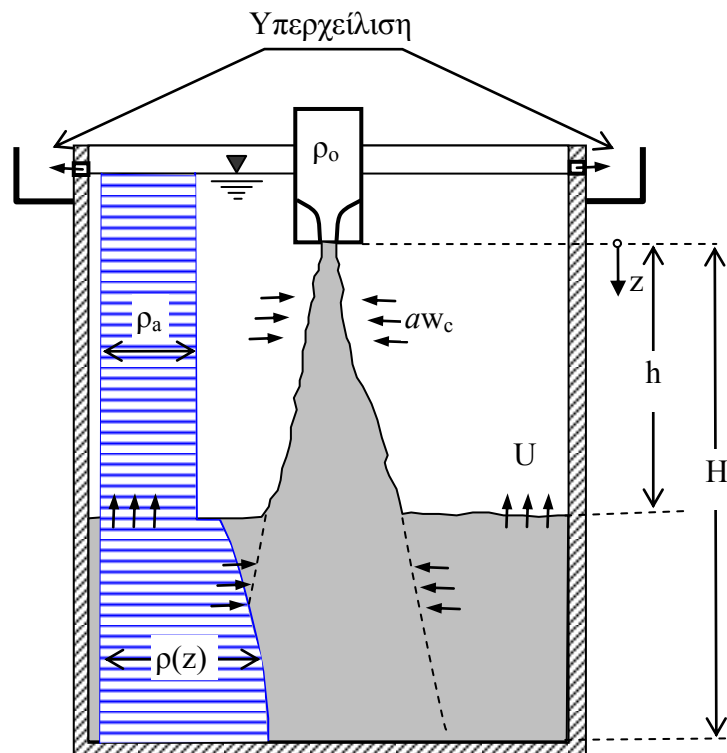
όπου g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας. Ο δε τοπικός αριθμός Richardson της ροής $R(z)$ σε απόσταση z από το ακροφύσιο προκύπτει από τη σχέση

$$R(z) = \frac{\mu\beta^{1/2}}{m^{5/4}}. \quad (2.5)$$

2.2 ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΑΝΑΜΕΙΞΗΣ

Στην περίπτωση διάχυσης της φλέβας σε περιορισμένο αποδέκτη κάνουμε τις εξής παραδοχές: (i) Το ενεργό βάθος του δοχείου H , δηλαδή η απόσταση από το ακροφύσιο ως τον πυθμένα, είναι παρόμοιο με την οριζόντια διάσταση του δοχείου, (ii) τα υγρά της φλέβας και του δοχείου είναι αναμείξιμα, οι δε πυκνομετρικές διαφορές $\Delta\rho/\rho_o$ που εμφανίζονται δεν ξεπερνούν το 5% (παραδοχή Boussinesq) και (iii) το βάθος του δοχείου H είναι τάξης μεγέθους l_m όταν πρόκειται για απλή αρχικά φλέβα.

Το πεδίο ροής είναι συνάρτηση του χρόνου που μετρά από τη στιγμή t_o ($t=0$) που η φλέβα φθάνει στον πυθμένα και διαχέεται οριζόντια σαν ρεύμα πυκνότητας, ώσπου το βαρύτερο ρευστό να αγγίξει τα κατακόρυφα τοιχώματα του δοχείου. Από τη στιγμή αυτή μετρά ο χρόνος ($t>0$) που η 'οριζόντια' διεπιφάνεια που αναπτύσσεται ανάμεσα στο ομοιόμορφο πυκνομετρικά ρευστό του δοχείου και το αναμειγμένο βαρύτερο ρευστό, κινείται ανοδικά με κατεύθυνση προς το ακροφύσιο (σχήμα 1).



Σχήμα 1. Διάχυση κατακόρυφης ανωστικής φλέβας σε περιορισμένο αποδέκτη.

Καθώς το αναμειγμένο βαρύτερο νερό κινείται προς τον πυθμένα μέσα από τη διεπιφάνεια την μετακινεί ανοδικά, ενώ το κατώτερο αναμειγμένο ρευστό εμφανίζει πυκνομετρική στρωμάτωση. Στην περιοχή του ομογενούς περιβάλλοντος ρευστού $0 < z < h$, όπου h είναι η απόσταση της διεπιφάνειας από το ακροφύσιο, η ανωστική φλέβα αναμειγνύεται με το ρευστό του αποδέκτη όπως μια φλέβα που διαχέεται σε ομογενή ακίνητο αποδέκτη. Αφού διασχίσει τη διεπιφάνεια ($h < z < H$), συμπεριφέρεται σαν ανωστική φλέβα σε πυκνομετρικά στρωματωμένο αποδέκτη του οποίου η χωρική κατανομή πυκνότητας είναι συνάρτηση του χρόνου. Η διεπιφάνεια συνεχίζει να ανέρχεται προς το ακροφύσιο με συνεχώς ελατούμενη ταχύτητα, δεδομένου ότι η παροχή της φλέβας μειώνεται καθώς μειώνεται η απόσταση από το ακροφύσιο, μέχρι τη ζώνη εγκατάστασης της ροής περίπου 5 διαμέτρους μακρυνά όπου γίνεται η μετάβαση σε τύρβη. Στην περιοχή $0 < z < 5D$ δεν υφίσταται πρακτικά ανάμειξη ανάμεσα στο ρευστό της φλέβας. Εκτός από το σώμα της φλέβας ανάμειξη εμφανίζεται και στη πυκνομετρικά στρωματωμένη περιοχή όπου η φλέβα παραμένει θετικά ανωστική σε όλο το ύψος. Η κατακόρυφη ταχύτητα της διεπιφάνειας $U(h)$ είναι συνάρτηση του ρυθμού ανάμειξης της φλέβας με το περιβάλλον ρευστό στην περιοχή $0 < z < h$, δηλαδή της τοπικής ογκομετρικής παροχής της φλέβας $\mu(h)$, επομένως

$$-AU(h) = \mu(h) \Leftrightarrow -A \left. \frac{dz}{dt} \right|_{z=h} = \mu(h), \quad (2.6)$$

όπου A είναι το εμβαδόν της οριζόντιας διατομής του δοχείου διάχυσης. Έτσι ο προσδιορισμός της ταχύτητας της διεπιφάνειας σε απόσταση $z=h$ συνδέεται άμεσα με την ογκομετρική παροχή της φλέβας $\mu(h)$.

Σε απλή φλέβα ($B \approx 0$ ή $R_o \rightarrow 0$) που προέρχεται από σημειακή πηγή, προκύπτει ότι η παροχή όγκου $\mu(z)$ αυξάνεται γραμμικά με την απόσταση z από την πηγή (Papanicolaou, 1984, Caulfield & Woods, 2002)

$$\mu(z) = 2\sqrt{2\pi} a_i M^{1/2} z, \quad (2.7)$$

όπου a_i είναι ο συντελεστής συμπαράσυρσης απλής φλέβας, ενώ σε ένα πλούμιο προκύπτει από τη σχέση (Morton *et al.* 1956, B&T)

$$\mu(z) = \pi b^2 w_c = \frac{6}{5} \pi a_p \left(\frac{9(1+\lambda^2)}{5\pi} a_p B \right)^{1/3} z^{5/3} \quad (2.8)$$

όπου a_p είναι ο συντελεστής συμπαράσυρσης του πλουμίου. Σε ανωστικές φλέβες η ειδική (ογκομετρική) παροχή υπολογίζεται με βάση την γενικευμένη θεωρία των List & Imberger (1973) από τη σχέση (Παπανικολάου 2009)

$$\frac{\mu}{Q} = \frac{z}{z_o} \left\{ 1 + \left(\frac{R_o}{R_p} \right)^2 \left[\left(\frac{z}{z_o} \right)^2 - 1 \right] \right\}^{1/3}. \quad (2.9)$$

όπου $R_p = 0.63$ είναι ο ασυμπτωτικός αριθμός Richardson του πλουμίου, $z_o = Q / (C_p \sqrt{M})$ η απόσταση του νοητού κέντρου της φλέβας από το ακροφύσιο και $C_p = \mu / (z \sqrt{m})$ η παράμετρος πλάτους ίση με 0.27, τιμή που προέκυψε από τις μετρήσεις των Papanicolaou & List (1988).

Τρεις διαφορετικές κλίμακες της ροής μπορούν να οριστούν με βάση χαρακτηριστικές παραμέτρους της. Ο χρόνος που απαιτείται ώστε η διεπιφάνεια να φθάσει σε απόσταση h από το ακροφύσιο στην περίπτωση απλής φλέβας ή πλούμιου, μπορεί να υπολογιστεί με ολοκλήρωση της εξίσωσης (2.6) και χρήση των εξισώσεων (2.7) και (2.8) αντίστοιχα (B&T, Caulfield & Woods, 2002). Σε απλή φλέβα προκύπτει

$$\int_0^t dt = t = \frac{A}{2\sqrt{2\pi}\alpha_j M^{1/2}} \ln\left(\frac{H}{h}\right) = T_j \ln\left(\frac{H}{h}\right) \quad (2.10)$$

ενώ σε πλούμιο

$$\int_0^t dt = t = A \frac{5}{4\pi\alpha_p} \left(\frac{5\pi}{9(1+\lambda^2)\alpha_p}\right)^{1/3} B^{-1/3} H^{-2/3} \left[\left(\frac{H}{h}\right)^{2/3} - 1\right] = T_p \left[\left(\frac{H}{h}\right)^{2/3} - 1\right]. \quad (2.11)$$

Οι χρονικές κλίμακες T_j και T_p ορίζονται ως (Caulfield & Woods 2002, B&T)

$$T_j = \frac{A}{2\sqrt{2\pi}\alpha_j M^{1/2}} \quad \text{και} \quad T_p = A \frac{5}{4\pi\alpha_p} \left(\frac{5\pi}{9(1+\lambda^2)\alpha_p}\right)^{1/3} B^{-1/3} H^{-2/3} \quad (2.12)$$

και ισοδυναμούν με το χρόνο που απαιτείται ώστε μια απλή φλέβα ή ένα πλούμιο να πληρώσουν τον όγκο του δοχείου AH όταν η παροχή τους είναι $\mu(H)$. Οι αντίστοιχες χρονοκλίμακες μιας απλής φλέβας και ενός πλούμιου που προκύπτουν από τη γενικευμένη θεωρία των List & Imberger (1973) γράφονται ως

$$T_j(LI) = \frac{A}{C_p M^{1/2}} \quad \text{και} \quad T_p(LI) = \frac{3}{2} A \frac{R_p^{2/3}}{C_p^{5/3}} B^{-1/3} H^{-2/3} \quad (2.13)$$

Σε ανωστική φλέβα όπου ο αρχικός αριθμός Richardson $R_o < R_b$, η αρχική ειδική ορμή M και ανωστική δύναμη B συμμετέχουν από κοινού στην ανάπτυξή της, ορίζοντας μια χρονική κλίμακα $T=M/B$.

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Τα πειράματα υλοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Υδρομηχανικής και Περιβαλλοντικής Τεχνικής του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Η πειραματική συσκευή αποτελείται από διαφανή δεξαμενή κατασκευασμένη από Plexiglas, εσωτερικών διαστάσεων 40 cm × 40 cm και βάθους 60 cm. Στα 57.2 cm από τον πυθμένα υπάρχει περιμετρικός υπερχειλιστής, από όπου το πλεονάζον νερό οδηγείται στην αποχέτευση. Η δεξαμενή είναι τοποθετημένη σε υπερυψωμένη, ειδικά διαμορφωμένη βάση. Στην πρόσθια και στην απέναντι διαφανή πλευρά έχει σχεδιαστεί κάναβος με κατακόρυφη και οριζόντια ισοδιάσταση 5cm. Το ακροφύσιο απέχει $H = 52$ cm από τον πυθμένα της δεξαμενής.

Η διάταξη δημιουργίας της φλέβας (jet plenum) αποτελείται από σωλήνα PVC εσωτερικής διαμέτρου 4 cm, στα άκρα του οποίου έχει προσαρμοστεί ορειχάλκινο τεμάχιο εισόδου του νερού της φλέβας και ορειχάλκινο τεμάχιο με σπείρωμα για την εφαρμογή των ακροφυσίων. Γύρω από το σωλήνα PVC έχει τοποθετηθεί δακτύλιος ο οποίος εφαρμόζει πάνω στην ξύλινη βάση και τον συγκρατεί στο επιθυμητό ύψος,

επιτρέποντας την κατακόρυφη μετακίνησή του. Στο εσωτερικό του σωλήνα PVC τοποθετήθηκε σπόγγος πάχους 2cm και κυψελίδες (Honeycomb) πάχους 5cm για καταστροφή των μεγάλων τυρβωδών δινών μέσα στη συσκευή δημιουργίας της φλέβας. Το τμήμα εισόδου του νερού συνδέεται με εύκαμπτο διαφανή σωλήνα διαμέτρου Φ10 με δοχείο σταθερής στάθμης. Στο τεμάχιο εξόδου προσαρμόζονταν τα κυκλικά ακροφύσια διαμέτρων 0.50 cm, 0.75 cm, 1 cm και 1.50 cm από τα οποία γίνονταν η εκροή της φλέβας. Η παροχή της φλέβας ρυθμιζόταν με παροχόμετρο τύπου πλωτήρα ακρίβειας $\pm 2\%$ και βάνα με βερνιέρο.

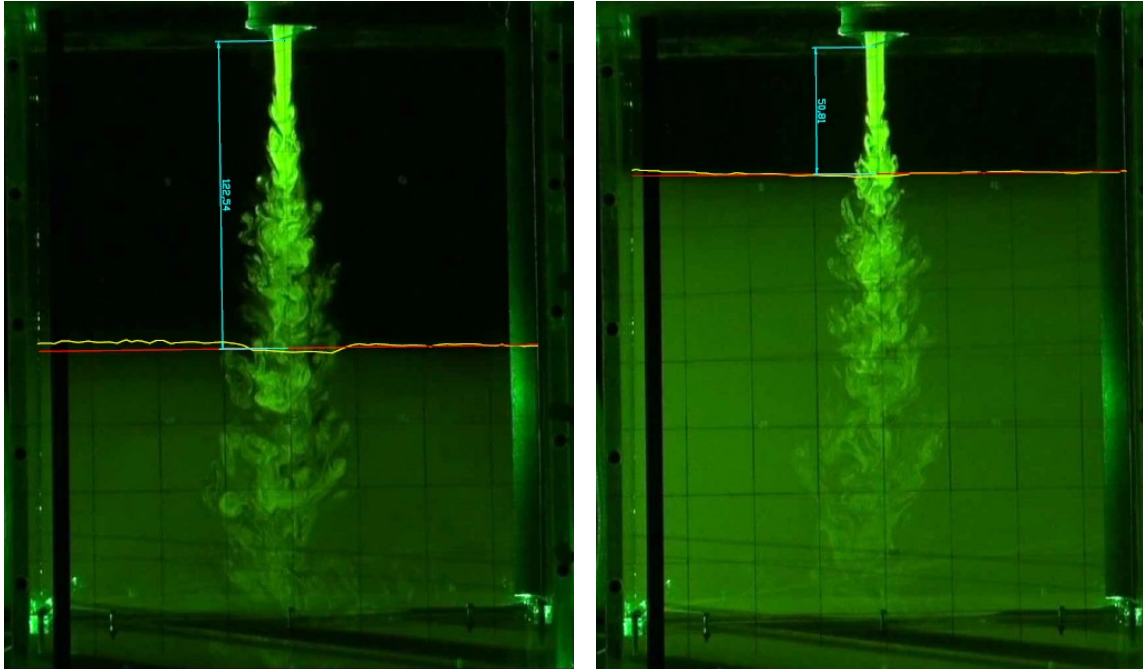
Τα πειράματα οπτικοποιήθηκαν με την τεχνική τομογραφίας με laser (laser induced fluorescence, LIF). Το υγρό της φλέβας ήταν αλατόνερο στην επιθυμητή πυκνότητα που περιείχε ροδαμίνη 6G, η οποία όταν διεγείρεται από μονοχρωματική ακτινοβολία (laser) μήκους κύματος 532 nm (πράσινο), ακτινοβολεί (dye-laser, fluorescence) στη συχνότητα των 565 nm (κίτρινο). Η ένταση ακτινοβολίας είναι “ανάλογη” της ισχύος της ακτίνας laser και της συγκέντρωσης της διαλυμένης ροδαμίνης στο νερό. Από την ακτίνα laser ισχύος 1 W δημιουργήσαμε κατακόρυφη δέσμη (φύλλο) laser πάχους περίπου 1 mm (όσο και το πάχος της ακτίνας) με τη χρήση ενός πολυγωνικού 24-εδρου καθρέπτη που περιστρέφεται με συχνότητα περί τις 20000 rpm. Η κατακόρυφη δέσμη διερχόμενη από τον άξονα της φλέβας οπτικοποιεί την περιοχή όπου υπάρχει συγκέντρωση ροδαμίνης 6G, έτσι ώστε να μπορεί να προσδιοριστεί η κατώτερη περιοχή ανάμειξης στη συσκευή διάχυσης και η διεπιφάνεια με το ανώτερο στρώμα νερού που δεν περιέχει ροδαμίνη.

Υλοποιήθηκαν συνολικά 21 πειράματα καλύπτοντας ολόκληρο το εύρος των αρχικών αριθμών Richardson ώστε να διερευνηθεί η ανάμειξη που προκαλούν οι απλές, οι ανωστικές φλέβες και τα πλούμια. Τα πειράματα καταγράφονταν με ψηφιακή βιντεοκάμερα υψηλής ευκρίνειας. Για τον προσδιορισμό της στάθμης της διεπιφάνειας σε συνάρτηση με το χρόνο, αναλύονταν 20 στιγμιότυπα (frames) κατανομημένα στο χρόνο με λογισμικό CAD (Παππάς, 2012), δείγματα των οποίων φαίνονται στο σχήμα 2. Για να συγκρίνουμε τα πειραματικά δεδομένα με τη θεωρία που παρουσιάσαμε στο κεφάλαιο 2, χωρίσαμε περαιτέρω τα πειράματα σε τρεις αντιπροσωπευτικές ομάδες, ανάλογα με τον αρχικό αριθμό Richardson. Η πρώτη ομάδα πειραμάτων αντιστοιχεί σε $R_o < 0.050$ όπου για $z/l_M < 1$ η φλέβα συμπεριφέρεται ως απλή (jet). Η δεύτερη ομάδα πειραμάτων αντιστοιχεί σε $R_o > 0.350$ όπου για $z/l_M > 5$ η φλέβα συμπεριφέρεται ως πλούμιο (plume). Η τρίτη ομάδα πειραμάτων αντιστοιχεί ενδιάμεσους αριθμούς Richardson $0.050 < R_o < 0.350$ όπου η φλέβα συμπεριφέρεται ως ανωστική (buoyant jet).

3.1 ΑΠΛΕΣ ΦΛΕΒΕΣ

Οι αρχικές συνθήκες των πειραματικών δεδομένων που παρουσιάζονται στο κεφάλαιο αυτό φαίνονται στον Πίνακα 1. Στο διάγραμμα του σχήματος 3 παρουσιάζεται η αδιάστατη στάθμη της διεπιφάνειας h/H σαν συνάρτηση του αδιάστατου χρόνου t/T_i , όπου $t=0$ ορίζεται η χρονική στιγμή που η φλέβα αγγίζει τον πυθμένα για τα πειράματα 15, 16 και 17 με αριθμούς Richardson 0.013, 0.017 και 0.027 αντίστοιχα. Εκτός από τα πειραματικά δεδομένα και τη θεωρητική καμπύλη, στο διάγραμμα αυτό φαίνεται με συνεχή γραμμή ο υπολογισμός της αδιάστατης στάθμης της διεπιφάνειας που βασίστηκε στη σχέση (2.9) του παρόντος που προέκυψε από τη θεωρία των List & Imberger (1973). Ο υπολογισμός της στάθμης έγινε με αριθμητική ολοκλήρωση όπου η διαφορά στη στάθμη της διεπιφάνειας Δh προέκυψε από την εξίσωση διατήρησης του όγκου (συνέχεια). Εάν $\mu(h)$ είναι η παροχή της ανωστικής φλέβας σε απόσταση h από την πηγή που υπολογίζεται από τη σχέση (2.9), τότε μετά από χρόνο Δt η διεπιφάνεια έχει κατέλθει σε απόσταση $\Delta h = \mu(h)\Delta t / A$, όπου A είναι

το εμβαδόν της διατομής της δεξαμενής διάχυσης. Παρατηρούμε ότι ακόμη και για τους μικρότερους αριθμούς Richardson, η υπολογισμένη απόσταση h/H διαφέρει από τη θεωρητική της απλής φλέβας. Εάν εξαιρέσουμε τα πειράματα με τους μικρότερους αρχικούς αριθμούς Richardson 0.013 και 0.017, τα υπόλοιπα αποκλίνουν από τη θεωρητική καμπύλη $\tau_j = t/T_j = \ln(H/h)$.



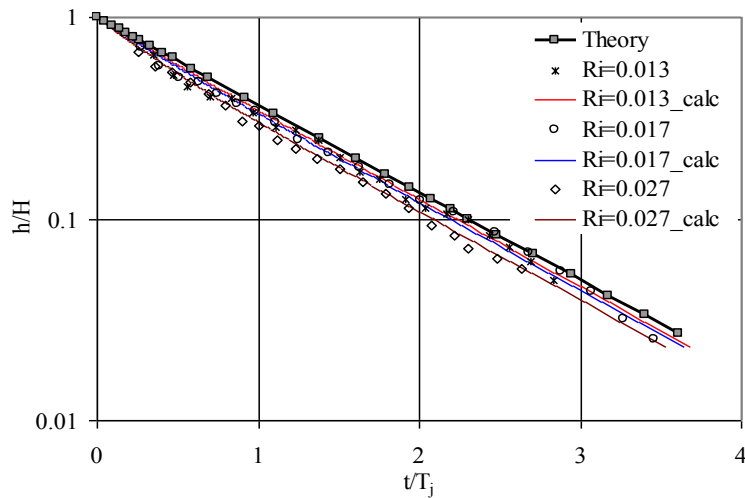
Σχήμα 2. Διεπιφάνεια σε χρόνο $t = 202$ s (αριστερά) και 568 s (δεξιά) από την έναρξη του πειράματος. Η μέση απόσταση διεπιφάνειας από το ακροφύσιο είναι 122.5 pixels (24.22 cm) και 50.8 pixels (10.04 cm) αντίστοιχα.

Πίνακας 1. Αρχικές συνθήκες πειραμάτων με $R_o < 0.050$.

Exp	D(cm)	Q (cc/s)	M (cm^4/s^2)	B (cm^4/s^3)	Re	R_o
1	0.75	28.70	1864.44	261.98	4851	0.038
15	0.50	17.60	1576.86	54.95	4462	0.013
16	0.50	13.43	918.85	41.95	3406	0.017
17	0.50	12.04	738.76	73.84	3054	0.027
18	0.75	17.60	700.83	106.17	2974	0.050
19	0.75	20.37	939.40	122.92	3444	0.043

Οι Baines & Turner (1969) και οι Bloomfield & Kerr (1998) στις ερευνητικές τους εργασίες έχουν χρησιμοποιήσει το μηχανισμό του ‘filling box’ για τον προσδιορισμό του νοητού κέντρου της φλέβας, οι πρώτοι αναφορικά με πλούμια και οι δεύτεροι με πίδακες (fountains) αρνητικής άνωσης με πολύ μεγάλη αρχική ειδική ορμή. Στο Σχήμα 4.4 παρουσιάζουμε τα δεδομένα όλων των πειραμάτων με $R_o \leq 0.050$, όπου θεωρώντας ότι οι φλέβες συμπεριφέρονται ως απλές, προσθέσαμε στην απόσταση h της διεπιφάνειας από το ακροφύσιο ένα σταθερό μήκος τέτοιο που να μετακινεί τα δεδομένα πάνω στη θεωρητική καμπύλη των απλών φλεβών. Για την παρούσα πειραματική διάταξη και διαμέτρους της φλέβας ίσες με 0.50 και 0.75 cm, η απόσταση του νοητού κέντρου της φλέβας από το ακροφύσιο περιορίστηκε στην περιοχή -

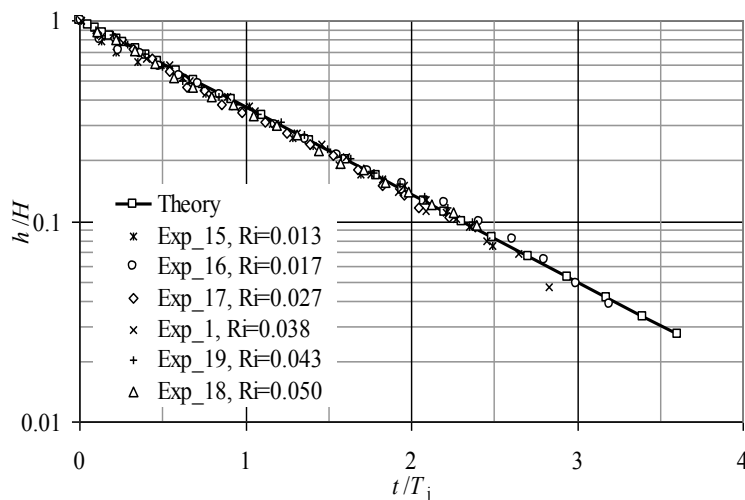
$1.6D < z_v < 0.25D$, ανεξάρτητα από τη μεθοδολογία υπολογισμού της θεωρητικής στάθμης της διεπιφάνειας, δηλαδή είτε θεωρώντας την ως απλή φλέβα (εξίσωση 2.7) είτε ως ανωστική (εξίσωση 2.9) για τον υπολογισμό της παροχής από θεωρία των List & Imberger, 1973).



Σχήμα 3. Αδιάστατη απόσταση της διεπιφάνειας από την ‘πηγή’ σαν συνάρτηση του αδιάστατου χρόνου, πειραματικές μετρήσεις και υπολογισμοί

3.2 ΠΛΟΥΜΙΑ

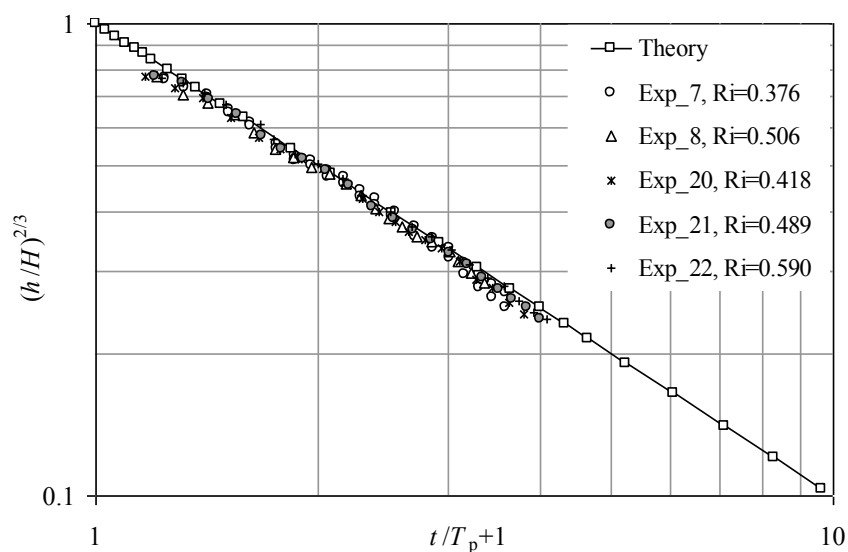
Οι αρχικές συνθήκες των πειραματικών δεδομένων που παρουσιάζονται στο κεφάλαιο αυτό φαίνονται στον Πίνακα 2. Στο διάγραμμα του σχήματος 5 φαίνεται σε αδιάστατη μορφή η στάθμη της διεπιφάνειας h/H σαν συνάρτηση του χρόνου t/T_p . Με εξαίρεση το πείραμα 8, τα υπόλοιπα πειράματα απέκλιναν από τη θεωρητική καμπύλη $\tau_p + 1 = (H/h)^{2/3}$ που υπολογίσαμε στο κεφάλαιο 2. Προσθέτοντας στη στάθμη του ακροφυσίου και την απόσταση του νοητού κέντρου του πλουμίου, όλα τα δεδομένα ήλθαν σε σύμπτωση με τη θεωρητική καμπύλη. Στην παρούσα πειραματική διάταξη με διάμετρο φλέβας 1.50 cm, η απόσταση του νοητού κέντρου της φλέβας από το ακροφύσιο είναι στην περιοχή $-1.5D < z_v < 0.5D$, θεωρώντας τη φλέβα ως πλούμιο.



Σχήμα 4. Αδιάστατη απόσταση της διεπιφάνειας από την ‘πηγή’ σαν συνάρτηση του αδιάστατου χρόνου, πειραματικές μετρήσεις με θεώρηση ‘νοητού κέντρου’ (virtual origin), υποθέτοντας ότι οι φλέβες είναι απλές για $R_o \leq 0.050$.

Πίνακας 2. Αρχικές συνθήκες πειραμάτων με $R_o > 0.350$.

Exp	D(cm)	Q (cc/s)	M (cm ⁴ /s ²)	B(cm ⁴ /s ³)	Re	R _o
7	1.50	16.21	148.66	144.83	1370	0.376
8	1.50	12.04	82.08	107.62	1018	0.506
20	1.50	18.98	203.94	287.36	1604	0.418
21	1.50	16.21	148.66	245.34	1370	0.489
22	1.50	13.43	102.09	203.32	1135	0.590



Σχήμα 5. Αδιάστατη απόσταση της διεπιφάνειας από την ‘πηγή’ σαν συνάρτηση του αδιάστατου χρόνου, πειραματικές μετρήσεις με θεώρηση ‘νοητού κέντρου’ (virtual origin) ώστε οι φλέβες να συμπεριφέρονται ως πλούμια για $R_o \geq 0.350$.

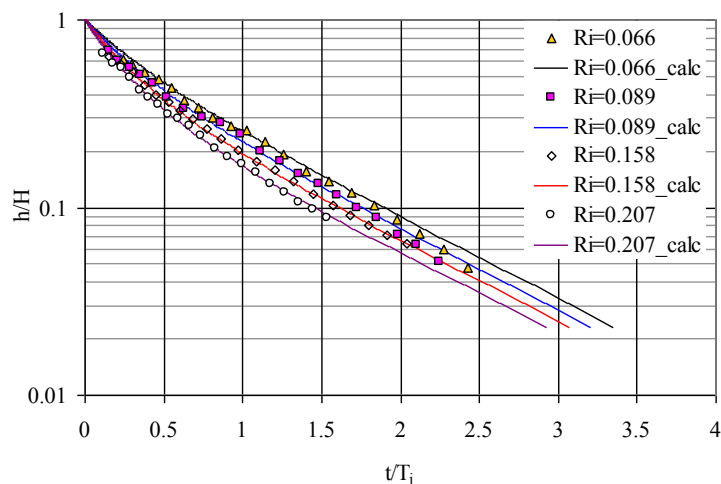
3.3 ΑΝΩΣΤΙΚΕΣ ΦΛΕΒΕΣ

Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της τρίτης ομάδας πειραμάτων που αντιστοιχεί ενδιάμεσους αριθμούς Richardson $0.050 < Ri < 0.350$ (ενδιάμεσες τιμές) όπου η φλέβα συμπεριφέρεται ως ανωστική (buoyant jet). Οι αρχικές συνθήκες των πειραματικών δεδομένων φαίνονται στον πίνακα 3. Στο διάγραμμα του σχήματος 6 παρουσιάζεται η στάθμη της διεπιφάνειας h/H σε αδιάστατη μορφή, σαν συνάρτηση του χρόνου t/T_i . Επιλέξαμε τη χαρακτηριστική χρονική κλίμακα των απλών φλεβών για την αδιαστατοποίηση, επειδή αυτές είναι σε μεταβατικό στάδιο ανάμεσα στις απλές φλέβες και τα πλούμια, ενώ δεν είναι πλήρως ανεπτυγμένες σε πλούμια. Η διεπιφάνεια μετακινείται με μεγάλη σχετικά ταχύτητα, όχι βέβαια όπως αυτή σε απλές φλέβες αλλά αισθητά μεγαλύτερη απ’ ότι στα πλούμια. Στο διάγραμμα του σχήματος 6 παρουσιάζονται επιλεγμένα πειράματα με διαφορετικό αρχικό αριθμό Richardson, για σύγκριση με τη θεωρητική λύση των ανωστικών φλεβών. Για τη σύμπτωση πειραματικών δεδομένων και θεωρητικής καμπύλης με βάση τη θεωρία των List & Imberger (1973) προστέθηκε και η απόσταση του νοητού κέντρου της φλέβας, που

βρίσκεται σε απόσταση όχι μεγαλύτερη από μια διάμετρο στα κατάντη του ακροφυσίου όταν η διάμετρος της ανωστικής φλέβας είναι 0.75 cm ή 1 cm.

Πίνακας 3. Αρχικές συνθήκες πειραμάτων με $0.050 < R_o < 0.350$.

Exp	D(cm)	Q (cc/s)	M (cm ⁴ /s ²)	B(cm ⁴ /s ³)	Re	R _o
3	0.75	12.04	328.34	107.62	2036	0.089
4	0.75	16.21	594.62	144.83	2740	0.066
5	1.00	12.04	184.69	107.62	1527	0.184
6	1.50	20.37	234.85	182.04	1722	0.299
9	1.00	20.37	528.41	193.57	2583	0.112
10	1.00	17.60	394.21	167.19	2231	0.130
11	1.00	14.82	279.64	149.35	1879	0.158
12	1.00	11.35	164.02	114.38	1439	0.207
13	1.00	9.27	109.36	93.40	1175	0.253
14	1.50	12.74	91.82	39.78	1077	0.283



Σχήμα 6. Αδιάστατη απόσταση της διεπιφάνειας από την ‘πηγή’ σαν συνάρτηση του αδιάστατου χρόνου. Πειραματικές μετρήσεις με θεώρηση ‘νοητού κέντρου’ συγκρίνονται με τη θεωρητική λύση ανωστικών φλεβών για $0.050 < R_o < 0.350$.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την παρουσίαση των αποτελεσμάτων των πειραμάτων στο προηγούμενο κεφάλαιο, που έγινε με βάση την ανάλυση που προηγήθηκε στο κεφάλαιο 2 του παρόντος, προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

Οι απλές φλέβες (jets με πολύ μικρό αρχικό αριθμό Richardson) προκαλούν την ανάμειξη σε περιορισμένο αποδέκτη σε πολύ μικρότερο χρόνο απ’ ότι ένα πλούμιο. Αυτό κυρίως οφείλεται στην ταχύτητα (αδράνεια) της ροής της απλής φλέβας παρά στο συντελεστή συμπαράσυρσης που είναι μεγαλύτερος σε ένα πλούμιο.

Τα πειραματικά αποτελέσματα της αδιαστατοποιημένης θέσης της διεπιφάνειας ανάμεσα στην περιοχή ανάμειξης και το νερό του δοχείου ακολουθούν με ακρίβεια τις θεωρητικές λύσεις των απλών φλεβών και πλουμίων, όταν ο αρχικός αριθμός του Richardson της φλέβας είναι πολύ μικρός ή κοντά στην οριακή τιμή 0.60 αντίστοιχα.

Τα πειραματικά δεδομένα και η θεωρητική λύση ταυτίζονται, εάν τα πρώτα αναπροσαρμοστούν με χρήση του νοητού κέντρου (virtual origin) της φλέβας.

Ο προσδιορισμός της θέσης της διεπιφάνειας με χρήση της γενικευμένης εξίσωσης των List & Imberger (1973) έδωσε ακριβή αποτελέσματα για όλο το εύρος των αρχικών αριθμών Richardson της φλέβας, $0 < R_0 < 0.60$.

Το νοητό κέντρο των φλεβών που εξετάστηκαν με βάση τη διάταξη δημιουργίας της φλέβας που χρησιμοποιήσαμε δεν απείχε περισσότερο από ± 1.5 διαμέτρους από το ακροφύσιο, δεδομένου πάντοτε ότι ο αρχικός αριθμός Reynolds της φλέβας υπερέβαινε το 1000 ακόμη και στην περίπτωση των πλουμιών.

Οι τεχνικές μέτρησης (laser induced fluorescence – LIF) και ανάλυσης των εικόνων με το σχεδιαστικό πακέτο AutoCad[®] έδωσαν πολύ καλά αποτελέσματα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Auban, O., Lemoine, F., Vallete, P., & Fontaine, J. R. 2001. *Simulation by solutal convection of a thermal plume in a confined stratified environment, application to displacement ventilation*. Int. J. Heat Mass Trans. 44, 4679-4691.
- Baines W.D., & Turner J.S. 1968. *Turbulent buoyant convection from a source in a confined region*. J. Fluid Mech., 37, 51-80.
- Bloomfield LJ, Kerr RC. 1998. *Turbulent fountains in a stratified fluid*. J. Fluid Mech., 385, 335-356.
- Caulfield, C. P. & Woods, A.W. 2002. *The mixing in a room by localized finite-mass-flux source of buoyancy*. J. Fluid Mech., 471, 33-50.
- Fischer, H.B., List, E.J., Koh, R.C.Y., Imberger, J., and Brooks, N H. 1979. *Mixing in inland and coastal waters*. Academic Press, 483 pp.
- Germeles, A. E. 1975. *Forced plumes and mixing of liquids in tanks*. J. Fluid Mech. 71, 601-623.
- Hunt, G. R., Cooper, P. & Linden, P. F. 2001. *Thermal stratification produced by plumes and jets in enclosed spaces*. Building Environ. 36, 871-882.
- Linden, P.F. 1999. *The fluid mechanics of natural ventilation*. Annu. Rev. Fluid Mech. 31, 201-238.
- List, E.J. & Imberger, J. 1973. *Turbulent entrainment in buoyant jets and plumes*. ASCE J. Hydr. Div. 99 (9), 1461 - 1474.
- Manins, P.C. 1979. *Turbulent buoyant convection from a source in a confined region*. J. Fluid Mech., 91, 765-781.
- Morton B.R., Taylor G.I., Turner, J.S. 1956. *Turbulent gravitational convection from maintained and instantaneous sources*. Proc. Roy. Soc. A 234, 1-23.
- Papanicolaou, P.N., and List, E.J. 1988. *Investigations of round vertical turbulent buoyant jets*. J. Fluid Mech., 195, 341-391.
- Worster, M.G. & Huppert, H.E. 1983. *Time-dependent density profiles in a filling box*. J. Fluid. Mech., 132, 457-466.
- Παπανικολάου, Π.Ν. 2009. *Τυρβώδεις ανωστικές φλέβες*. Σημειώσεις ΕΜΠ, 69 σ. http://itia.ntua.gr/~panospap/DPMS_PERIBALLONTIKH%20YDRAULIKH/
- Παππάς, Η.Δ. 2012. *Πειραματική διερεύνηση ανάμειξης σε ομογενή περιορισμένο ακίνητο αποδέκτη από κατακόρυφη ανωστική φλέβα με τεχνικές laser*. Μεταπτυχιακή Εργασία, ΠΜΣ "Εφαρμοσμένη Μηχανική & Προσομοίωση Συστημάτων" Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, 76 σ.

**ΠΥΚΝΟΜΕΤΡΙΚΗ ΣΤΡΩΜΑΤΩΣΗ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ
ΑΝΑΜΕΙΞΗΣ ΑΝΩΣΤΙΚΗΣ ΦΛΕΒΑΣ ΣΕ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΕΝΟ
ΑΠΟΔΕΚΤΗ**

**Γεώργιος Β. Δέσκος, Παναγιώτης Γ. Δημητριάδης,
Παναγιώτης Ν. Παπανικολάου**

Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
ΕΜΠ, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 15780 Ζωγράφου
panospap@mail.ntua.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Μελετήθηκε η ανάμειξη από κατακόρυφη τυρβώδη ανωστική φλέβα σε περιορισμένο αποδέκτη, με αριθμητικό μοντέλο που βασίζεται στον αλγόριθμο του Germeles (1975). Στην πλήρως αναμειγμένη (ανώτερη) στρώση ανάμειξης του αποδέκτη, το σύστημα των μη γραμμικών διαφορικών εξισώσεων συμπαράσυρσης (entrainment equations) που περιγράφουν την ροή της φλέβας επιλύθηκε με την μέθοδο Runge-Kutta τέταρτης τάξεως. Στην κατώτερη, ομογενή στρώση του αποδέκτη, η παροχή της φλέβας υπολογίστηκε με τη γενικευμένη θεωρία των List & Imberger (1973). Τα αποτελέσματα του υπολογιστικού σχήματος που αναπτύχθηκε βρίσκονται σε συμφωνία με εργαστηριακές μετρήσεις συγκέντρωσης με τεχνικές laser-induced fluorescence (LIF) του διαλυμένου στο νερό της φλέβας δείκτη (ροδαμίνης 6G).

**DENSITY STRATIFICATION IN THE MIXED REGIME OF A
BUOYANT JET IN CONFINED AMBIENT**

**George B. Deskos, Panagiotis G. Dimitriadis,
Panos N. Papanicolaou**

²Department of Water Resources and Environmental Engineering, School of Civil
Engineering, NTUA, Heron Polytechniou 9, 15780 Zografou,
panospap@mail.ntua.gr

ABSTRACT

Mixing in a tank (filling box) by vertical turbulent buoyant jets has been studied by means of a numerical model that is based on the original algorithm by Germeles (1975). In the upper, well-mixed layer of the tank that is density stratified, the nonlinear system of entrainment equations was solved using a fourth order Runge-Kutta routine. The volumetric buoyant jet flow rate in the homogeneous, lower layer of the tank (below the interface), was estimated using a global theory proposed by List & Imberger (1973). The results from numerical modeling are found to be in agreement with density measurements made in the upper, density stratified regime, via concentration measurements based on the laser-induced fluorescence of a rhodamine 6G dye that was dissolved in jet fluid.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ροή των ανωστικών φλεβών στις περισσότερες περιπτώσεις επηρεάζεται από τα φυσικά ή τεχνητά όρια του αποδέκτη μέσα στο οποίο εκβάλλουν. Όταν μια κατακόρυφη φλέβα που πηγάζει από το βυθό ενός υγρού αποδέκτη φτάσει στην επιφάνεια, τότε η ροή αλλάζει κατεύθυνση και ακολουθεί οριζόντια πορεία λόγω της επίδρασης του ορίου. Για παράδειγμα, σε έναν κλειστό κλιματιζόμενο χώρο όταν θερμός αέρας αρχίσει να ρέει από «πηγή» που βρίσκεται στο ύψος του δαπέδου, η ροή του μπορεί αρχικά να προσομοιωθεί ως μια τυρβώδης ανωστική φλέβα. Στην συνέχεια όταν η φλέβα υπό την επίδραση ανωστικών δυνάμεων λόγω θερμοκρασιακής διαφοράς φτάσει στην οροφή του κλειστού χώρου, επιδρούν τα στερεά όρια και με αποτέλεσμα την οριζόντια κίνησή της. Το ρευστό με οριζόντια κίνηση αφού συναντήσει τα κατακόρυφα τοιχώματα δημιουργεί μια στρώση, η οποία λόγω διαφοράς πυκνότητας παραμένει στην οροφή του δωματίου. Η στρώση του ελαφρύτερου ρευστού η οποία έχει σχηματιστεί θα μετατοπιστεί στη συνέχεια από μια δεύτερη ελαφρύτερη στρώση ρευστού προς τα κάτω. Η εξέλιξη αυτής της διαδικασίας έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία δύο στρώσεων στον περιορισμένο χώρο: την ανώτερη στρώση που σχηματίστηκε από την ανάμιξη του ρευστού της φλέβας με το ρευστό του δοχείου η οποία εμφανίζει πυκνομετρική στρωμάτωση, και την κατώτερη με ομοιόμορφη κατανομή πυκνότητας. Οι στρώσεις αυτές διαχωρίζονται από διεπιφάνεια. Αυτός ο μηχανισμός ανάμειξης είναι γνωστός ως 'filling box' και είναι συνυφασμένος με την ροή φλεβών σε περιορισμένους αποδέκτες, με πολλαπλές εφαρμογές σε προβλήματα μηχανικού.

Τυπικό παράδειγμα βιομηχανικής διεργασίας ανάμειξης αποτελεί η εισαγωγή καταλύτη (agent) σε δεξαμενές υγρού φυσικού αερίου LNG (Germeles, 1975). Αυτές είναι συνήθως κυκλικές με διάμετρο που φτάνει τα 75 μέτρα. Το LNG πρέπει να διατηρείται σε χαμηλές θερμοκρασίες (περίπου -162°C) και ο καταλύτης (agent) που προστίθεται επιταχύνει τη διαδικασία ψύξης. Οι περισσότερες δεξαμενές LNG διαθέτουν στην βάση τους οπή από την οποία εισάγεται ο καταλύτης με σταθερή παροχή. Το πρόβλημα ανάγεται σε πρόβλημα προσδιορισμού του ρυθμού ανάμειξης του καταλύτη με τον χρόνο και του μηχανισμού διάχυσης στη δεξαμενή. Ανάλογα προβλήματα εμφανίζονται σε κλειστούς κλιματιζόμενους χώρους καθώς και σε κλειστά δοχεία όπου δύο ρευστά με ελαφρώς διαφορετικές πυκνότητες αναμιγνύονται.

Οι τυρβώδεις ανωστικές φλέβες σε ομογενή και γραμμικά στρωματωμένο αποδέκτη μελετήθηκαν αρχικά από τους Morton, Taylor & Turner (1956), οι οποίοι βασίστηκαν στην υπόθεση της συμπαράσυρσης (entrainment hypothesis) που εισήγαγε ο G.I.Taylor. Οι Morton et al. (1956) προσδιόρισαν τις παραμέτρους της ροής ενός πλουμίου σαν συνάρτηση της απόστασης από την «πηγή» και περιέγραψαν τον ρόλο της πυκνότητας του περιβάλλοντος στη διάχυση των πλουμίων που παρατηρούνται στην φύση, όπως για παράδειγμα είναι η διάχυση της ηφαιστειακής τέφρας στην ατμόσφαιρα σαν αποτέλεσμα των ηφαιστειακών εκρήξεων. Στην περίπτωση αυτή η έκταση της ατμόσφαιρας συγκρινόμενη με αυτήν του πλουμίου της τέφρας μπορεί να θεωρηθεί αρκετά μεγάλη, έτσι ώστε τα όρια της να μην επηρεάζουν την ροή του. Σε περιορισμένο όμως αποδέκτη όπως είναι ένας κλιματιζόμενος εσωτερικός χώρος ή μια δεξαμενή, η επιρροή των ορίων του αποδέκτη είναι εμφανής, με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται η πυκνομετρική του στρωμάτωση με τον χρόνο. Οι Baines και Turner (1969) ανέπτυξαν τη θεωρία ανάμειξης ενός πλουμίου σε περιορισμένο αποδέκτη και έδωσαν αναλυτικές λύσεις στην περίπτωση που η ροή είναι ευσταθής, πράγμα το οποίο ισχύει για μεγάλους χρόνους ανάμειξης όταν η ροή στον αποδέκτη έχει αποκατασταθεί. Ενώ η ροή του πλουμίου δεν διαφέρει πρακτικά στο χρόνο, τα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος ρευστού σε δεδομένο ύψος πάνω από τη στάθμη εκροής της φλέβας

μεταβάλλονται με τον χρόνο. Οι συγγραφείς κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η πυκνομετρική στρωμάτωση εξαρτάται μόνο από την αρχική ειδική άνωση της φλέβας που επιβεβαίωσαν με πειραματικές μετρήσεις.

Ο μηχανισμός του filling box μελετήθηκε περαιτέρω σε υπολογιστικές εργασίες που ακολούθησαν. Για την χρονική εξέλιξη της πυκνομετρικής στρωμάτωσης ο Germeles (1975) παρουσίασε ένα υπολογιστικό σχήμα το οποίο βασίζεται στην διακριτοποίηση του αποδέκτη. Χωρίζοντας τον αποδέκτη σε στρώσεις πεπερασμένου πάχους, οι διαφορικές εξισώσεις της ροής της φλέβας επιλύονται αριθμητικά. Τα αποτελέσματα του αριθμητικού μοντέλου του Germeles (1975) συνάδουν με τις πειραματικές μετρήσεις των Baines & Turner (1969) και δίδουν σημαντικές πληροφορίες για την συμπεριφορά των πλουμίων πριν την ‘ομαλοποίηση’ της ροής λόγω ανατροπών κοντά στα κατακόρυφα όρια του αποδέκτη, κατά την έναρξη δημιουργίας της στρώσης ανάμειξης. Οι Worster & Huppert (1983) πρότειναν μια προσεγγιστική αναλυτική λύση για την περίπτωση του πλουμίου αδιαστατοποιώντας τις παραμέτρους της ροής, που αναπαράγει με ικανοποιητική ακρίβεια τον μηχανισμό του filling box για μεγάλους χρόνους. Οι Caulfield & Woods (2002) έδωσαν ασυμπτωτικές αναλυτικές λύσεις για τυρβώδεις ανωστικές φλέβες οι οποίες εν συνεχεία συγκρίθηκαν με αριθμητικά σχήματα για μεγάλους χρόνους, όταν λόγω παρατεταμένης ανάμειξης η φλέβα τείνει να γίνει απλή. Από την άλλη μεριά οι Wong & Griffiths (1999) ανέλυσαν περαιτέρω τον μηχανισμό του filling box εισάγοντας περισσότερες από μια «πηγές» και κατέληξαν ότι η πυκνομετρική στρωμάτωση που δημιουργείται λόγω δυο «πηγών» είναι παρόμοια με αυτή της μιας. Η θεωρία του filling box έχει μελετηθεί και στο επίπεδο των εφαρμογών της. Οι Cooper & Linden (1996), Hunt, Cooper & Linden (2001) καθώς και οι Bolster & Linden (2007) μελέτησαν την συμπεριφορά της στρωμάτωσης λόγω της επίδρασης πηγής θερμού αέρα σε περιορισμένο αποδέκτη. Παράλληλα εισήγαν μέσα στον περιορισμένο αποδέκτη οπές-διεξόδους (vents) απ’ όπου μπορεί να διαφεύγει ή να εισάγεται περιβάλλον ρευστό.

2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

Θεωρούμε κυκλική ανωστική κατακόρυφη φλέβα (jet) διαμέτρου D και πυκνότητας ρ_o που εκβάλλει μέσα σε ήρεμο ομογενή αποδέκτη με πυκνότητα ρ_a ($\rho_o > \rho_a$) όπως φαίνεται στο σχήμα 1. Η αρχική ογκομετρική παροχή της φλέβας Q , η ειδική, ανά μονάδα μάζας του ρεόντος ρευστού, ορμή M (specific momentum flux) και η ειδική άνωση B (specific buoyancy flux) εκφράζονται από τις σχέσεις

$$Q = \frac{\pi D^2}{4} W, \quad M = QW, \quad B = \frac{\rho_a - \rho_o}{\rho_o} gQ. \quad (2.1)$$

Ορίζουμε δύο κλίμακες μήκους

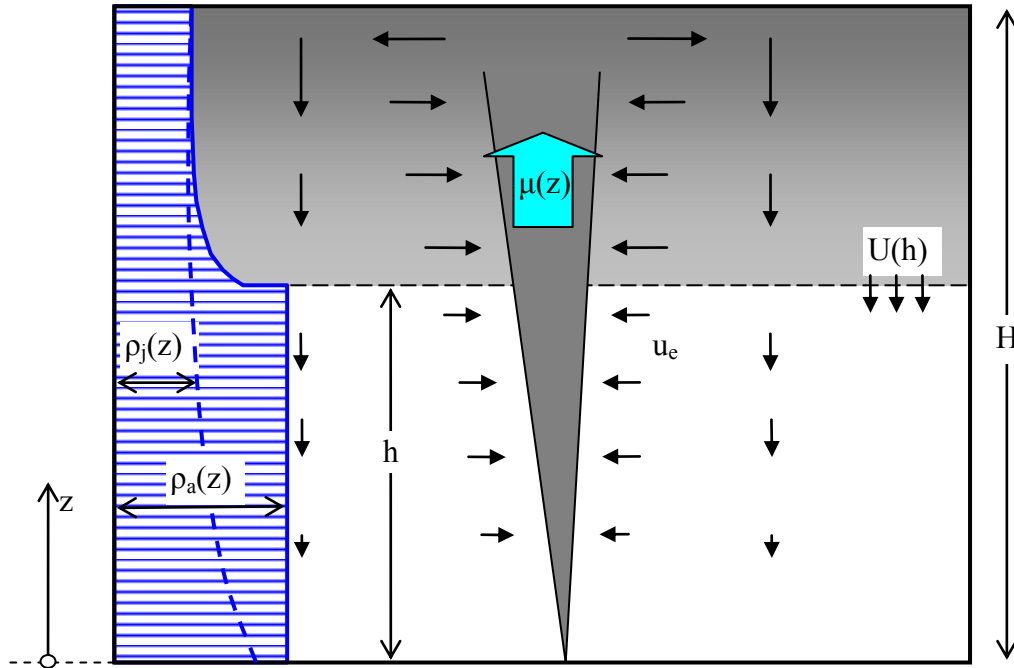
$$l_M = \frac{M^{3/4}}{B^{1/2}} \quad \text{και} \quad l_Q = \frac{Q}{M^{1/2}}, \quad (2.2)$$

σύμφωνα με τους Fischer *et al.* (1979), που βασίζονται στα κινηματικά χαρακτηριστικά της φλέβας, ο λόγος των οποίων είναι ο αρχικός αριθμός Richardson της φλέβας

$$R_o = \frac{l_Q}{l_M} = \frac{QB^{1/2}}{M^{5/4}}, \quad (2.3)$$

Ισχύουν οι εξής βασικές παραδοχές: (i) Το ενεργό βάθος του δοχείου H , δηλαδή η απόσταση από το ακροφύσιο ως τον πυθμένα, είναι παρόμοιο με την οριζόντια διάσταση του δοχείου και (ii) τα υγρά της φλέβας και του δοχείου είναι αναμείξιμα και ικανοποιούν την παραδοχή Boussinesq (μικρές πυκνομετρικές διαφορές $\Delta\rho/\rho_o$).

Η ροή εξαρτάται από το χρόνο που μετρά από τη στιγμή που η φλέβα αφού φθάσει στο άνω όριο της δεξαμενής αγγίζει τα κατακόρυφα τοιχώματα σαν ρεύμα πυκνότητας. Καθώς το ελαφρύτερο ρευστό παραμένει στην οροφή της δεξαμενής εκτοπίζει το ομογενές πυκνομετρικά ρευστό δημιουργώντας μια ανώτερη περιοχή με πυκνομετρική στρωμάτωση που χωρίζεται από την κατώτερη με διεπιφάνεια σε απόσταση h από το ακροφύσιο όπως φαίνεται στο σχήμα 1.



Σχήμα 1. Διάχυση κατακόρυφης ανωστικής φλέβας σε περιορισμένο αποδέκτη. Οι κατανομές της πυκνότητας ρευστού φλέβας και περιβάλλοντος φαίνονται με διακεκομμένη και συνεχή γραμμή αντίστοιχα.

Η ταχύτητα $U(h)$ με την οποία κατέρχεται η διεπιφάνεια μεταξύ στρωματομένης και ομογενούς περιοχής, είναι συνάρτηση του ρυθμού ανάμειξης της φλέβας με το περιβάλλον ρευστό στην περιοχή $h < z < H$ (h είναι το ύψος της διεπιφάνειας πάνω από την πηγή), δηλαδή της τοπικής παροχής της φλέβας $\mu(h)$. Από την εξίσωση διατήρησης μάζας (συνέχεια), εάν A είναι το εμβαδόν διατομής του δοχείου προκύπτει ότι

$$-AU(h) = \mu(h) \Leftrightarrow -A \frac{dz}{dt} \Big|_{z=h} = \mu(h). \quad (2.4)$$

Οι εξισώσεις κίνησης της φλέβας (entrainment equations) που αφορούν στη διατήρηση μάζας, ορμής και ανωστικής δύναμης σε απόσταση z θεωρώντας ομοιόμορφη κατανομή μέσης ταχύτητας και πυκνομετρικής διαφοράς (top-hat) από την πηγή είναι (Fisher et al., 1979)

$$\frac{d\mu}{dz} = 2\sqrt{\pi} \alpha m^{1/2}, \quad \frac{dm}{dz} = \frac{\mu\beta}{m}, \quad \frac{d\beta}{dz} = -g \frac{d\varepsilon}{dz} \mu \quad (2.5)$$

$\mu(z) = \pi b^2 w$, $m(z) = \pi b^2 w^2$, $\beta(z) = \pi b^2 w^2 g [\Delta\rho(z) / \rho_o] / 2$, $\varepsilon(z) = [\rho_o - \rho_a(z)] / \rho_o$ και a είναι ο συντελεστής συμπαράσυρσης. Η τελευταία εξίσωση έχει μηδενικό δεξί μέλος στην περιοχή $0 < z < h$ όπου η πυκνότητα του περιβάλλοντος ρευστού είναι ίδια παντού. Οι αρχικές συνθήκες στην πηγή είναι $\mu(0)=Q$, $m(0)=M$ και $\beta(0)=B$, όπως ορίστηκαν

στην εξίσωση (2.1), ο δε συντελεστής συμπαράσυρσης είναι ανάλογος του τετραγώνου του τοπικού αριθμού Richardson $R(z)=\mu\beta^{1/2}/m^{5/4}$ και προκύπτει από τη σχέση

$$\alpha = \alpha_j - (\alpha_j - \alpha_p) \left(\frac{R(z)}{R_p} \right)^2. \quad (2.6)$$

$R_p=0.63$ είναι ο οριακός αριθμός Richardson του πλουμίου. Σε κατακόρυφη κυκλική ανωστική φλέβα που εκβάλλει σε ρευστό με ομοιόμορφη πυκνότητα, η ειδική (ογκομετρική) παροχή $\mu(z)$ και ορμή $m(z)$ σε απόσταση z από το ακροφύσιο μπορούν να υπολογιστούν από τη γενικευμένη θεωρία των List & Imberger (1973) με τις σχέσεις

$$\frac{\mu}{Q} = \frac{z}{z_o} \left\{ 1 + \left(\frac{R_o}{R_p} \right)^2 \left[\left(\frac{z}{z_o} \right)^2 - 1 \right] \right\}^{1/3} \quad (2.7)$$

και

$$\frac{m(z)}{M} = \left\{ 1 + \left(\frac{R_o}{R_p} \right)^2 \left[\left(\frac{z}{z_o} \right)^2 - 1 \right] \right\}^{2/3} \quad (2.8)$$

αντίστοιχα. $z_o = Q/(C_p \sqrt{M})$ είναι η απόσταση του νοητού κέντρου της φλέβας από το ακροφύσιο και $C_p = \mu/(z\sqrt{m})$ η παράμετρος πλάτους ίση με 0.27, τιμή που προέκυψε από τις μετρήσεις των Papanicolaou & List (1988). Από τις σχέσεις (2.7) και (2.8) είναι δυνατός ο προσδιορισμός της παροχής και ειδικής ορμής της φλέβας στην περιοχή όπου η πυκνότητα του περιβάλλοντος ρευστού είναι ομοιόμορφη ($0 < z < h$). Στην πυκνομετρικά στρωματωμένη περιοχή $h < z < H$ οι παράμετροι της φλέβας προσδιορίζονται από την επίλυση του συστήματος των εξισώσεων (2.5), λαμβάνοντας υπόψη την κατανομή πυκνότητας $\rho_a(z) = \rho_o[1 - \varepsilon(z)]$ και το συντελεστή συμπαράσυρσης από την εξίσωση (2.6).

3. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Για την προσομοίωση του μηχανισμού filling box χρησιμοποιήθηκε ένα αριθμητικό σχήμα παρόμοιο με αυτό που εισήγαγε ο Germeles (1975). Ωστόσο στο σχήμα αυτό ο περιορισμένος αποδέκτης θεωρείται αρχικά μη διακριτοποιημένος. Όταν το ρευστό της φλέβας φθάνει στην οροφή του περιορισμένου αποδέκτη έχει ήδη αναμειχθεί με το περιβάλλον ρευστό. Το άνω όριο του περιορισμένου αποδέκτη αναγκάζει τη φλέβα να κινηθεί οριζόντια με αποτέλεσμα την δημιουργία μιας στρώσης ρευστού μικρότερης πυκνότητας στην οροφή του αποδέκτη. Έτσι εντός του περιορισμένου αποδέκτη «χτίζονται» διαδοχικά για κάθε χρονικό βήμα Δt λεπτές στρώσεις ρευστού διαφορετικής πυκνότητας (built-up density layers), που αποτελούν την διακριτοποίηση του αποδέκτη. Οι στρώσεις αυτές στρωματώνουν πυκνομετρικά τον αποδέκτη ο οποίος χωρίζεται σε δύο περιοχές την ανώτερη και την κατώτερη. Η ανώτερη περιοχή είναι αυτή στην οποία εμφανίζεται η πυκνομετρική στρωμάτωση από τις διαδοχικές πυκνομετρικές στρώσεις. Η κατώτερη περιοχή είναι πυκνομετρικά ομογενής ενώ οι δύο περιοχές διαχωρίζονται με διεπιφάνεια μηδενικού θεωρητικά πάχους, στην περιοχή της οποίας θεωρούμε ότι δεν υφίσταται κατακόρυφη ανάμειξη λόγω διάχυσης. Η διεπιφάνεια κατέρχεται με τον χρόνο καθώς η στρωματοποίηση της

ανώτερης περιοχής συνεχίζεται μεταβάλλοντας συνεχώς την πυκνομετρική κατανομή μέσα στον αποδέκτη.

Ο περιορισμένος αποδέκτης θεωρείται αρχικά μη διακριτοποιημένος. Επιλέγουμε ένα σταθερό χρονικό βήμα Δt που θα διατηρήσουμε σε ολόκληρη την υπολογιστική διαδικασία. Θεωρούμε ότι κατά τη χρονική στιγμή $t=0$, η ανωστική φλέβα με παροχή $\mu(H)$ και ορμή $m(H)$ φθάνει στην οροφή του δοχείου και εξαπλώνεται αυτόματα σε ολόκληρο το εύρος.

1^ο βήμα υπολογισμού (i=1): Μετά χρόνο Δt , δημιουργείται στρώση ρευστού πάχους $\Delta z(1,1)$ και πυκνότητας $\rho(1,1)$. Για τον υπολογισμό των $\mu(H)$ και $m(H)$ χρησιμοποιήθηκαν οι εξισώσεις (2.7) και (2.8) ενώ η ειδική άνωση $\beta(H)=B$, επειδή η διάχυση της φλέβας γίνεται σε ομογενή αποδέκτη. Το πάχος της στρώσης $\Delta z(1,1)$ και η πυκνομετρική διαφορά της από το ομογενές ρευστό του δοχείου υπολογίστηκαν από τις εξισώσεις διατήρησης του όγκου και της ανωστικής δύναμης από τις σχέσεις

$$\Delta z(1,1) = \frac{\mu(H)\Delta t}{A} \quad \text{και} \quad \rho_a - \rho(1,1) = \frac{Q(\rho_a - \rho_o)}{\mu(H)} \quad (3.1)$$

όπου A είναι το εμβαδόν οριζόντιας διατομής του δοχείου. Η στάθμη της διεπιφάνειας απέχει από την οροφή του δοχείου απόσταση $\Delta z(1,1)$ και από την πηγή $H - \Delta z(1,1)$.

2^ο βήμα υπολογισμού (i=2): Μετά χρόνο $2\Delta t$ έχουμε δύο στρώσεις ρευστού, την κατώτερη προς την πλευρά της πηγής πάχους $\Delta z(2,1)$ και πυκνότητας $\rho(2,1)$ και την ανώτερη που δημιουργείται στην οροφή πάχους $\Delta z(2,2)$ και πυκνότητας $\rho(2,2)$. Η μεταβολή του πάχους της στρώσης $\Delta z(1,1)$ δεν θα προκαλέσει πυκνομετρική μεταβολή καθώς θεωρούμε ότι σε κάθε στρώση το ρευστό είναι ομογενές. Άρα $\Delta\rho(2,1)=\Delta\rho(1,1)$ πράγμα το οποίο θα συμβαίνει για κάθε νέα στρώση που θα προστίθεται στην 'οροφή' του δοχείου. Από την άλλη μεριά, η στρώση $\Delta z(2,2)$ θα έχει διαφορετική πυκνότητα που οφείλεται στο ότι η φλέβα διασχίζει την 1^η στρώση ελαφρύτερου ρευστού, προτού φθάσει στην οροφή.

k^ο βήμα υπολογισμού (i=k): Μετά παρέλευση χρόνου $k\Delta t$ έχουμε k διακριτές στρώσεις ρευστού, την κατώτερη προς την πλευρά της πηγής πάχους $\Delta z(k,1)$ και πυκνότητας $\rho(k,1)$ και την ανώτερη που δημιουργείται στην οροφή πάχους $\Delta z(k,k)$ και πυκνότητας $\rho(k,k)$. Στο διάγραμμα του σχήματος 2 τα μωβ κελιά είναι τα κελιά τα οποία έχουν αριθμό στρώσης $j=1$, αντιπροσωπεύουν δηλαδή την πρώτη στρώση του ρευστού πάνω από την διεπιφάνεια. Μετά την αρχική της δημιουργία σε χρόνο Δt το πάχος της μεταβάλλεται με τον χρόνο λόγω της εισροής ρευστού από την μη αναμεμιγμένη ζώνη και εκροής στην επόμενη στρώση. Συνεπώς τα χαρακτηριστικά $\mu(i,1)$, $m(i,1)$, $\beta(i,1)$, της φλέβας υπολογίζονται μέσω της γενικευμένης θεωρίας των List και Imberger (1973) για κάθε χρονικό βήμα i . Από την άλλη μεριά στα κελιά τα οποία έχουν χρωματιστεί πράσινα υπολογίζονται οι τιμές $\mu(i,j)$, $m(i,j)$ και $\beta(i,j)$ από την αριθμητική επίλυση του συστήματος (2.5) των διαφορικών εξισώσεων με Runge-Kutta τέταρτης τάξης. Θεωρούμε ότι σε κάθε χρονικό βήμα η ροή της φλέβας αντιλαμβάνεται ως περιβάλλον ρευστό την πυκνομετρική κατανομή του προηγούμενου χρονικού βήματος. Συγκεκριμένα, για την πρώτη στρώση ($j=1$) έχουμε ότι η πυκνότητα $\rho(k,1)=\rho(1,1)$ αλλά το πάχος της ελαττώνεται επειδή η παροχή που εισέρχεται $\mu_{in}=\mu(h)$ είναι μικρότερη από την παροχή που βγαίνει $\mu_{out}=\mu\{h+\Delta z(i,j)\}$, δηλαδή από την εξίσωση διατήρησης όγκου προκύπτει ότι

$$\Delta z(k,1) = \Delta z(k-1,1) - \frac{[\mu(k,2) - \mu(k,1)]\Delta t}{A} \quad (3.2)$$

ενώ το πάχος της στρώσης j υπολογίζεται από τη σχέση

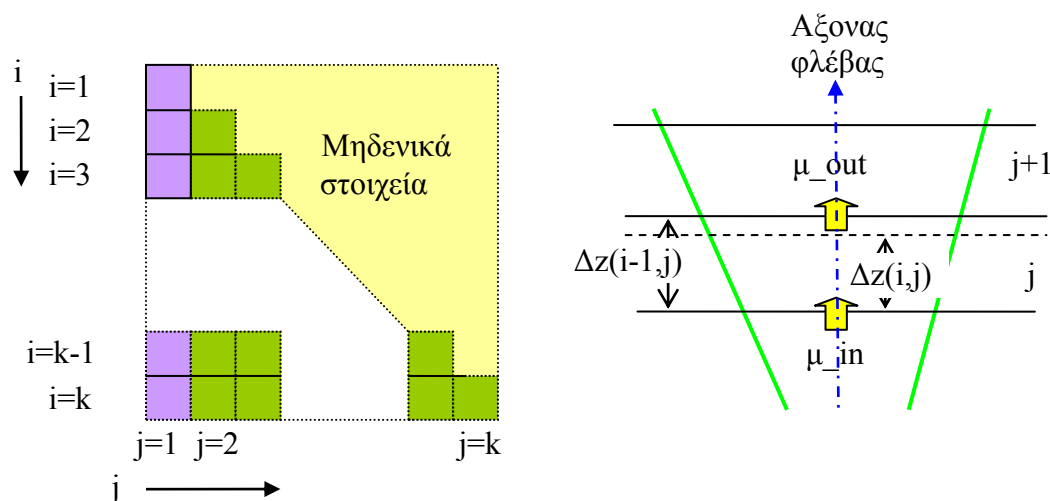
$$\Delta z(k, j) = \Delta z(k-1, j) - \frac{[\mu(k, j+1) - \mu(k, j)]\Delta t}{A} \quad (3.3)$$

Για τον υπολογισμό των παραμέτρων της φλέβας στην περιοχή πυκνομετρικής στρωμάτωσης κελί (i, j) , ο συντελεστής συμπαράσυρσης προκύπτει από τη σχέση (2.6) που σε διακριτοποιημένη μορφή γράφεται

$$\alpha = \alpha_j - (\alpha_j - \alpha_p) \left(\frac{R(i-1, j-1)}{R_p} \right)^2 \quad (3.4)$$

ενώ η συνάρτηση $\varepsilon(z) = \varepsilon(i, j)$

$$-\frac{d\varepsilon(z)}{dz} = \frac{1}{\rho_o} \frac{d\rho(z)}{dz} = \frac{1}{\rho_o} \frac{\rho(i-1, j-1) - \rho(i-1, j-2)}{\Delta z(i-1, j-2)} \quad (3.5)$$



Σχήμα 2. Υπολογιστικά κελιά μετά από χρόνο $k\Delta t$ (αριστερά) και μεταβολή του πάχους της ομογενούς στρώσης με πυκνότητα $\rho(j)$ από $\Delta z(i-1, j)$ σε $\Delta z(i, j)$ κατά τη διάρκεια του χρονικού βήματος $i\Delta t$ (δεξιά).

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν με τον παραπάνω αλγόριθμο τόσο για απλές φλέβες και πλούμια όσο και για τυρβώδεις ανωστικές φλέβες. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε αδιάστατη μορφή. Η αδιαστατοποίηση αφορά τα μήκη, το χρόνο και την πυκνότητα σαν συνάρτηση των δύο. Έτσι ορίζουμε ως

$$\zeta_o = \frac{h}{H}, \quad \zeta = \frac{z}{H}, \quad \tau = \frac{t}{T} \quad \text{και} \quad \delta = \frac{\rho_a - \rho(\zeta, \tau)}{\rho_a - \rho_o} \quad (4.1)$$

όπου t είναι ο χρόνος από τη στιγμή που η φλέβα αγγίζει την οροφή, z η απόσταση από το ακροφύσιο, T η κλίμακα χρόνου (T_j για απλές φλέβες, T_p για πλούμια και $T=M/B$ για ανωστικές φλέβες), ρ_a η αρχική πυκνότητα του ομογενούς ρευστού του δοχείου και ρ_o η

αρχική πυκνότητα της φλέβας. Σύμφωνα με τους Παππά και Παπανικολάου (2012), οι χρονοκλίμακες μιας απλής φλέβας και ενός πλουμίου που προκύπτουν από τη γενικευμένη θεωρία των List & Imberger (1973) γράφονται ως

$$T_j = \frac{A}{C_p M^{1/2}} \quad \text{και} \quad T_p = \frac{3}{2} A \frac{R_p^{2/3}}{C_p^{5/3}} B^{-1/3} H^{-2/3} \quad (4.2)$$

όπου $C_p = 0.27$, $R_p = 0.63$ και A το εμβαδόν της οριζόντιας διατομής του δοχείου.

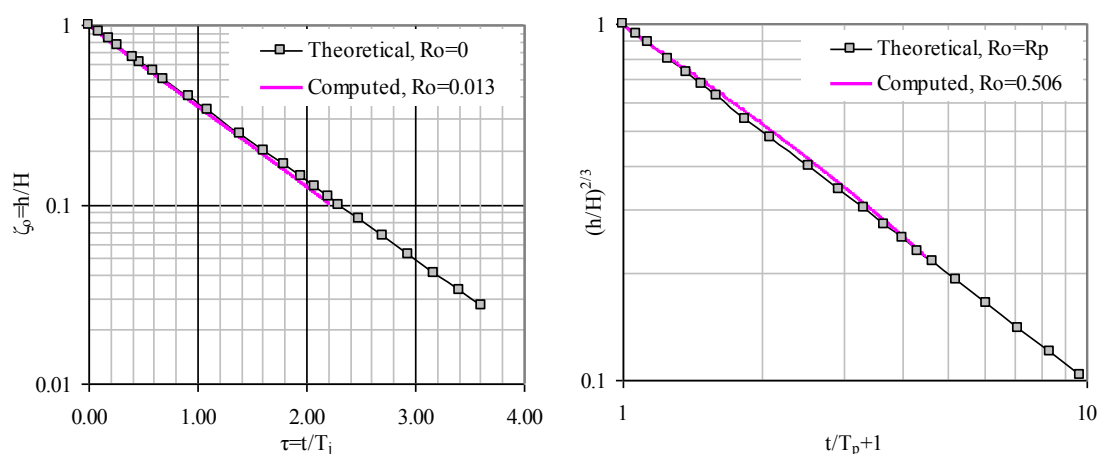
Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των υπολογισμών τριών φλεβών με αρχικές συνθήκες που αντιστοιχούν σε πειράματα του Παππά (2012) για να γίνει σύγκριση των πειραματικών μετρήσεων συγκέντρωσης με τα αποτελέσματα του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία. Οι αρχικές συνθήκες των πειραμάτων που χρησιμοποιήθηκαν και στο μοντέλο φαίνονται στον πίνακα 1.

Πίνακας 1. Αρχικές συνθήκες πειραμάτων που χρησιμοποιήθηκαν στις υπολογισμούς.

Exp	D (cm)	Q (cc/s)	M (cm ⁴ /s ²)	B (cm ⁴ /s ³)	Re	R_o	T_j, T_p (s)	Ροή
15	0.50	17.60	1576.86	54.95	4462	0.013	149.20	Jet
8	1.50	12.04	82.08	107.62	1018	0.506	231.05	Plume
11	1.00	14.82	279.64	149.35	1879	0.158	354.37	Buoy. Jet

Τα πειράματα υπ αριθμ. 15, 8 και 11 βιντεοσκοπήθηκαν από τον Παππά (2012) με ρυθμό 30 fps, όπου η οπτικοποίηση της ροής έγινε με την τεχνική laser-induced fluorescence ροδαμίνης 6G. Η ψηφιακή ανάλυση των επί μέρους εικόνων (frames) για τον προσδιορισμό των συγκεντρώσεων ροδαμίνης 6G έγινε με το λογισμικό MATLAB και αδιαστατοποιήθηκαν έτσι ώστε να μπορούν να συγκριθούν με τα αποτελέσματα του μοντέλου. Η μεθοδολογία προσδιορισμού της κατανομής της μέσης συγκέντρωσης στην περιοχή ανάμειξης συνοψίζεται ως εξής. Αρχικά απομονώθηκαν οι εικόνες από τα βίντεο σε 3 αποστάσεις της διεπιφάνειας από το ακροφύσιο, για $\zeta_o = z/H = 0.67, 0.50$ και 0.33 , για εύρος χρόνου ίσου με το χρονικό βήμα Δt που χρησιμοποιήθηκε στον υπολογισμό της ανάπτυξης των επί μέρους στρώσεων του μοντέλου, που ήταν 0.5 s για τα πειράματα 15 και 11 και 1.0 s για το πείραμα 8. Συγκεκριμένα, για το πείραμα 15 απομονώθηκαν οι 16 εικόνες (frames) 1670 ± 8 (που αντιστοιχούν σε απόσταση διεπιφάνειας $h/H=0.67$ και χρονικό εύρος $t=0.373 \times T_j \pm 0.5$ s), 16 εικόνες (frames) 2927 ± 8 (για $h/H=0.50$ και $t=0.654 \times T_j \pm 0.5$ s) και 16 εικόνες (frames) 4691 ± 8 (για $h/H=0.33$ και $t=1.048 \times T_j \pm 0.5$ s), όπου $T_j = 149.19$ s. Κατά τον ίδιο τρόπο απομονώθηκαν οι αντίστοιχες εικόνες για τα πειράματα 8 (30 εικόνες) και 11 (16 εικόνες). Στη συνέχεια, υπολογίστηκε η μέση ανηγμένη συγκέντρωση (C/C_o) από την ψηφιακή επεξεργασία της φωτεινότητας (σε μονάδες RGB 8-bit ανάλυσης) της μέσης εικόνας. Η κατακόρυφη κατανομή της συγκέντρωσης μετρήθηκε κοντά στο όριο της δεξαμενής προς την πλευρά του laser, ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα απομείωσης της ακτίνας laser καθώς διέρχεται από το αναμειγμένο με ροδαμίνη 6G πεδίο ροής. Στην περιοχή αυτή οι συγκεντρώσεις της ροδαμίνης είναι μικρότερες των 50 $\mu\text{g/L}$, ισχύει επομένως η γραμμική αύξηση της συγκέντρωσης σαν συνάρτηση της φωτεινότητας (Ferrier et al., 1993). Οι συναρτήσεις αυτές για τη συμβατική κάμερα που χρησιμοποιήθηκε προέκυψαν από την ανάλυση των Dimitriadis, Papanicolaou & Koutsoyiannis (2011). Η αρχική συγκέντρωση της ροδαμίνης C_o ήταν πολύ μεγαλύτερη από 50 $\mu\text{g/L}$ (της τάξης 5 mg/L), ώστε να είναι δυνατή η μέτρησή της στις περιοχές της διεπιφάνειας (όπου οι συγκεντρώσεις ροδαμίνης είναι της τάξης του 1% του C_o).

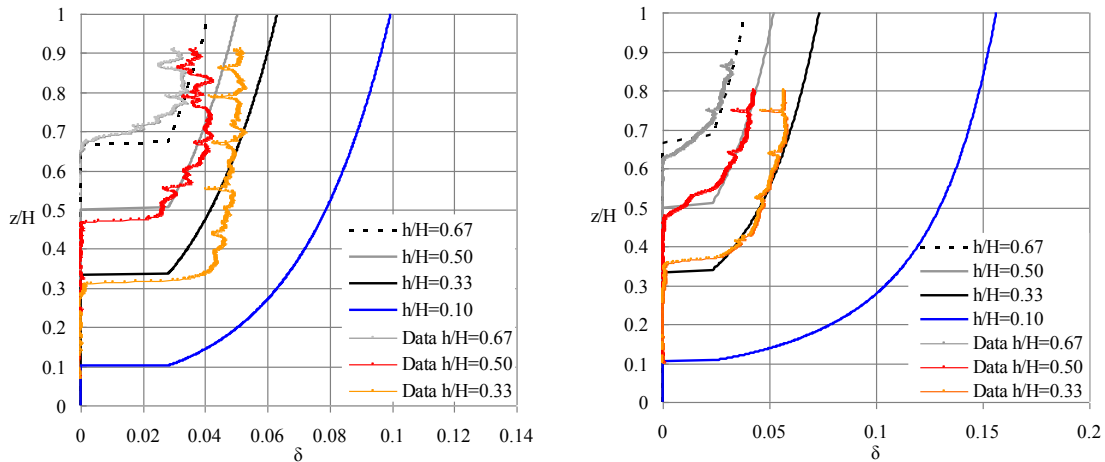
Στα διαγράμματα του σχήματος 3 φαίνεται η απόσταση της διεπιφάνειας σε αδιάστατη μορφή σαν συνάρτηση των αδιάστατων χρόνων για μια ασυμπτωτικά απλή φλέβα ($R_o=0.013$) και ένα πλούμιο ($R_o=0.506$). Η στάθμη της διεπιφάνειας που υπολογίστηκε ως το κατώτερο όριο της πρώτης υπολογιστικής στρώσης, στην περίπτωση του πλουμίου προέκυψε μεγαλύτερη από τη θεωρητική στάθμη, πράγμα που οφείλεται πιθανά είτε στο μέγεθος του χρονικού βήματος που ήταν $0.5 - 1$ s, είτε στο γεγονός ότι προστέθηκε και η απόσταση του νοητού κέντρου ($+3.28D$) στον υπολογισμό. Η προσθήκη αυτού του μήκους μειώνει το συνολικό ρυθμό ανάμειξης που έχει σαν συνέπεια το μικρότερο πάχος της ζώνης ανάμειξης. Οι μετρήσεις των Παππά και Παπανικολάου (2012) υποδεικνύουν ότι το νοητό κέντρο του πλουμίου βρίσκονταν στην περιοχή $-1.5D < z_v < 0.5D$, δηλαδή από 1.5 ανάντη έως 0.5 διαμέτρους κατάντη του ακροφυσίου, πράγμα που αν ληφθεί υπόψη στον υπολογισμό θα μετακινήσει τη διεπιφάνεια της περιοχής ανάμειξης στη θέση που προβλέπεται από τη θεωρία.



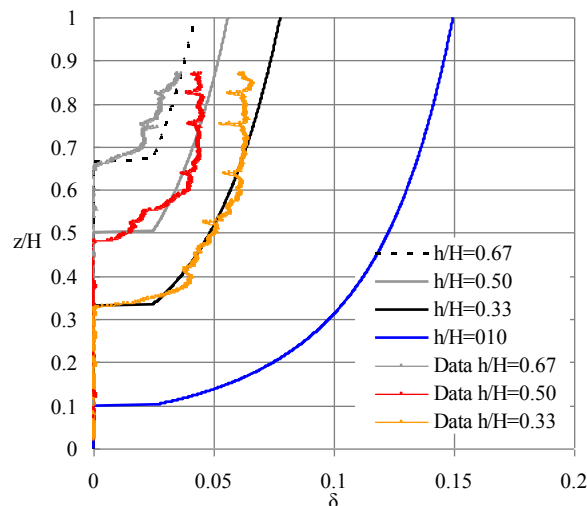
Σχήμα 3. Υπολογισμός της στάθμης της διεπιφάνειας στην περίπτωση της απλής φλέβας (αριστερά) και πλουμίου (δεξιά).

Στο σχήμα 4 φαίνονται οι κατανομές της αδιαστατοποιημένης συγκέντρωσης σαν συνάρτηση της αδιάστατης απόστασης από το ακροφύσιο z/H , για την απλή φλέβα και το πλούμιο με $R_o=0.013$ και $R_o=0.506$ αντίστοιχα που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο σχήμα, όταν η διεπιφάνεια ανάμεσα στην αναμειγμένη και μη αναμειγμένη περιοχή του δοχείου βρίσκεται σε απόσταση $0.67H$, $0.50H$, $0.33H$ και $0.10H$ από το ακροφύσιο. Παράλληλα στα ίδια διαγράμματα φαίνονται οι αδιάστατες συγκεντρώσεις της ροδαμίνης 6G που ήταν διαλυμένη στο υγρό της φλέβας σε συγκεντρώσεις περίπου 50 ppb και εκτιμήθηκαν από τη βιντεοσκοπημένη εικόνα του πειράματος με συμβατική βιντεοκάμερα. Παρά το γεγονός ότι η κάμερα που χρησιμοποιήθηκε ήταν ψηφιακή για οικιακή χρήση, ο 'θόρυβος' δεν φαίνεται να επηρεάζει το αποτέλεσμα. Οι κατανομές της μέσης (από τις 16 ή 30 εικόνες) συγκέντρωσης στην περιοχή ανάμειξης είναι παρόμοιες με αυτές που υπολογίστηκαν, με διαφορές όσον αφορά στο πάχος της διεπιφάνειας που θεωρείται μηδενικό στους υπολογισμούς και την κατανομή συγκέντρωσης στην περιοχή $z/H > 0.7$ (απόσταση από το ακροφύσιο μεγαλύτερη από το 70% του ενεργού βάθους του δοχείου), όπου η κατανομή παρουσιάζεται περίπου ομοιόμορφη ενώ η υπολογισμένη κατανομή έχει μεγαλύτερη κλίση ως προς την κατακόρυφο. Οι απότομες πτώσεις της μετρημένης συγκέντρωσης ανά 5 cm, όπως φαίνονται στα διαγράμματα, οφείλονται σε ζωγραφισμένο πλέγμα - κάνναβο στην εξωτερική επιφάνεια της δεξαμενής. Αντίστοιχη συμπεριφορά παρατηρείται και στην περίπτωση της ανωστικής φλέβας όπως φαίνεται

στο σχήμα 5. Από τα σχήματα 4 και 5 είναι εμφανής η ταχύτερη ανάμειξη που προκαλεί η απλή φλέβα σε σχέση με μια ανωστική ή ένα πλούμιο. Πιο συγκεκριμένα, όταν η διεπιφάνεια βρίσκεται σε απόσταση ίση με το 10% του ενεργού βάθους του αποδέκτη από το ακροφύσιο, η αδιάστατη συγκέντρωση στην οροφή είναι περίπου 0.10 για την απλή φλέβα, ενώ για την ανωστική και το πλούμιο περίπου 0.15. Αυτό συμβαίνει επειδή ο χρόνος καθόδου της διεπιφάνειας στην εν λόγω απόσταση από την πηγή είναι σημαντικά μικρότερος στην απλή φλέβα.



Σχήμα 4. Αδιάστατη μετρημένη και υπολογισμένη συγκέντρωση δ σαν συνάρτηση του βάθους του δοχείου όταν η διεπιφάνεια βρίσκεται σε απόσταση $\zeta_0=0.67, 0.50$ και 0.33 σε απλή φλέβα $R_o=0.013$ (αριστερά) και πλούμιο $R_o=0.506$ (δεξιά).

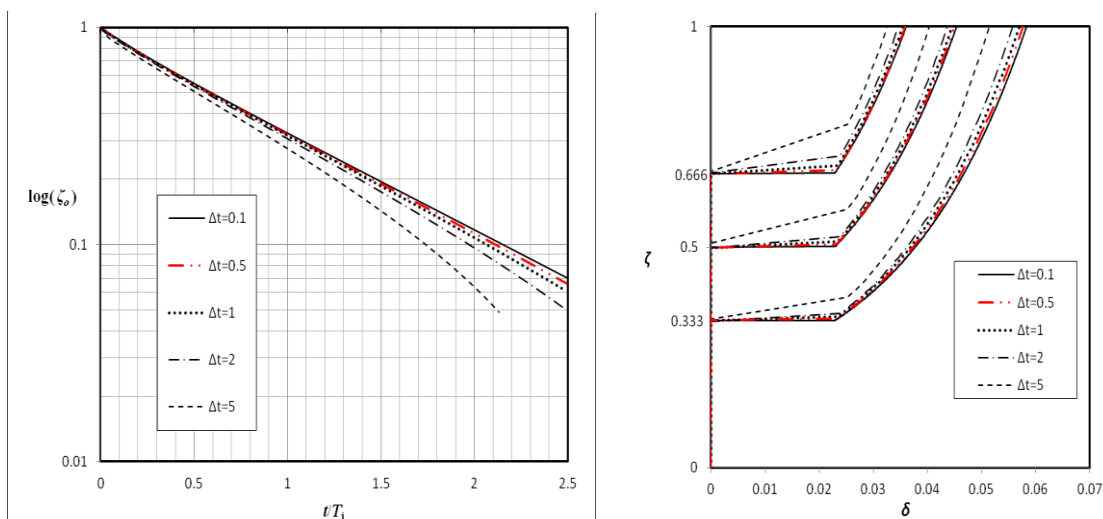


Σχήμα 5. Αδιάστατη μετρημένη και υπολογισμένη συγκέντρωση δ σαν συνάρτηση του βάθους του δοχείου όταν η διεπιφάνεια βρίσκεται σε απόσταση $\zeta_0=0.67, 0.50$ και 0.33 σε ανωστική φλέβα $R_o=0.158$.

Για τον προσδιορισμό της ταχύτητας των υπολογισμών για την αξιολόγηση του αλγορίθμου έγινε ανάλυση ευαισθησίας ως προς το χρονικό βήμα υπολογισμού Δt , που καθορίζει πόσο πυκνή είναι η διακριτοποίηση του αποδέκτη. Η σύγκλιση των αποτελεσμάτων βρίσκεται σε αντιπαράθεση με τον χρόνο υπολογισμού. Για μείωση του

σφάλματος προσδιορισμού της θέσης της διεπιφάνειας ανάμεσα σε υπολογισμούς και θεωρίας από 5% σε 2%, ο υπολογιστικός χρόνος προέκυψε εκθετικά μεγαλύτερος.

Τα διαγράμματα του σχήματος 6 προέκυψαν από την επίλυση απλής φλέβας με $R_0=0$. Η σύγκρισή της με την θεωρητική καμπύλη υποδεικνύει ότι η μεταβολή του σφάλματος αυξάνεται με τον χρόνο. Παρατηρούμε ότι οι καμπύλες παρουσιάζουν την μέγιστη απόκλιση για μεγάλους χρόνους $\tau=t/T_j$ λόγω της μετάδοσης του σφάλματος κατά την διαδικασία της ολοκλήρωσης. Το σχετικό σφάλμα για κάθε χρονικό βήμα προστίθεται στο επόμενο και ούτω καθ' εξής. Γενικά πάντως το αδιάστατο χρονικό βήμα για υπολογισμούς με σφάλμα που δεν υπερβαίνει το 3% είναι περίπου $T_j/300$ ή $T_p/300$ προκειμένου περί απλών ή ανωστικών φλεβών και πλουμίων αντίστοιχα.



Σχήμα 6. Σύγκριση ρυθμού καθόδου της διεπιφάνειας απλής φλέβας (αριστερά) και πυκνομετρικών κατανομών (δεξιά) για χρονικά βήματα $\Delta t=0.1$ s, 0.5 s, 1.0 s, 2.0 s και 5.0 s.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την παρουσίαση των αποτελεσμάτων των υπολογισμών και πειραμάτων για σύγκριση προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η ταχύτητα καθόδου της διεπιφάνειας μεταξύ της ανώτερης στρώσης ανάμειξης και της κατώτερης ομογενούς είναι μεγαλύτερη σε απλή φλέβα, ελαττώνεται δε με την αύξηση του αρχικού αριθμού Richardson. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών είναι συγκρίσιμα με αυτά των μετρήσεων (Παππάς, 2012) με laser-induced fluorescence.
- Στην ανώτερη περιοχή του αποδέκτη δημιουργείται λόγω ανάμειξης πυκνομετρική στρωμάτωση που μεταβάλλεται με τον χρόνο. Οι κατανομές πυκνότητας εμφανίζουν πυκνομετρικό «σκαλοπάτι» $\Delta\rho$ στην θέση της διεπιφάνειας, το μέγεθος του οποίου είναι αμετάβλητο καθώς η διεπιφάνεια προσεγγίζει την πηγή. Η τιμή του είναι σταθερή και ισούται με την διαφορά πυκνότητας μεταξύ της πρώτης στρώσης στην θέση της οροφής του αποδέκτη και του περιβάλλοντος ρευστού.
- Η υπολογισμένη πυκνομετρική στρωμάτωση είναι γενικά συγκρίσιμη με αυτή που υπολογίστηκε με βάση την βιντεοσκόπηση της ροής (Παππάς 2012) και την αναγωγή της έντασης φθορισμού της ροδαμίνης σε συγκέντρωση. Διαφορές παρατηρήθηκαν όσον αφορά στο πάχος της διεπιφάνειας και την κλίση της κατανομής της πυκνότητας στο άνω όριο του αποδέκτη. Μετρήσεις συγκέντρωσης είναι σκόπιμο να επαναληφθούν με κατάλληλο σύστημα δειγματοληψίας χαμηλού θορύβου, σε σχέση με αυτόν μιας ψηφιακής κάμερας οικιακής χρήσης.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ο κύριος κορμός αυτής της εργασίας αποτελεί τμήμα της Διπλωματικής Εργασίας του Γ. Δέσκου (2012). Ευχαριστούμε τον κ. Ηλία Παππά, Μηχανολόγο Μηχανικό απόφοιτο του ΠΜΣ 'Εφαρμοσμένη Μηχανική και Προσομοίωση Συστημάτων' του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, για την παροχή των βιντεοσκοπημένων πειραμάτων της Μεταπτυχιακής του Διατριβής.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Baines W.D., & Turner J.S. 1969. *Turbulent buoyant convection from a source in a confined region*. J. Fluid Mech., 37, 51-80.
- Bolster, D.T. and Linden, P.F. 2007. Contaminants in ventilated filling boxes J. Fluid Mech., 591, 97-116
- Caulfield, C. P. & Woods, A.W. 2002. *The mixing in a room by localized finite-mass-flux source of buoyancy*. J. Fluid Mech., 471, 33-50.
- Cooper P & Linden, P.F. 1996. *Natural ventilation of an enclosure containing two buoyancy sources*. J. Fluid Mech., 311, 153-176.
- Dimitriadis, P., Papanicolaou, P. and Koutsoyiannis, D. 2011. *Hurst-Kolmogorov dynamics applied to temperature fields for small turbulence scales*. EGU General Assembly, Vol. 13, EGU2011-772.
- Ferrier A. J., Funk, D. R., and Roberts, P. J. W. 1993. *Application of optical techniques to the study of plumes in stratified fluids*. Dyn. Atmos. and Oceans, 20, 155-183.
- Fischer, H.B., List, E.J., Koh, R.C.Y., Imberger, J., and Brooks, N H. 1979. *Mixing in inland and coastal waters*. Academic Press, 483 pp.
- Germeles, A. E. 1975. *Forced plumes and mixing of liquids in tanks*. J. Fluid Mech. 71, 601-623.
- Hunt, G. R., Cooper, P. & Linden, P. F. 2001. *Thermal stratification produced by plumes and jets in enclosed spaces*. Building Environ. 36, 871-882.
- List, E.J. & Imberger, J. 1973. *Turbulent entrainment in buoyant jets and plumes*. ASCE J. Hyd. Div. 99 (9), 1461 - 1474.
- Morton B.R., Taylor G.I., Turner, J.S. 1956. *Turbulent gravitational convection from maintained and instantaneous sources*. Proc. Roy. Soc. A 234, 1-23.
- Papanicolaou, P.N., and List, E.J. 1988. *Investigations of round vertical turbulent buoyant jets*. J. Fluid Mech., 195, 341-391.
- Wong, A.B.D., Griffiths, R.W. 1999. Stratification and convection produced by multiple turbulent plumes. Dynamics of Atmospheres and Oceans, 30, 101-123.
- Worster, M.G. & Huppert, H.E. (1983) *Time-dependent density profiles in a filling box*. J. Fluid. Mech., 132, 457-466.
- Δέσκος, Γ.Β. 2012. *Διάχυση τυρβώδους ανωστικής φλέβας σε περιορισμένο αποδέκτη*. Διπλωματική Εργασία, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, 89 σ.
- Παππάς, Η.Δ. & Παπανικολάου, Π.Ν. 2012. *Ανάμειξη σε περιορισμένο αποδέκτη από τυρβώδη ανωστική φλέβα με τεχνικές laser*. 2^ο κοινό Συνέδριο ΕΥΕ-ΕΕΔΥΠ, 11-13 Οκτωβρίου 2012, Πάτρα.
- Παππάς, Η.Δ. 2012. *Πειραματική διερεύνηση ανάμειξης σε ομογενή περιορισμένο ακίνητο αποδέκτη από κατακόρυφη ανωστική φλέβα με τεχνικές laser*. Μεταπτυχιακή Εργασία, ΠΜΣ "Εφαρμοσμένη Μηχανική & Προσομοίωση Συστημάτων" Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, 76 σ.

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ VOF

Δημήτριος Κ. Φυτανίδης, Ιωάννης Β. Σούλης

Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης,
67100, Ξάνθη,
Τηλ. +302541079321, e-mail: dfytanid@civil.duth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Πραγματοποιήθηκε αριθμητική διερεύνηση του φαινομένου θραύσης φράγματος σε εργαστηριακή κλίμακα με τεχνικές Υπολογιστικής Μηχανικής Ρευστών. Εξετάστηκε μια σειρά υπολογιστικών πειραμάτων με χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων όγκων του εμπορικού επιλυτή ANSYS Fluent 14.0. Για την προσομοίωση της ροής πραγματοποιήθηκε επίλυση των Reynolds Averaged Navier-Stokes εξισώσεων ενώ έγινε και σύγκριση των αποτελεσμάτων με χρήση διαφόρων μοντέλων τύρβης. Για τον προσδιορισμό της ελεύθερης επιφάνειας του ρευστού χρησιμοποιήθηκε το πολυφασικό μοντέλο Volume of Fluid. Πραγματοποιείται ανάλυση αποτελεσμάτων κατανομής ταχυτήτων και βάθους ύδατος σε διάφορες πειραματικές διατάξεις. Τέλος, έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων με αντίστοιχα πειραματικά και υπολογιστικά αποτελέσματα από παλαιότερες επιστημονικές εργασίες και οι συγκρίσεις είναι ικανοποιητικές.

COMPUTATIONAL ANALYSIS IN FLOODING WAVES USING VOF MODEL

Dimitrios K. Fytanidis, Johannes V. Soulis

Civil Engineering Department, Demokriton University of Thrace,
67100, Xanthi, Greece,
Tel. +30 2541079321, e-mail: dfytanid@civil.duth.gr

ABSTRACT

A numerical investigation was carried out concerning the dam-break phenomenon in lab scale, using Computational Fluid Dynamics techniques. A set of numerical experiments was performed using the finite-volume approach of the commercial solver ANSYS Fluent 14.0. For flow simulation, the Reynolds Averaged Navier-Stokes equations were solved, whereas various turbulence models were used for the turbulence closure and the results were compared to each other. For determination of the free surface, the Volume of Fluid multiphase model was utilized. An analysis of the velocity profiles and water depths is presented for various measurements taken from experimental set ups. Finally, satisfactory comparison was observed between the current method results and literature acquired measurements and computations.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η θραύση φράγματος είναι το φαινόμενο κατά το οποίο προκαλείται μερική ή ολική κατάρρευση ενός φράγματος, έχοντας ως αποτέλεσμα την μη-ελεγχόμενη απελευθέρωση νερού, με καταστροφικές συνέπειες για τις κατάντη του φράγματος περιοχές. Λόγω της κρισιμότητας του θέματος, αλλά και των ραγδαίων και μεγάλης κλίμακας επιπτώσεων που μπορεί να προκαλέσει η θραύση ενός φράγματος, πλήθος ερευνητών έχουν μελετήσει στο παρελθόν πειραματικά, αναλυτικά αλλά και υπολογιστικά το εν λόγω φαινόμενο.

Ο Ritter (1892) έκανε μια από τις πρώτες θεωρητικές μελέτες για το φαινόμενο θραύσης φράγματος και με χρήση πλήθους παραδοχών παρήγαγε αναλυτικές σχέσεις για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων της ροής κατά την διόδευση πλημμυρικών κυμάτων μετά από θραύση.

Πλήθος πειραματικών μελετών είναι διαθέσιμες στην βιβλιογραφία σχετικά με την εργαστηριακή κλίμακας ανάλυση του φαινομένου θραύσης φράγματος. Ενδεικτικά αναφέρονται οι εργασίες των Bellos et al. (1992, 2004), Soares-Frazao et al. (2007) και Aleixo et al. (2009, 2010, 2011). Όσον αφορά στις υπολογιστικές εφαρμογές, αυτές εν γένει χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: α) αυτές που είναι βασισμένες στις εξισώσεις των ρηχών υδάτων (Shallow Water Equations) ή εξισώσεις Saint-Venant, (Soulis 1992, Bellos and Hrisanthou 2011), β) αυτές που επιλύουν τις Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) εξισώσεις, (Biscarini et al. 2010, Georgoulas et al. 2012) και γ) αυτές που χρησιμοποιούν προσέγγιση μη-συνεχούς μέσου (Smooth Particle Hydrodynamics, SPH κ.τ.λ.) για την προσομοίωση της διόδευσης των πλημμυρικών κυμάτων, (Vileau and Issa 2006).

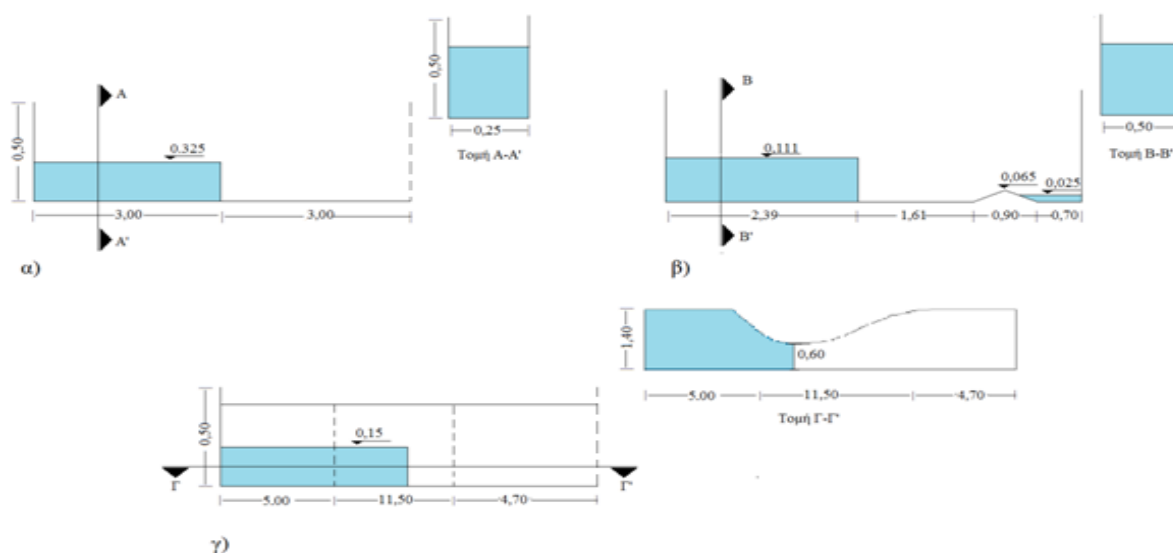
Στην παρούσα εργασία αναλύονται υπολογιστικά οι μετρήσεις από προγενέστερες πειραματικές μελέτες σχετικά με την διόδευση πλημμυρικών κυμάτων με χρήση τεχνικών Υπολογιστικής Μηχανικής Ρευστών (Computational Fluid Dynamics, CFD). Αρχικά πραγματοποιείται σύγκριση των αποτελεσμάτων της κατανομής της ταχύτητας του ύδατος που προέκυψε από τις πειραματικές μελέτες των Aleixo et al. (2009, 2010, 2011) με τα αντίστοιχα υπολογιστικά εξαγόμενα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας για διάφορα μοντέλα τύρβης. Στην συνέχεια, αναλύονται υπολογιστικά οι μετρήσεις από δύο προγενέστερες πειραματικές μελέτες, αυτές της διόδευσης πλημμυρικού κύματος πάνω από τριγωνικό αναβαθμό των Soares-Frazao et al. (2007) και της διόδευσης τους πλημμυρικού κύματος μέσω συγκλίνοντος-αποκλίνοντος αγωγού, Bellos et al. (1992). Στις εν λόγω εφαρμογές εκτός από τις συγκρίσεις με τις μετρήσεις, πραγματοποιήθηκε και σύγκριση με αντίστοιχες υπολογιστικές αναλύσεις άλλων (Bellos and Hrisanthou 2011, Soulis 1992).

2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ

Αναλύονται υπολογιστικά προγενέστερες μετρήσεις από πειραματικές μελέτες σχετικά με διόδευση πλημμυρικών κυμάτων μετά από θραύση φράγματος, με χρήση τεχνικών Υπολογιστικής Μηχανικής Ρευστών. Στις εργασίες των Aleixo et al (2009, 2010, 2011) έχουν μετρηθεί με διάφορες πειραματικές μεθόδους οι κατανομές ταχύτητας σε διάφορες θέσεις ανάντη και κατάντη ενός θυροφράγματος που προσομοιώνει την θραύση φράγματος σε ορθογωνικό αγωγό μήκους 6.0 m, ύψους 0.5 m και πλάτους 0.25 m. Το αρχικό βάθος ύδατος των πειραμάτων που χρησιμοποιήθηκαν είναι 0.325 m, το δε θυρόφραγμα τοποθετήθηκε στο μέσο του αγωγού, δηλαδή 3.0 m από το άκρο του αγωγού. Πραγματοποιήθηκαν συγκρίσεις με τα υπολογιστικά αποτελέσματα και επιλέχθηκε ένα μοντέλο τύρβης ικανοποιητικό για περαιτέρω εφαρμογές.

Στην εργασία, Soares-Frazao et al. (2007), χρησιμοποιήθηκε ένας ορθογωνικός αγωγός με 5.60 m μήκος και 0.5 m πλάτος. Στα πρώτα 2.39 m τοποθετείται νερό με βάθος 0.111 m το οποίο συγκρατείται με θυρόφραγμα. Στα κατάντη του θυροφράγματος και σε απόσταση 1.61 m από αυτό, τοποθετήθηκε ένας τριγωνικός αναβαθμός ύψους 0.0625 m, μήκους 0.90 m και κλίση πυθμένα ± 0.14 % ενώ στα κατάντη του τριγωνικού αναβαθμού βρίσκεται μια δεξαμενή μήκους 0.7 m και με βάθος νερού 0.025 m, ενώ το κατάντη όριο της δεξαμενής είναι αδιαπέρατο. Τέλος, στην εργασία, Bellos et al. (1992), χρησιμοποιήθηκε ένας συγκλίνων-αποκλίνων αγωγός μήκους 21.2 m, μέγιστου πλάτους 1.4 m και βάθους 0.5 m. Το θυρόφραγμα τοποθετήθηκε σε απόσταση από το ανάντη άκρο ίση με 8.5 m. Αναλυτική περιγραφή των συντεταγμένων του καμπύλου τμήματος μπορεί να βρεθεί, Bellos et al. (1991, 1992). Στο μέσο της στένωσης, όπου είναι και το θυρόφραγμα, το πλάτος του αγωγού είναι ίσο με 0.6 m. Το αρχικό βάθος του νερού τέθηκε ίσο 0.15 m.

Στο Σχήμα 1 φαίνονται τα σκαριφήματα των διατάξεων που εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία.



Σχήμα 1. Σκαριφήματα γεωμετριών που χρησιμοποιήθηκαν (άνευ κλίμακας σχέδια): α) Πειραματική διάταξη των Aleixo et al. (2009, 2010, 2011), β) πειραματική διάταξη των Soares-Frazao et al. (2007) και γ) πειραματική διάταξη των Bellos et al. (1992)

3. ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΡΟΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ

Η ροή ύδατος εντός των πειραματικών διατάξεων που περιγράφηκαν αναλυτικά στην Ενότητα 2, προσομοιώθηκε με αριθμητικές μεθόδους. Οι αλγόριθμοι επίλυσης που χρησιμοποιήθηκαν εμπεριέχονται στον εμπορικό επιλυτή ANSYS Fluent 14.0. Για την μοντελοποίηση της τυρβώδους ροής χρησιμοποιήθηκαν οι RANS εξισώσεις οι οποίες στην γενικότητα τους εκφράζονται ως:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\overline{\rho u_i' u_j'}) + \rho g_i \quad (3.2)$$

όπου ρ είναι η πυκνότητα, u_i είναι η μέση ταχύτητα, p είναι η μέση στατική πίεση, μ το ιξώδες του ρευστού, δ_{ij} είναι το δ του Kronecker, g_i είναι η προβολή του διανύσματος της επιτάχυνσης της βαρύτητας στον άξονα i και $-\overline{\rho u_i u_j}$ είναι οι τάσεις Reynolds.

Η προσομοίωση της τύρβης πραγματοποιήθηκε με χρήση διαφόρων μοντέλων τύρβης προκειμένου να πραγματοποιηθεί το κλείσιμο των Εξισώσεων 3.1 και 3.2 δηλαδή να προκύψει ο ίδιος αριθμός εξισώσεων και αγνώστων μέσω του προσδιορισμού των τάσεων Reynolds. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν τα μοντέλα: Standard k- ϵ , Standard k- ω , RNG k- ϵ , Reynolds Stress (7 εξισώσεων) και το V^2 -f (4 εξισώσεων), ANSYS Fluent (2012).

Σε αντίθεση με προηγούμενες εργασίες (Bellos et al. 1991, Soulis 1992, Bellos and Hrisanthou 2011), οι οποίες χρησιμοποιούσαν την προσομοίωση της διόδευσης πλημμυρικών κυμάτων με τις εξισώσεις των ρηχών υδάτων (Saint-Venant), στην παρούσα χρησιμοποιήθηκε το πολυφασικό μοντέλο Volume of Fluid (VOF) προκειμένου να προσδιορισθεί η ελεύθερη επιφάνεια της ροής. Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό επιλύονται οι παρακάτω εξισώσεις για τον προσδιορισμό των ογκομετρικών κλασμάτων του ύδατος και του αέρα σε κάθε υπολογιστικό κόμβο:

$$\frac{\partial a_w}{\partial t} + \nabla a_w \vec{u} = 0 \quad (3.3)$$

$$a_w + a_{air} = 1 \quad (3.4)$$

όπου a_w και a_{air} είναι το ογκομετρικό κλάσμα του ύδατος και του αέρα, αντίστοιχα. Ανάλογα με την τιμή που λαμβάνει το ογκομετρικό κλάσμα του νερού (a_w) σε κάθε υπολογιστικό κελί μπορεί:

- για $a_w=1$: το υπολογιστικό κελί είναι πληρωμένο με νερό.
- για $a_w=0$: το υπολογιστικό κελί είναι πληρωμένο με αέρα.
- για $0 < a_w < 1$: το υπολογιστικό κελί βρίσκεται στην διεπιφάνεια ύδατος και αέρα (ελεύθερη επιφάνεια).

Οι ιδιότητες που εμφανίζονται στις εξισώσεις των ορμών και της συνέχειας προσδιορίζονται με χρήση των ακόλουθων εξισώσεων:

$$\rho = a_w \rho_w + (1 - a_w) \rho_{air} \quad (3.5)$$

$$\mu = a_w \mu_w + (1 - a_w) \mu_{air} \quad (3.6)$$

όπου ρ_w και ρ_{air} είναι η πυκνότητα του ύδατος και του αέρα αντίστοιχα, ενώ μ_w και μ_{air} είναι το ιξώδες του νερού και του αέρα αντίστοιχα.

Για την ζεύξη πίεσης και ταχύτητας χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος SIMPLE (Patankar 1980) ενώ για την χωρική διακριτοποίηση των υπολογισμών χρησιμοποιήθηκε το «πρώτης τάξης ακρίβειας σχήμα» για όλες τις εξισώσεις που επιλέχθηκαν. Για τον υπολογισμό των κλίσεων χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος «Green-Gauss Cell Based», (ANSYS Fluent 2012).

Οι εξισώσεις επιλύθηκαν με την παραδοχή ότι η ροή είναι τρισδιάστατη, χρονικά μεταβαλλόμενη, ασυμπιεστή, τυρβώδης και ισόθερμη, ενώ η πυκνότητα του ύδατος τέθηκε ίση με 998.2 kg/m^3 . Το δυναμικό ιξώδες του ύδατος θεωρήθηκε ίσο με 0.001003

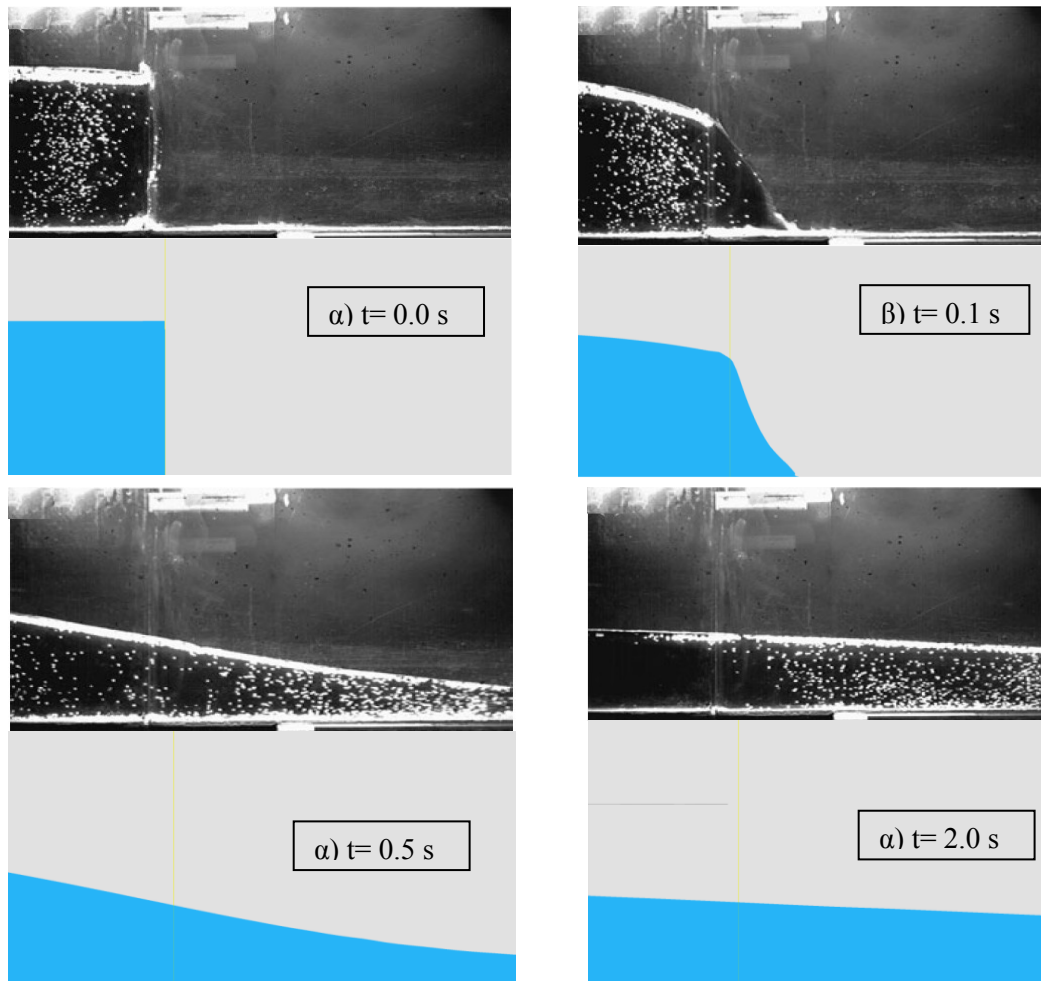
kg/m-s. Αντίστοιχα, για τον αέρα η πυκνότητα τέθηκε ίση με 1.225 kg/m^3 ενώ το δυναμικό ιξώδες $1.7894 \times 10^{-5} \text{ kg/m-s}$.

Οι οριακές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι εξής: α) για το τοίχωμα χρησιμοποιήθηκε η συνθήκη μη-ολίσθησης (no-slip condition), β) για το άνω ανοικτό μέρος του αγωγού όπως επίσης και για την έξοδο στα κατάντη του αγωγού, όπου αυτή υπάρχει, χρησιμοποιήθηκε η συνθήκη ανοικτού ορίου, γ) για την εισαγωγή του ύδατος δεν χρησιμοποιήθηκε κάποια οριακή συνθήκη εισόδου αλλά ο αρχικός ακίνητος όγκος νερού τοποθετήθηκε στα ανάντη του θυροφράγματος. Το θυροφράγμα του φράγματος για όλες τις εφαρμογές θεωρήθηκε ότι απομακρύνεται στιγμιαία την χρονική $t=0.0 \text{ s}$.

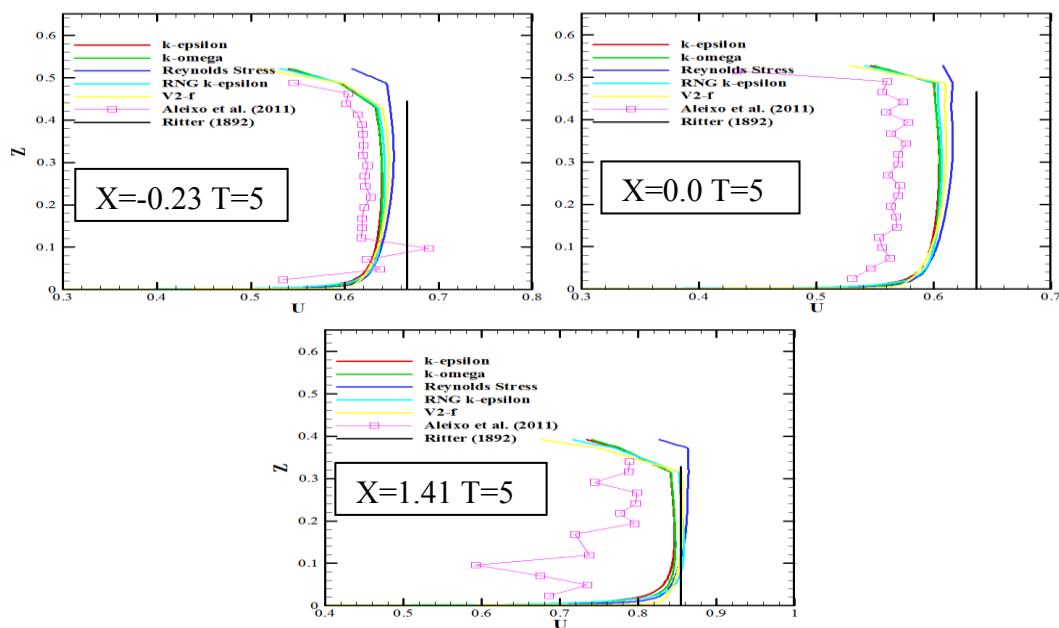
4. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο Σχήμα 2, παρουσιάζονται, σε ποιοτική σύγκριση, τα πειραματικά αποτελέσματα της ελεύθερης επιφάνειας των Aleixo et al. (2009, 2010, 2011) για αρχικό ύψος ύδατος h_0 ίσο με 0.325 m με τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας για τις χρονικές στιγμές $t=0.0, 0.1, 0.5,$ και 2.0 s . Η υπολογιστική ανάλυση φαίνεται να προβλέπει ικανοποιητικά την μορφή του σχηματιζόμενου πλημμυρικού κύματος.

Οι μετρήσεις των Aleixo et al. (2011) παρουσιάζουν την κατανομή του μέτρου της ταχύτητας. Οι μετρήσεις έγιναν με την μέθοδο Particle Tracking Velocimetry (PTV). Για την αδιαστατοποίηση χρησιμοποιούνται: η $T = t\sqrt{g/h_0}$ για τον χρόνο, η $U = u/\sqrt{gh_0}$ για την ταχύτητα (όπου u κατά περίπτωση τίθεται το μέτρο ή η εκάστοτε συνιστώσα της ταχύτητας σε m/sec και $c_0 = \sqrt{gh_0}$ η ταχύτητα αναφοράς), η $Z = h/h_0$ για το βάθος και η $X = x/h_0$ για την οριζόντια απόσταση. Στο Σχήμα 3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των κατανομής των μετρήσεων του μέτρου της ταχύτητας την χρονική στιγμή $T = 5$ ($t=0.905 \text{ s}$) για τις θέσεις $X = -0.23, X=0.00$ και $X=1.41$ σε σχέση με τα αποτελέσματα των διάφορων μοντέλων τύρβης. Το μέσο σφάλμα σε σχέση με τα πειραματικά δεδομένα για τα αντίστοιχα μοντέλα τύρβης είναι: $0.05 \times c_0$ για το Standard k- ϵ , $0.05 \times c_0$ για το Standard k- ω , $0.07 \times c_0$ για το Reynolds Stress, $0.06 \times c_0$ για το RNG k- ϵ και $0.06 \times c_0$ για το V^2 -f. Οι αντίστοιχες μέγιστες τιμές σφάλματος για τα παραπάνω εξεταζόμενα μοντέλα είναι $0.251 \times c_0$ για το Standard k- ϵ , $0.254 \times c_0$ για το Standard k- ω , $0.260 \times c_0$ για το Reynolds Stress, $0.264 \times c_0$ για το RNG k- ϵ και $0.260 \times c_0$ για το V^2 -f. Σημειώνεται ότι όλες οι μέγιστες διαφορές εμφανίζονται για την θέση $X=1.41$ και $Z \sim 0.1$, Σχήμα 3. Η μη-ικανοποιητική σύγκριση στο ανωτέρω σημείο μπορεί να αποτελεί ένδειξη σφάλματος μέτρησης ή παρεμβολής κατά την ανάλυση ή αδυναμίας του υπολογιστικού μοντέλου να προσομοιώσει με απόλυτη ακρίβεια τις συνθήκες ροής. Στο Σχήμα 3, εκτός των πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων, παρουσιάζεται η μέση ταχύτητα κατά βάθος που προβλέπει η αναλυτική εξίσωση του Ritter (1892), $Z = [(2 - X/T)/3]^2$ για το ύψος και $\bar{U} = 2(1 + X/T)/3$ για την μέση κατά βάθος ταχύτητα. Η αναλυτική λύση του Ritter φαίνεται να υπερεκτιμά την ταχύτητα του πλημμυρικού κύματος παρουσιάζοντας μέσο σφάλμα $0.082 \times c_0$ και μέγιστο σφάλμα $0.262 \times c_0$.



Σχήμα 2. Αναπαράσταση υπολογιστικών (με μπλε χρώμα) και πειραματικών (Aleixo et al. 2011) αποτελεσμάτων βάθους νερού σε διάφορες χρονικές στιγμές



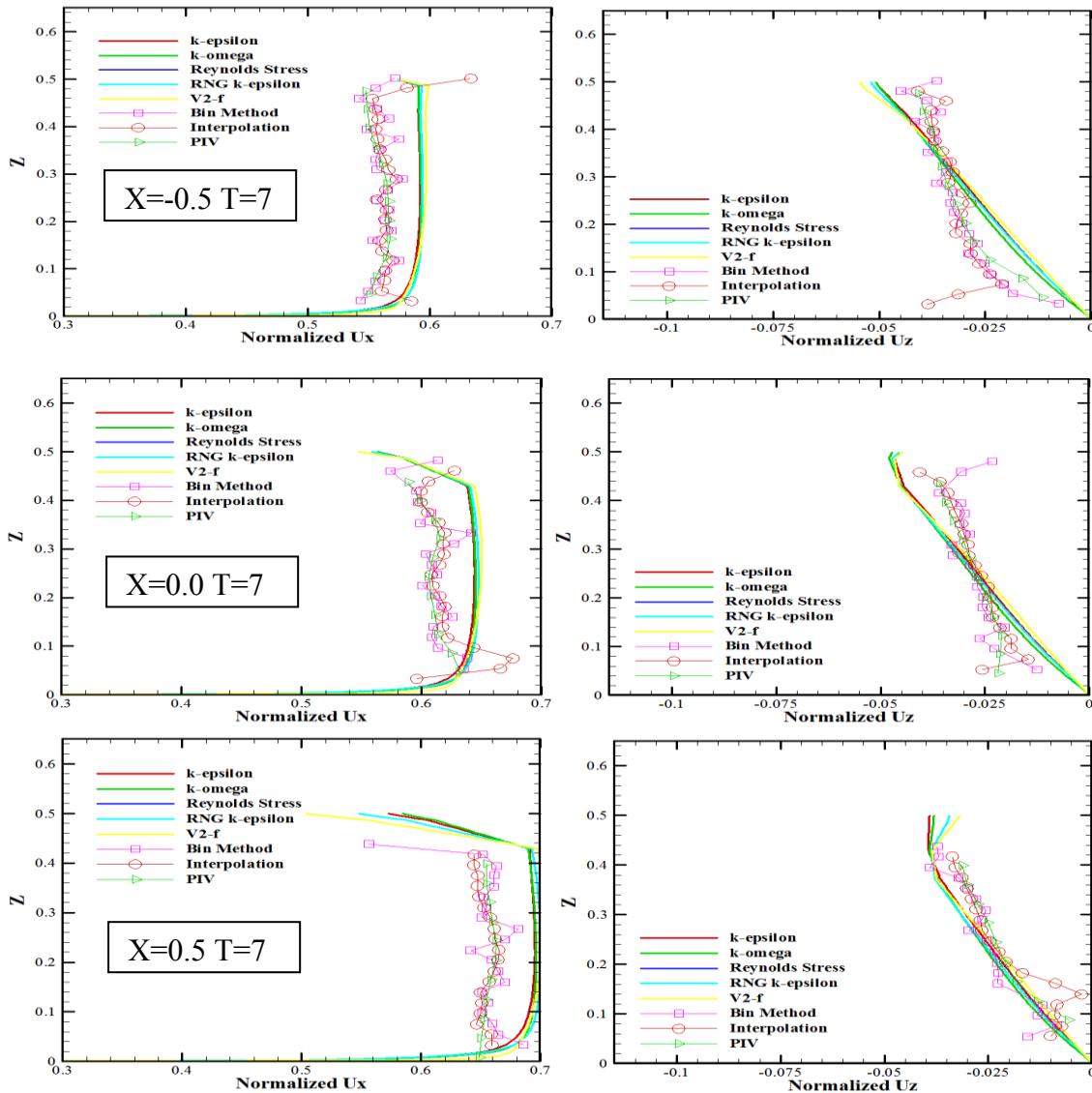
Σχήμα 3. Αποτελέσματα αδιάστατων υπολογιστικών κατανομών ταχυτήτων σε σύγκριση με μετρήσεις, Aleixo et al. (2011), και την αναλυτική επίλυση Ritter (1892)

Στο Σχήμα 4 δείχνονται τα αποτελέσματα της κατανομής της αδιάστατης οριζόντιας συνιστώσας της ταχύτητας U_x , παράλληλης στην κύρια ροή και της αντίστοιχης κάθετης ταχύτητας U_z την χρονική στιγμή $T=7$ ($t=1.268$ s) για τις θέσεις $X=-0.5$, $X=0.0$ και $X=0.5$ των πειραμάτων Aleixo et al. (2010) σε σχέση με τα αποτελέσματα των διάφορων μοντέλων τύρβης. Οι Aleixo et al. (2010) παρουσιάζουν τα αποτελέσματα των αδιάστατων κατανομών ταχύτητας τα οποία μετρήθηκαν με την μέθοδο PTV χρησιμοποιώντας δύο μεθόδους παρεμβολής την Bin Method και την Interpolation Method ενώ πραγματοποιήθηκε σύγκριση με την τεχνική Particle Image Velocimetry (PIV). Όλα τα μοντέλα τύρβης δείχνουν να περιγράφουν επαρκώς τις κατανομές των συνιστωσών της ταχύτητας. Το μέσο σφάλμα σε σχέση με τα πειραματικά δεδομένα, Bin Method, για τα αντίστοιχα μοντέλα τύρβης είναι: $0.007 \times c_0$ για το Standard k- ϵ , $0.007 \times c_0$ για το Standard k- ω , $0.008 \times c_0$ για το Reynolds Stress, $0.008 \times c_0$ για το RNG k- ϵ και $0.008 \times c_0$ για το V^2 -f. Οι αντίστοιχες μέγιστες τιμές σφάλματος για τα παραπάνω εξεταζόμενα μοντέλα είναι $0.1207 \times c_0$ για το Standard k- ϵ , $0.1209 \times c_0$ για το Standard k- ω , $0.1193 \times c_0$ για το Reynolds Stress, $0.1193 \times c_0$ για το RNG k- ϵ και $0.1187 \times c_0$ για το V^2 -f. Το μέσο σφάλμα για την προσέγγιση της οριζόντιας συνιστώσας της ταχύτητας κυμαίνεται από $0.014 \times c_0$ για το Standard k- ϵ έως $0.016 \times c_0$ για τα λοιπά μοντέλα ενώ για την αντίστοιχη κάθετη συνιστώσα το μέσο σφάλμα είναι της τάξεως του $0.002 \times c_0$ για όλα τα μοντέλα. Το ελάχιστο σφάλμα $0.0017 \times c_0$ παρουσιάζεται στο μοντέλο V^2 -f.

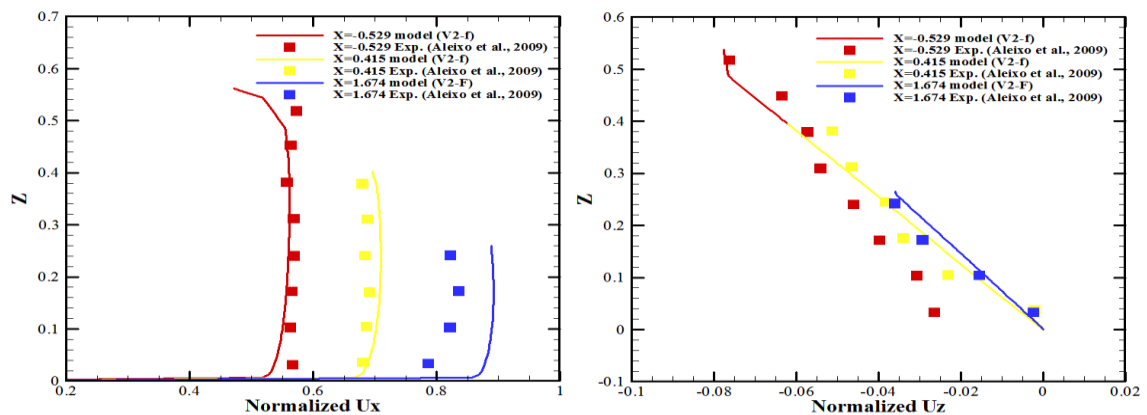
Παρατηρείται, ότι τόσο τα μέσα σφάλματα όσο και τα μέγιστα σφάλματα των μοντέλων είναι μικρότερα σε σχέση με αυτά που φαίνονται στο Σχήμα 3 για την πρόβλεψη του μέτρου της ταχύτητας. Αυτό μπορεί να οφείλεται τόσο στο γεγονός ότι στην εργασία Aleixo et al. (2011) το μέτρο της ταχύτητας προσεγγίστηκε με χρήση δισδιάστατης και όχι στερεοσκοπικής (3D) μεθόδου μέτρησης με την υπόθεση ότι η κάθετη στην διεύθυνση της ροής συνιστώσα U_y είναι μηδέν όπως επίσης και από ύπαρξη σφάλματος λόγω της χρήσης παρεμβολής για τον προσδιορισμό των κατανομών πράγμα που οφείλεται στο γεγονός ότι με την μέθοδο PTV προσεγγίζονται τα διανύσματα της ταχύτητας σε ένα αδόμητο πλέγμα και η μετατροπή του σε δομημένο γίνεται με χρήση παρεμβολών. Τέλος, στο Σχήμα 4 παρατηρείται ότι εν γένει ισχύει $U_x/U_z \ll 1$.

Στο Σχήμα 5 φαίνονται τα αποτελέσματα των κατανομών της αδιάστατης οριζόντιας συνιστώσας της ταχύτητας U_x και της U_z την χρονική στιγμή $T=5$ για τις θέσεις $X=-0.529$, $X=0.415$ και $X=1.674$ των πειραμάτων Aleixo et al. (2009) σε σχέση με τα αποτελέσματα του μοντέλου V^2 -f. Η σύγκρισή για άλλη μια φορά κρίνεται ως ικανοποιητική. Η επιλογή του μοντέλου έγινε τόσο με βάση της σχετικά καλή συμπεριφορά για την πρόβλεψη της κάθετης και της οριζόντιας συνιστώσας της ταχύτητας όσο και για την σταθερότητα της επίλυσης.

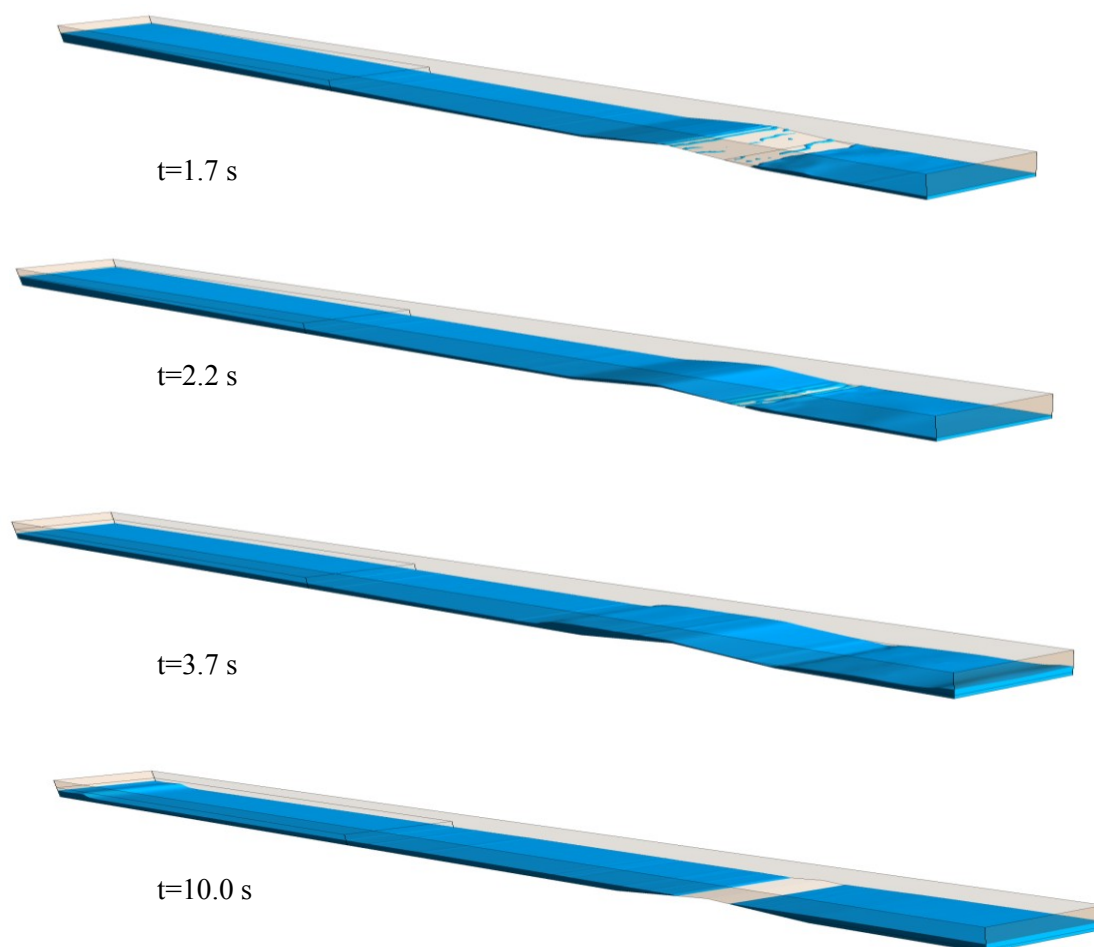
Στο Σχήμα 6 παρουσιάζεται η διάδοση του πλημμυρικού κύματος για τις χρονικές στιγμές $t=1.7$, 2.2 , 3.7 και 10.0 s στην διάταξη Soares-Frazae et al. (2007). Για την συγκεκριμένη εφαρμογή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν για το μοντέλο V^2 -f. Την χρονική στιγμή $t=1.7$ s το πλημμυρικό κύμα φθάνει στην δεξαμενή που βρίσκεται κατάντη του τριγωνικού αναβαθμού. Την χρονική στιγμή $t=2.2$ s έχει ήδη δημιουργηθεί μια πλήρης δέσμη ύδατος που υπερπηδά τον τριγωνικό αναβαθμό. Την χρονική στιγμή $t=3.7$ s το κύμα έχει ήδη ανακλαστεί στο κάθετο στερεό τοίχωμα που βρίσκεται στα κατάντη του αναβαθμού, ενώ τέλος, την χρονική στιγμή $t=10.0$ s το πλημμυρικό κύμα έχει επιστρέψει στα ανάντη του φράγματος και έχει ανακλαστεί για δεύτερη φορά στο κάθετο στερεό τοίχωμα που υπάρχει εκεί.



Σχήμα 4. Αποτελέσματα αδιάστατων υπολογιστικών κατανομών των συνιστωσών της ταχύτητας και σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα των Aleixo et al. (2010)



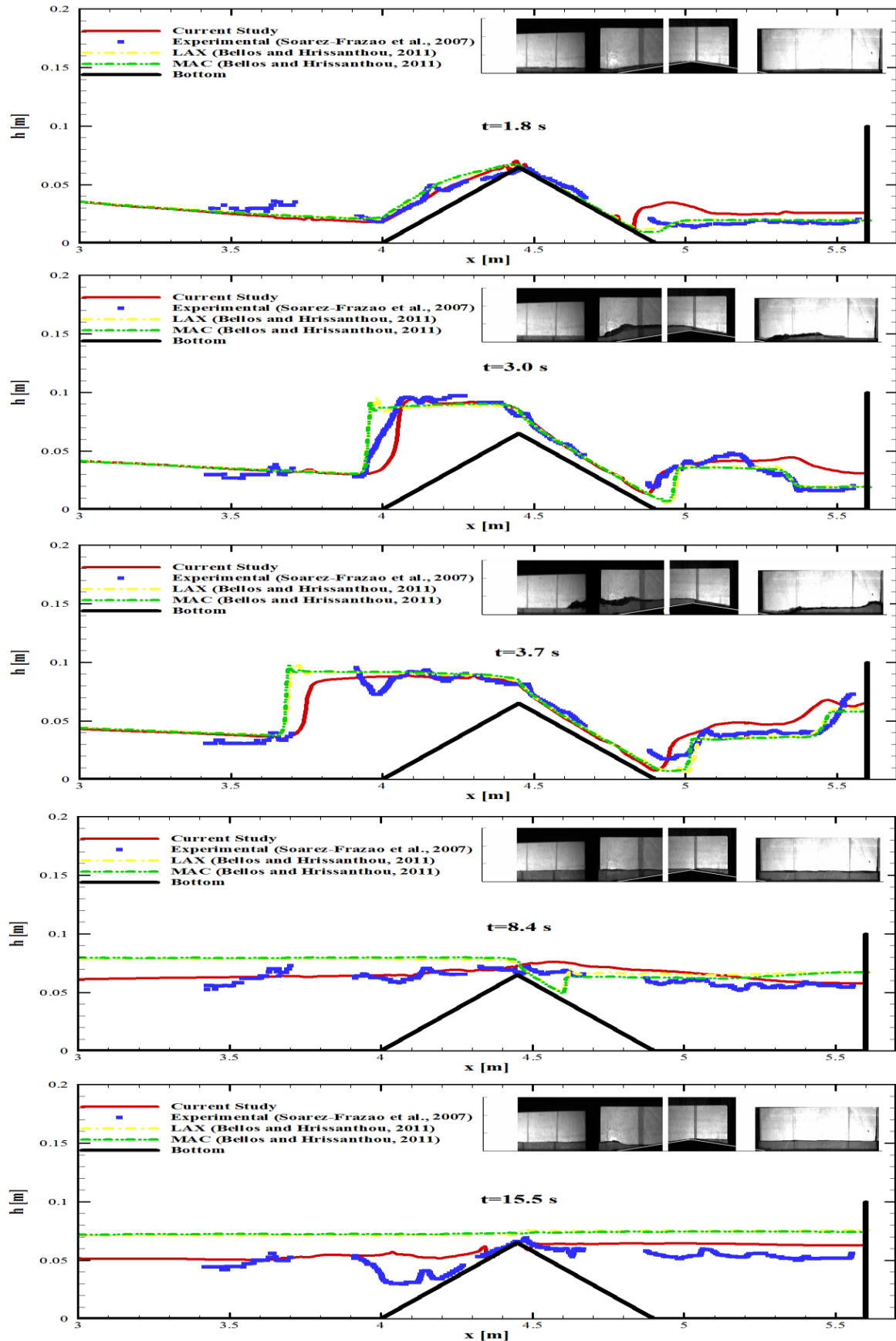
Σχήμα 5. Αποτελέσματα αδιάστατων κατανομών των συνιστωσών της ταχύτητας και σύγκριση με τα πειραματικά Aleixo et al. (2009) για την χρονική στιγμή $T=5$ και για τις θέσεις $X = -0.529, 0.415$ και 1.674



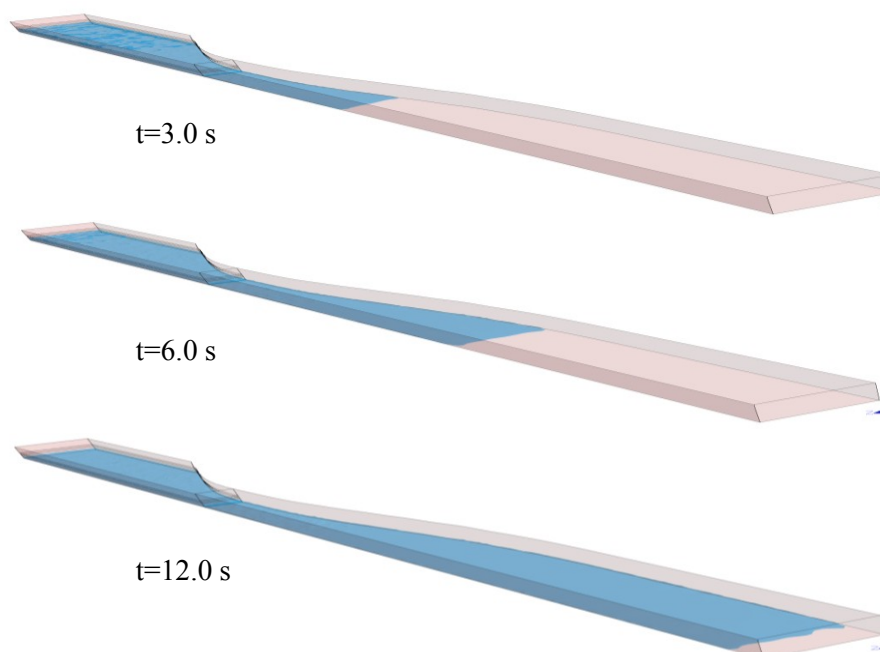
Σχήμα 6. Υπολογιστικά αποτελέσματα της διάδοσης πλημμυρικού κύματος στην διάταξη της εργασίας Soares-Frazao et al. (2007) για διάφορες χρονικές στιγμές

Στο Σχήμα 7 παρουσιάζονται τα υπολογιστικά αποτελέσματα του βάθους του ύδατος για διάφορες χρονικές στιγμές $t=1.8, 3.0, 3.7, 8.4$ και 15.5 s σε σύγκριση με τα πειραματικά (Soares-Frazao et al. 2007) και τα υπολογιστικά (Bellos and Hrisanthou 2011) όπου χρησιμοποιήθηκαν δύο αριθμητικά σχήματα, των Lax-Wendroff και του McCormack. Τα αποτελέσματα του μοντέλου V^2 -f δείχνουν να συμφωνούν με αυτά των προγενέστερων πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων. Για $t=8.4$ και 15.5 s, οι οποίες αναφέρονται σε χρονικές στιγμές μετά από την ανάκλαση του πλημμυρικού κύματος, το υπολογιστικό μοντέλο δείχνει να προβλέπει καλύτερα το βάθος του ύδατος από το μοντέλο των Bellos and Hrisanthou (2011), (εξισώσεις Saint-Venant).

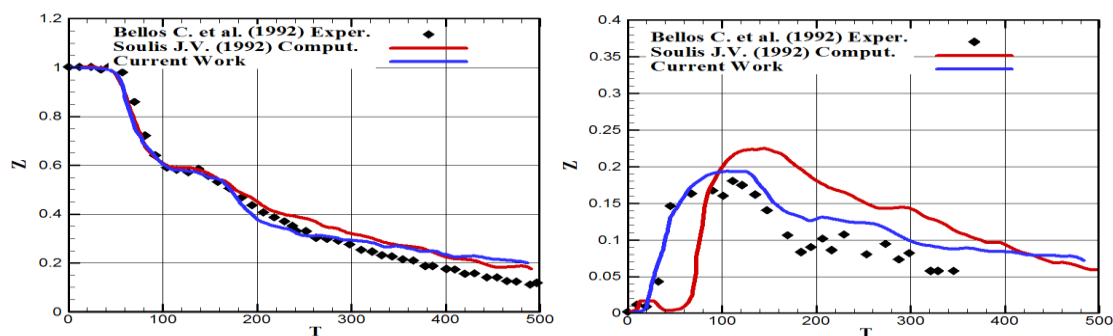
Στο Σχήμα 8 παρουσιάζεται η διάδοση του πλημμυρικού κύματος για τις χρονικές στιγμές $t=3.0, 6.0,$ και 12.0 s στην διάταξη του συγκλίνοντος-αποκλίνοντος αγωγού, Bellos et al. (1992). Στο Σχήμα 9 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αδιάστατων χρονοσειρών. Ο αδιάστατος χρόνος υπολογίζεται ως $T = t\sqrt{g/h_0}$ και το αδιάστατο βάθος ύδατος ως $Z = h/h_0$ για δύο σημεία που βρίσκονται σε απόσταση -8.5 m και $+5.0$ m από το θυρόφραγμα.



Σχήμα 7. Υπολογιστικά αποτελέσματα βάθους ύδατος πάνω από τριγωνικό αναβαθμό. Σύγκριση με μετρήσεις (Soarez-Frazao et al. 2007) και υπολογισμούς (Bellos and Hrissanthou 2011)



Σχήμα 8. Διόδευση πλημμυρικού κύματος στην διάταξη Bellos et al. (1992) για διάφορες χρονικές στιγμές



Σχήμα 9. Αποτελέσματα αδιάστατου βάθους ύδατος. Σύγκριση με μετρήσεις (Bellos et al. 1992) και υπολογισμούς, (Soulis 1992)

Τα αποτελέσματα του μοντέλου της παρούσας εργασίας δείχνουν να συμφωνούν με αυτά των προγενέστερων πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων, (Soulis 1992). Το παρόν μοντέλο μάλιστα δείχνει να προβλέπει καλύτερα το βάθος του ύδατος στα κατάντη του θυροφράγματος σε σχέση με τους υπολογισμούς, Soulis (1992), (εξισώσεις Saint-Venant).

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία αναλύονται υπολογιστικά μελέτες σχετικά με την διόδευση πλημμυρικών κυμάτων μετά από θραύση φράγματος, με χρήση αριθμητικών τεχνικών και αντίστοιχες συγκρίσεις με μετρήσεις. Προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

1. Το μοντέλο VOF προσεγγίζει ικανοποιητικά τόσο τα πειραματικά όσο και τα υπολογιστικά αποτελέσματα.
2. Η προσομοίωση RANS έδειξε να προβλέπει ικανοποιητικά τις κατανομές των μετρήσεων για όλα τα μοντέλα τύρβης που χρησιμοποιήθηκαν. Το μέσο σφάλμα

- του προσδιορισμού της παράλληλης στην ροή συνιστώσας της ταχύτητας είναι της τάξης $0.01 \times c_0$. Το μοντέλο V^2 -f παρουσίασε ικανοποιητική ακρίβεια.
3. Στην μελέτη των πειραμάτων, Aleixo et al (2009,2010,2011), φάνηκε ότι το σφάλμα του υπολογιστικού μοντέλου για τον προσδιορισμό του μέτρου της ταχύτητας είναι μεγαλύτερο από αυτό των συνιστωσών.
 4. Βάσει των εξεταζόμενων εφαρμογών, το παρόν υπολογιστικό μοντέλο αποδείχθηκε αποτελεσματικότερο σε σχέση με τα προγενέστερα-βασιζόμενα στις εξισώσεις Saint-Venant- μοντέλα, για τον προσδιορισμό του βάθους ύδατος μετά από ανάκλαση του πλημμυρικού κύματος, (Bellos and Hrissanthou 2011) αλλά και στα κατάντη του φράγματος κατά την διόδευση του πλημμυρικού κύματος, (Soulis 1992).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Aleixo R., Soares-Frazão S. and Zech Y. 2010. *Transient flow analysis by imaging methods–Voronoi particle tracking velocimetry applied to the dam-break*. Proceedings of the 5th European conference on computational fluid mechanics-ECCOMAS (CD).
- Aleixo R., Soares-Frazão S. and Zech Y. 2011. *Velocity-field measurements in a dam-break flow using a PTV Voronoi imaging technique*. Exp. Fluids, Vol. 50:1633–1649.
- Aleixo R., Spinewine B., Soares-Frazão S. and Zech Y. 2009. *Non-intrusive measurements of water surface and velocity profiles in a dam break flow*. 33rd IAHR Congress: Water Engineering for a Sustainable Environment, Vancouver, British Columbia, 6898-6905.
- ANSYS Inc., 2012. *ANSYS Fluent theory guide. Release 14.0*.
- Bellos C.V., 2004. *Experimental Measurements of Flood Wave Created by a Dam Break*. European Water, Vol. 33: 45-53.
- Bellos V. and Hrissanthou V., 2011. *Numerical simulation of a dam-break wave*. European Water, Vol. 7/8: 3-15.
- Bellos, C.V., Soulis, J.V. and Sakkas, J.G., 1992. *Experimental investigation of two-dimensional dam-break induced flows*. Journal of Hydraulic Research, Vol. 30(1): 47-63.
- Bellos, C.V., Soulis, J.V. and Sakkas, J.G.. 1991. *Computation of two-dimensional dam-break induced flows*. Computational Mechanics Publication, Vol.14 (1): 31–41.
- Biscarini, C., Francesco, S.D. and Manciola, P., 2010. *CFD modelling approach for dam-break flow studies*. Hydrology and Earth System Sciences, Vol. 14: 705-718.
- Georgoulas A., Pandremmenou A., Hrissanthou V., 2012. *3D dam-break numerical modelling*. International Conference of Protection and Restoration of the Environment XI, Thessaloniki, Greece. (accepted manuscript).
- Patankar, S.V., 1980. Numerical heat transfer and fluid flow. Hemisphere Publishing Corp., Washington, DC, 210 pp.
- Ritter A., 1892. *Die Fortpflanzung der Wasserwellen*. Verein Deutscher Ingenieure Zeitschrift, Vienna, Vol 126, np. IIa: 1489-1514 (in German).
- Soares-Frazao S., de Bueger C., Dourson V. and Zech Y. 2007. *Experiments of dam-break wave over a triangular bottom sill*. Journal of Hydraulic Research, 25 Extra Vol.: 73-86.
- Soulis., J.V., 1992. *Computation of two-dimensional dam-break flood flows*. International Journal for Numerical Methods in Fluids, Vol. 14: 631-644.
- Violeau, D. and Issa, R. 2006. *Numerical modeling of complex turbulent free surface flows with the SPH method*. International Journal for Numerical Methods in Fluids, Vol 53 (12): 277-304.

Γ

**ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ
ΥΔΡΑΥΛΙΚΑ ΕΡΓΑ
ΟΙΚΟΝΟΜΙΑ**

**Ο ΡΟΛΟΣ ΤΗΣ ΧΡΕΩΣΗΣ ΠΑΓΙΟΥ ΣΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ
ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΩΝ ΜΕΙΩΣΗΣ ΤΟΥ ΜΗ ΑΝΤΑΠΟΔΟΤΙΚΟΥ ΝΕΡΟΥ
Β. Κανακούδης, Σ. Τσιτσιφλή**

Εργαστήριο Υδρομηχανικής & Περιβαλλοντικής Τεχνικής, Τμήμα Πολιτικών
Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Πεδίον Άρεως, Βόλος

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η τιμολογιακή πολιτική που εφαρμόζουν οι περισσότερες εταιρείες ύδρευσης στην Ελλάδα, χρεώνοντας τους καταναλωτές με μία πάγια χρέωση, αποτελεί έναν από τους βασικότερους λόγους, για τους οποίους οι διαχειριστές τους δεν σχεδιάζουν στρατηγικές μείωσης του μη ανταποδοτικού νερού. Ουσιαστικά οι εταιρείες ύδρευσης, μέσα από την πάγια χρέωση, ανακτούν ένα μεγάλο μέρος του μη ανταποδοτικού νερού στο δίκτυό τους, υποβαθμίζοντας τελικά την επίπτωση των απωλειών νερού. Στην εργασία παρουσιάζεται η 2^η τροποποίηση του διεθνούς Υδατικού Ισοζυγίου της IWA, η οποία περιλαμβάνει την επίπτωση της χρήσης του παγίου μέσω της Διαφοράς Παγίου, ως διαφορά μεταξύ της κατανάλωσης που καταγράφεται και αυτής που χρεώνεται στους καταναλωτές. Αναλύεται ο τρόπος υπολογισμού της ισοδύναμης κατανάλωσης σε περίπτωση που το πάγιο εκφράζεται σε χρήματα. Παρουσιάζονται παραδείγματα δικτύων ύδρευσης από τρεις Ελληνικές πόλεις, όπου είναι προφανές ότι η χρήση του παγίου υποβαθμίζει την επίπτωση των απωλειών νερού και οδηγεί στην υποβάθμιση της αναγκαιότητας σχεδιασμού στρατηγικών μείωσης του μη ανταποδοτικού νερού.

**THE ROLE OF THE FIXED CHARGE IN DESIGNING NON
REVENUE WATER REDUCTION STRATEGIES**

V. Kanakoudis, S. Tsitsifli

Hydromechanics & Environmental Engineering Laboratory, Civil Engineering
Department, University of Thessaly, Pedion Areos, Volos

ABSTRACT

Water pricing policies in Greece, using the fixed charge is one of the major excuses water utilities are using, in order not to design and implement Non Revenue Water (NRW) reduction strategies. Fixed charge actually recovers a major part of the NRW, downgrading the water losses implications. This paper presents the 2nd IWA Water Balance modification, including the fixed charge implications through the Minimum Charge Difference (MCD). MCD is the difference between the registered actual consumption and the billed consumption. The methodology used to calculate the equivalent consumption when the fixed charge is expressed in monetary units is presented. Three Greek cases are shown where it is obvious that the fixed charge use restricts the water losses implications and leads to the necessity to design NRW reduction strategies downgrading.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η σπουδαιότητα του προβλήματος του Μη Ανταποδοτικού Νερού (νερό που δεν αποφέρει έσοδα, συμπεριλαμβανομένων και των απωλειών νερού) είναι παγκόσμια αναγνωρισμένη. Οι επιπτώσεις του είναι οικονομικές και περιβαλλοντικές, αφού αφενός οι εταιρείες ύδρευσης χάνουν έσοδα και αφετέρου το νερό, ένα πολύτιμο κοινωνικό αγαθό, χάνεται. Επίσης σε όλη την αλυσίδα παροχής νερού (άντληση, επεξεργασία, διανομή, αφαλάτωση) έχουν εκλυθεί αέρια θερμοκηπίου και διοξείδιο του άνθρακα, καθιστώντας την διαδικασία παροχής νερού μία από τις περισσότερο ενεργοβόρες διαδικασίες. Τα προβλήματα εντείνονται σε περιοχές που αντιμετωπίζουν λειψυδρία, οι οποίες αναμένεται να πληγούν και από την κλιματική αλλαγή. Τέτοιες περιοχές είναι οι χώρες της Νότιας Ευρώπης και της Μεσογείου. Είναι λοιπόν επιτακτική η ανάγκη μείωσης του μη ανταποδοτικού νερού που φτάνει ή και ξεπερνά ακόμη και το 50% του εισερχόμενου νερού στα δίκτυα ύδρευσης.

Οι εταιρείες ύδρευσης για να επιτύχουν νεκρό σημείο μεταξύ εσόδων και εξόδων χρησιμοποιούν την χρέωση παγίου, που εκφράζεται είτε σε όγκο νερού ή σε χρηματικές μονάδες. Οι περισσότερες εταιρείες ύδρευσης χρησιμοποιούν τιμολόγια αυξανόμενης χρέωσης μονάδας κατανάλωσης συμπεριλαμβανομένης της ελάχιστης χρέωσης (πάγιο). Έτσι ανακτούν ένα μέρος του κόστους του μη ανταποδοτικού νερού (σε πολλές περιπτώσεις είναι το μεγαλύτερο ποσοστό του) ανακτώντας στην πραγματικότητα το κόστος των απωλειών νερού του δικτύου τους. Τελικά τα αποτελέσματα υποβαθμίζουν τις απώλειες νερού και έτσι οι διαχειριστές των εταιρειών ύδρευσης δεν λαμβάνουν κανένα μέτρο για την μείωση των απωλειών αυτών. Η εφαρμογή της μεθοδολογίας του Διεθνούς Πρότυπου Υδατικού Ισοζυγίου της IWA στην Ελλάδα έδειξε το μέγεθος της επίδρασης της πάγιας χρέωσης στον σχεδιασμό στρατηγικών μείωσης των απωλειών. Για τον λόγο αυτό αναπτύχθηκε το 2^ο τροποποιημένο Υδατικό Ισοζύγιο της IWA.

2. ΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ ΔΙΕΘΝΕΣ ΥΔΑΤΙΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΤΗΣ IWA ΚΑΙ Η ΠΟΛΙΤΙΚΗ ΤΙΜΟΛΟΓΗΣΗΣ

Μία από τις περισσότερο αναγνωρισμένες για την αξία τους μεθοδολογίες εκτίμησης των απωλειών νερού και του μη ανταποδοτικού νερού παγκόσμια είναι το Πρότυπο Διεθνές Υδατικό Ισοζύγιο της IWA (Lambert et al., 1999) (Σχήμα 1). Το Υδατικό Ισοζύγιο καταγράφει τις ποσότητες νερού που εισέρχονται, καταναλώνονται, πληρώνονται και χάνονται σε ένα δίκτυο ύδρευσης. Το τελικό αποτέλεσμα είναι η εκτίμηση των πραγματικών (φυσικών) απωλειών που αποτελούνται από το νερό που χάνεται λόγω διαρροών, θραύσεων και υπερχειλίσεων των δεξαμενών. Η εφαρμογή της μεθοδολογίας του Υδατικού Ισοζυγίου στοχεύει στον εντοπισμό του νερού που δεν αποφέρει έσοδα στην εταιρεία (μη ανταποδοτικό νερό) και των συστατικών του. Έτσι η εταιρεία θα μπορέσει να αξιολογήσει τις απώλειές νερού του δικτύου της και να εντοπίσει τις αιτίες των απωλειών αυτών. Τέλος θα σχεδιάσει στρατηγικές για την μείωσή τους.

Αυτό όμως δεν συμβαίνει πάντα. Οι περισσότερες εταιρείες ύδρευσης στην Μεσόγειο εφαρμόζουν τιμολόγια αυξανόμενης χρέωσης μονάδας κατανάλωσης συμπεριλαμβανομένης της ελάχιστης χρέωσης (πάγιο). Αυτά τα τιμολόγια χαρακτηρίζονται από αυξανόμενη μοναδιαία τιμή χρέωσης σε κλίμακες κατανάλωσης, ενώ υπάρχει μία πάγια χρέωση η οποία δεν σχετίζεται με την κατανάλωση. Η πάγια χρέωση συναντάται ή με την μορφή χρέωσης μίας ελάχιστης ποσότητας νερού, ή με την μορφή χρέωσης ενός χρηματικού ποσού. Στην πρώτη περίπτωση αν ο καταναλωτής καταναλώσει ποσότητα μικρότερη από την ελάχιστη, χρεώνεται με την ελάχιστη ποσότητα. Αν καταναλώσει μεγαλύτερη ποσότητα νερού, τότε χρεώνεται με όλη την

ποσότητα που κατανάλωσε. Στην περίπτωση της πάγιας χρέωσης που εκφράζεται σε χρηματικό ποσό, ο καταναλωτής είτε καταναλώνει είτε όχι, χρεώνεται με το ποσό αυτό. Στο ποσό αυτό προστίθεται η αξία της ποσότητας νερού που κατανάλωσε πραγματικά. Οι εταιρείες ύδρευσης χρησιμοποιούν ουσιαστικά το μέσο της πάγιας χρέωσης για να επιτύχουν νεκρό σημείο στα έξοδά τους. Ο πραγματικός ρόλος της πάγιας χρέωσης θα έπρεπε να είναι το κόστος ευκαιρίας για την δυνατότητα που έχει ο καταναλωτής να έχει πρόσβαση σε νερό. Πόσο είναι όμως το κόστος ευκαιρίας, πώς υπολογίζεται και ποια τιμολογιακή πολιτική είναι κοινωνικά δίκαιη;

2.1. Η 1^η ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ΤΗΣ ΙWA

Η εφαρμογή του Διεθνούς Υδατικού Ισοζυγίου στην Νότια Αφρική οδήγησε στην 1^η τροποποίησή του ώστε να χρησιμοποιηθεί σε αναπτυσσόμενες χώρες, όπως η Νότια Αφρική (McKenzie et al., 2007). Η τροποποίηση αυτή εισαγάγει για πρώτη φορά την οικονομική διάσταση του ογκομετρικού Υδατικού Ισοζυγίου της ΙWA. Συγκεκριμένα αφορά στην κατάτμηση του Ανταποδοτικού Νερού σε τρία συστατικά (Σχήμα 1):

1. Το Ελεύθερο Βασικό Ανταποδοτικό Νερό (Free Basic): θεωρείται τιμολογούμενο και πληρωτέο με μηδενική τιμή,
2. Το Ανακτώμενο Ανταποδοτικό Νερό (Recovered Revenue): είναι τιμολογούμενο και πληρώνεται στην τιμή χρέωσης,
3. Το Μη Ανακτώμενο Νερό (Non Recovered): αυτή η κατανάλωση δεν αποφέρει έσοδα στην εταιρεία ύδρευσης, αφού υπάρχει τιμολογούμενη κατανάλωση η οποία τελικά δεν πληρώνεται, ούτε υπάρχει πιθανότητα πληρωμής. Αυτό είναι σύνηθες φαινόμενο σε χώρες όπως η Νότια Αφρική, που οι άνθρωποι δεν έχουν την οικονομική δυνατότητα να πληρώσουν για βασικά αγαθά. Τελικά αυτή η ποσότητα προστίθεται στο Μη Ανταποδοτικό Νερό.

Διεθνές Πρότυπο Υδατικό Ισοζύγιο της ΙWA (Lambert et al., 1999)					1 ^η Τροποποίηση (McKenzie et al., 2007)
Εισερχόμενο Νερό στο Δίκτυο	Εξουσιοδοτημένη Κατανάλωση	Τιμολογούμενη Εξουσιοδοτημένη Κατανάλωση	Τιμολογούμενη Μετρούμενη Κατανάλωση	Ανταποδοτικό Νερό	Βασική Κατανάλωση (χωρίς χρέωση)
			Τιμολογούμενη μη- Μετρούμενη Κατανάλωση		Νερό που πωλείται και αποδίδει έσοδα (εισπράττεται)
		Μη-Τιμολογούμενη Εξουσιοδοτημένη Κατανάλωση	Μη-Τιμολογούμενη Μετρούμενη Κατανάλωση	μη Ανταποδοτικό Νερό (NRW)	Νερό που ΔΕΝ πωλείται και ΔΕΝ αποδίδει έσοδα (ΔΕΝ εισπράττεται)
			Μη-Τιμολογούμενη μη-Μετρούμενη Κατανάλωση		
	Απώλειες Νερού	Φαινόμενες Απώλειες Νερού	Μη-Εξουσιοδοτημένη Κατανάλωση	Πραγματικές Απώλειες Νερού	
			Λάθη Μετρήτων /Μετρήσεων		

Σχήμα 1: Το Υδατικό Ισοζύγιο (IWA) & η 1^η τροποποίησή του

Η 1^η τροποποίηση του Υδατικού Ισοζυγίου εισάγει την οικονομική διάσταση αφού χωρίζει την τιμολογούμενη κατανάλωση σε αυτή που πραγματικά εισπράττει η εταιρεία και σε αυτή που δεν εισπράττει.

2.2. Η 2^η ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ΤΗΣ IWA

Ένα από τα βασικά προβλήματα που αντιμετωπίζεται στον υπολογισμό του υδατικού ισοζυγίου παγκόσμια είναι η μη διαθεσιμότητα των απαραίτητων μεταβλητών. Μία μελέτη περίπτωσης στο Sao Paolo (Paracampas & Thornton, 2002) έδειξε ότι η ποιότητα των απαραίτητων στοιχείων και οι τεχνικές συλλογής τους είναι κρίσιμοι παράγοντες για τον υπολογισμό των δεικτών απόδοσης. Κατά τη διάρκεια ενός έργου συγκριτικής αξιολόγησης στην Αυστρία (Kolbl et al. 2006, Theuretzbacher-Fritz et al. 2005) η αξιοπιστία και η ακρίβεια των δεδομένων αναδείχθηκε σαν ένα βασικό ζήτημα. Από την εφαρμογή αυτή φάνηκε καθαρά η αδυναμία των εταιρειών ύδρευσης να συλλέγουν και να διατηρούν τα απαραίτητα στοιχεία. Ο Pearson (2009) πρότεινε ότι η διαθεσιμότητα και η ποιότητα των στοιχείων είναι κρίσιμοι παράγοντες για τον σχεδιασμό στρατηγικών αντιμετώπισης των προβλημάτων. Έτσι, προκειμένου να ελέγχεται η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων, προτάθηκε η χρήση των επιπέδων εμπιστοσύνης. Οι Morrison (2002) και Lambert & Morrison (1996) διαπίστωσαν ότι οι εταιρείες ύδρευσης δεν διατηρούν τα απαραίτητα στοιχεία. Αυτό το φαινόμενο αντιμετωπίστηκε από τους τελευταίους κατά τη διάρκεια της αξιολόγησης δικτύων ύδρευσης στην Θεσσαλονίκη, όπου πολλά από τα στοιχεία δεν ήταν διαθέσιμα. Οι Guibentif et al. (2007) πρότειναν ότι το προσωπικό της εταιρείας ύδρευσης που εμπλέκεται στην διαδικασία εκτίμησης του υδατικού ισοζυγίου θα έπρεπε να έχει πρόσβαση σε αυτές τις πληροφορίες. Παρόμοιο πρόβλημα έλλειψης στοιχείων αντιμετωπίστηκε στη διαδικασία εκτίμησης του υδατικού ισοζυγίου και σε περιπτώσεις στην Ελλάδα (Tsitsifli & Kanakoudis, 2009).

Η εφαρμογή του Υδατικού Ισοζυγίου σε περιπτώσεις στην Ελλάδα και στην Μεσόγειο γενικότερα, έδειξε ότι υπάρχουν τοπικά χαρακτηριστικά και πολιτικές που δημιουργούν προβλήματα στον υπολογισμό του Υδατικού Ισοζυγίου. Τέτοια προβλήματα συμπεριλαμβάνουν:

1. Την μη διαθεσιμότητα ή την αναξιοπιστία πολλών στοιχείων που είναι απαραίτητα για τον υπολογισμό του υδατικού ισοζυγίου και των βασικών δεικτών απόδοσης. Τέτοια στοιχεία είναι η μη εξουσιοδοτημένη κατανάλωση, τα σφάλματα των μετρητών (θετικά ή αρνητικά), η μη τιμολογούμενη μη μετρούμενη κατανάλωση, ο αριθμός συνδέσεων των καταναλωτών, το μέσο μήκος των συνδέσεων των καταναλωτών κ.ά.
2. Οι τιμολογιακές πολιτικές που εφαρμόζουν οι εταιρείες ύδρευσης χρεώνοντας στους πελάτες μία πάγια χρέωση (είτε σε κυβικά μέτρα νερού ή σε ευρώ), δίνουν την εντύπωση χαμηλότερων επιπέδων του μη ανταποδοτικού νερού. Έτσι αποτελούν μία δικαιολογία για τους διαχειριστές των συστημάτων παροχής νερού, οι οποίοι δεν λαμβάνουν κανένα μέτρο μείωσης του μη ανταποδοτικού νερού.

Το πρόβλημα της έλλειψης των στοιχείων στην Ελλάδα αντιμετωπίστηκε προσωρινά, προκειμένου να υπολογιστεί το Υδατικό Ισοζύγιο, με την χρήση παραδοχών. Οι παραδοχές βασίζονται στην διεθνή και στην εθνική βιβλιογραφία και στην εμπειρία των διαχειριστών των δικτύων ύδρευσης. Οι προτάσεις προς τις εταιρείες ύδρευσης αφορούν στην διερεύνηση των στοιχείων που δεν είναι διαθέσιμα. Αυτό μπορεί να γίνει εφαρμόζοντας πιλοτικά προγράμματα μετρήσεων σε περιοχές που είναι αντιπροσωπευτικές.

Το 2^ο πρόβλημα που αφορά στο πάγιο αντιμετωπίστηκε με την πρόταση της 2^{ης} τροποποίησης του Υδατικού Ισοζυγίου της IWA (Kanakoudis & Tsitsifli, 2010). Στόχος της τροποποίησης αυτής είναι η μετατροπή του ογκομετρικού Υδατικού Ισοζυγίου της IWA σε πλήρως οικονομικό ενσωματώνοντας την 1^η τροποποίηση των McKenzie et al. (2007). Η διαφορά παγίου αφορά στην διαφορά μεταξύ της κατανάλωσης που τιμολογείται και της κατανάλωσης που καταγράφεται πραγματικά στα υδρόμετρα των καταναλωτών. Στην περίπτωση που το πάγιο εκφράζεται σε

χρηματικές μονάδες, η διαφορά παγίου αφορά στην ισοδύναμη κατανάλωση νερού, που αν πουλιόταν θα απέφερε τα ίδια έσοδα στην εταιρεία ύδρευσης. Αφαιρώντας από το μη ανταποδοτικό νερό την διαφορά παγίου προκύπτει το λογιστικό μη ανταποδοτικό νερό. Οι διαχειριστές των δικτύων θεωρούν σαν μη ανταποδοτικό νερό το λογιστικό μη ανταποδοτικό νερό. Έτσι έχουν την εντύπωση ότι το μη ανταποδοτικό νερό είναι πολύ μικρότερο σε ποσότητα από ότι πραγματικά. Η διαφορά παγίου με άλλα λόγια εκφράζει τις απώλειες νερού των οποίων η αξία ανακτάται μέσα από το πάγιο.

Διεθνές Πρότυπο Υδατικό Ισοζύγιο της IWA (Lambert et al., 1999)				1 ^η Τροποποίηση (McKenzie et al., 2007)	2 ^η Τροποποίηση (Kanakoudis & Tsitsifli, 2010)	
Εισερχόμενο Νερό στο Δίκτυο (A3)	Εξουσιοδοτημένη Χρήση (A14=A10+A13)	Τιμολογούμενη Εξουσιοδοτημένη Χρήση (A10=A8+A9)	Τιμολογούμενη Μετρούμενη Χρήση (A8)	Νερό που πωλείται και αποδίδει έσοδα (εισπράττεται) (A20=A8+A9-A23)	Νερό που πωλείται και αποδίδει έσοδα (εισπράττεται) (A24=A8+A9-A23)	
			Τιμολογούμενη μη-Μετρούμενη Χρήση (A9)	Νερό που πωλείται και ΔΕΝ αποδίδει έσοδα (δεν εισπράττεται/ apparent NRW) (A23)	Νερό που πωλείται και ΔΕΝ αποδίδει έσοδα (δεν εισπράττεται/ apparent NRW) (A23)	
	Απώλειες Νερού (A15=A3-A14)	Φαινόμενες Απώλειες Νερού (A18=A16+A17)	Μη-Τιμολογούμενη Εξουσιοδοτημένη Χρήση (A13=A11+A12)	Μη-Τιμολογούμενη Μετρούμενη Χρήση (A11)	Νερό που δεν πωλείται και δεν αποδίδει έσοδα (μη Ανταποδοτικό Νερό/real NRW) (A21=A3-A20-A23)	Λογιστικό μη ανταποδοτικό νερό (Accounted for NRW) (A26=A21-A25)
				Μη-Τιμολογούμενη μη-Μετρούμενη Χρήση (A12)		
		Μη-Εξουσιοδοτημένη Χρήση (A16)	Μη-Εξουσιοδοτημένη Χρήση (A16)			
		Λάθη Μετρητών /Μετρήσεων (A17)	Λάθη Μετρητών /Μετρήσεων (A17)			
	Πραγματικές Απώλειες Νερού (A19=A15-A18)			Απώλειες Νερού που αποδίδουν έσοδα (Διαφορά Παγίου) (A25)		

Σχήμα 2: Το Υδατικό Ισοζύγιο (IWA), η 1^η και η 2^η τροποποίηση του

Η ανάγκη για τροποποίηση του Υδατικού Ισοζυγίου της IWA ξεκίνησε κατά την εφαρμογή του σε εταιρεία ύδρευσης στην Ελλάδα. Η εταιρεία χρέωνε στους καταναλωτές μεγαλύτερη ποσότητα νερού από αυτή που κατέγραφαν οι υδρομετρητές. Το δίλημμα ήταν να εντοπιστούν οι ποσότητες νερού που αντιστοιχούσαν στα συστατικά του υδατικού ισοζυγίου. Αν η ποσότητα νερού που χρεώνει η εταιρεία είναι η τιμολογούμενη μετρούμενη κατανάλωση, τότε οι απώλειες νερού μειώνονται. Αυτό συμβαίνει γιατί η τιμολογούμενη μετρούμενη κατανάλωση αντιστοιχεί στην κατανάλωση που πραγματικά καταγράφηκε και όχι στην κατανάλωση που τιμολογήθηκε. Έτσι η εταιρεία υποεκτιμά τις απώλειες νερού που παρουσιάζονται στο δίκτυο της και δεν λαμβάνει τα κατάλληλα μέτρα για να τις αντιμετωπίσει. Η κατανάλωση που προκύπτει από την Διαφορά Παγίου δεν είναι πραγματική, αλλά κατανάλωση την οποία πληρώνει ο καταναλωτής σαν κόστος ευκαιρίας. Έτσι δημιουργήθηκε η ανάγκη για την 2^η τροποποίηση του Υδατικού Ισοζυγίου της IWA. Οι Kanakoudis & Tsitsifli (2010), πρότειναν την εισαγωγή της Διαφοράς παγίου στο υδατικό ισοζύγιο, ενσωματώνοντας παράλληλα την 1^η τροποποίηση των McKenzie et al. (2007) (Σχήμα 2). Έτσι το Υδατικό Ισοζύγιο της IWA από πλήρως ογκομετρικό έγινε πλήρως οικονομικό. Η 2^η τροποποίηση του Υδατικού Ισοζυγίου (Kanakoudis & Tsitsifli, 2010) εισάγει την έννοια της Διαφοράς Παγίου που ουσιαστικά αφορά σε απώλειες νερού των οποίων την αξία ανακτά η εταιρεία ύδρευσης.

2.3. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΔΙΑΦΟΡΑΣ ΠΑΓΙΟΥ

Το πάγιο εκφράζεται με δύο τρόπους στα τιμολόγια νερού: (α) σαν ελάχιστη κατανάλωση (σε m³) και (β) ελάχιστη πάγια χρέωση (σε €).

2.3.1. Το πάγιο εκφράζεται σε m³

Όταν το πάγιο εκφράζεται σαν ελάχιστη κατανάλωση σε m³, η διαφορά παγίου εκφράζει τον όγκο νερού (σε m³) που πωλείται αλλά δεν καταναλώνεται πραγματικά από τους χρήστες νερού. Τότε η διαδικασία υπολογισμού είναι η εξής:

Αν Q_{tot}^{used} είναι η συνολική ποσότητα καταναλισκόμενου νερού και αν Q_{tot}^{billed} είναι η συνολική ποσότητα τιμολογούμενου νερού, τότε η Διαφορά Παγίου (Minimum Charge Difference – MCD) είναι:

$$MCD = Q_{tot}^{billed} - Q_{tot}^{used} \quad (2.1)$$

2.3.2. Το πάγιο εκφράζεται σε €

Όταν το πάγιο εκφράζεται σε € και συμπεριλαμβάνεται στο τιμολόγιο νερού, τότε η Διαφορά Παγίου εκφράζει τον ισοδύναμο όγκο νερού (σε m³) που αν πουλιόταν στην τιμή του νερού (εξαιρουμένων των παγίων) θα είχε σαν αποτέλεσμα τα ίδια έσοδα (σε €). Η διαδικασία υπολογισμού είναι η εξής:

Τα συνολικά έσοδα R (€) που σχετίζονται με το νερό που πωλείται (και τις σχετικές υπηρεσίες νερού), αποτελούνται από τα έσοδα του παγίου και τα έσοδα από την πώληση του νερού:

$$R = Rfc + Rwic \quad (2.2)$$

Όπου Rfc είναι τα έσοδα (σε €) που σχετίζονται με το πάγιο κόστος και $Rwic$ είναι τα έσοδα (σε €) που σχετίζονται με το νερό που πουλήθηκε.

Ο συνολικός όγκος του νερού (σε m³) που εισέρχεται στο σύστημα αποτελείται από:

$$Q_{wst} = Q_{ws} + Q_{wns} \Rightarrow Q_{ws} = Q_{wst} - Q_{wns} \quad (2.3)$$

όπου: Q_{wst} είναι ο εισερχόμενος όγκος νερού στο σύστημα (σε m³ – η μεταβλητή A3 της IWA),

Q_{ws} είναι ο όγκος νερού που πουλήθηκε (σε m³),

Q_{wns} είναι ο όγκος νερού (σε m³) που δεν πουλήθηκε για διάφορους λόγους, π.χ. διαρροές, θραύσεις, κλοπή νερού, μηδενική χρέωση, κλπ.

Ένα μέρος του όγκου νερού που πουλήθηκε, αποφέρει έσοδα στην εταιρεία, ενώ το υπόλοιπο δεν αποφέρει έσοδα:

$$Q_{ws} = Q_{wsp} + Q_{wnp} \quad (2.4)$$

όπου: Q_{wsp} είναι ο όγκος νερού (σε m³) που πωλείται και αποφέρει έσοδα,

Q_{wnp} είναι ο όγκος νερού που πωλείται (σε m³) αλλά δεν αποφέρει έσοδα στην εταιρεία.

Η μέση χρέωση χρήσης νερού $Awic$ (σε €/m³) είναι:

$$Awic = Rwic / Q_{wsp} \quad (2.5)$$

Τα μέσα έσοδα νερού A ($\text{€}/\text{m}^3$) είναι μεγαλύτερα από την μέση χρέωση χρήσης νερού.

$$A = R / Q_{wsp} \quad (2.6)$$

Έτσι η Διαφορά Παγίου (MCD) σε m^3 είναι:

$$MCD = Rfc / (Rwuc / Q_{wsp}) \quad (2.7)$$

2.4. Η ΚΟΙΝΩΝΙΚΑ ΔΙΚΑΙΗ ΑΙΤΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΠΑΓΙΟΥ

Τα τιμολόγια νερού αποτελούνται από διάφορες χρεώσεις. Υπάρχουν χρεώσεις που αφορούν σε φόρους προς το κράτος και χρεώσεις που αφορούν σε πολιτικές που εφαρμόζουν οι εταιρείες ύδρευσης. Οι συνήθεις χρεώσεις στα τιμολόγια ύδρευσης που αφορούν στην ύδρευση είναι το πάγιο, η χρέωση συντήρησης υδρομετρητών, το ειδικό τέλος για την μελέτη και κατασκευή έργων και το τέλος σύνδεσης. Για την διαμόρφωση μιας κοινωνικά δίκαιης τιμολογιακής πολιτικής πρέπει να βρεθεί το κόστος στο οποίο αντιστοιχεί το πάγιο, έτσι ώστε ο καταναλωτής να επιθυμεί να το πληρώσει. Το πάγιο πρέπει να σχετίζεται με το κόστος ευκαιρίας του καταναλωτή να έχει πρόσβαση στο νερό. Για παράδειγμα για να έχει πρόσβαση ο καταναλωτής στο νερό πρέπει να υπάρχει ένα δίκτυο μεταφοράς και διανομής, πρέπει να υπάρχει μία εταιρεία διαχείρισης κλπ. Το πάγιο κόστος στην Ελλάδα συνήθως καλύπτει ένα μέρος ή το σύνολο των παρακάτω δύο κατηγοριών δαπανών της εκάστοτε εταιρείας ύδρευσης:

- Δαπάνες μη σχετιζόμενες με την ποσότητα του νερού που χρησιμοποιεί ο καταναλωτής, π.χ. συντήρηση μετρητών, τέλος σύνδεσης καταναλωτή. Αυτό είναι το λεγόμενο «κόστος ευκαιρίας» που ο καταναλωτής πρέπει να πληρώσει.
- Δαπάνες που σχετίζονται (αναλογικά) με την ποσότητα του νερού που χρησιμοποιεί ο καταναλωτής, π.χ. κόστη σχετικά με την επιδιόρθωση των αγωγών του δικτύου, κλπ. Αυτά τα κόστη πρέπει να ενσωματωθούν στην τιμή πώλησης του νερού.

Υπάρχουν επίσης κόστη, όπως για πυρόσβεση (χωρίς χρέωση), για δημόσια χρήση (χωρίς χρέωση), κλπ. που πρέπει να ενσωματωθούν στο πάγιο κόστος (το κόστος ευκαιρίας). Άλλα κόστη, όπως το κόστος για ξέπλυμα αγωγών/δεξαμενών πρέπει να ενσωματωθούν στην τιμή πώλησης του νερού. Αυτά τα κόστη αφορούν στο δείκτη «ποσοστού χρήσης του δικτύου». Έτσι το πάγιο κόστος που είναι κοινωνικά δίκαιο να πληρώνει ο καταναλωτής αφορά στο «κόστος ευκαιρίας». Αυτό πρέπει να αποτελείται από το κόστος συντήρησης των υδρομετρητών, το κόστος σύνδεσης του καταναλωτή με το δίκτυο, κόστη σχετιζόμενα με τη πυρόσβεση, την δημόσια χρήση, κλπ.

3. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ

Για να διαπιστωθεί η σημασία του παγίου στην λανθασμένη εκτίμηση του μη ανταποδοτικού νερού στα δίκτυα ύδρευσης, παρατίθενται τρεις περιπτώσεις ΔΕΥΑ. Η πρώτη είναι η ΔΕΥΑ Λάρισας, η δεύτερη η ΔΕΥΑ της Κω και η τρίτη η ΔΕΥΑ της Κοζάνης. Να σημειωθεί ότι η ανάλυση αφορά στις τρεις αυτές ΔΕΥΑ πριν την εφαρμογή του σχεδίου «Καλλικράτης». Η πρώτη και η τρίτη ΔΕΥΑ αφορούν ηπειρωτικές περιοχές και σχετικά μεγάλες πόλεις με σταθερή ζήτηση νερού στη διάρκεια του έτους. Η περίπτωση της ΔΕΥΑ Κω παρουσιάζει την ιδιομορφία της μεγάλης αύξησης της ζήτησης το καλοκαίρι λόγω του τουρισμού. Στην περίπτωση της ΔΕΥΑ Κω η ανάλυση έγινε ανά δίμηνο, ώστε να δειχθεί η επίδραση των αιχμών της ζήτησης στο μη ανταποδοτικό νερό. Τα βασικά χαρακτηριστικά των τριών ΔΕΥΑ

παρουσιάζονται στον πίνακα 1. Στις περιπτώσεις της Λάρισας και της Κω το πάγιο εκφράζεται σε m^3 και είναι $20 m^3$ ανά δίμηνο για την Λάρισα και $8 m^3$ ανά δίμηνο για την Κω. Στην περίπτωση της Κοζάνης είναι 17€ ανά τετράμηνο.

Πίνακας 1: Βασικά χαρακτηριστικά των 3 περιπτώσεων

ΔΕΥΑ	Εξυπηρετούμενος πληθυσμός	Μήκος δικτύου (Km)	Αριθμός υδρομέτρων	Πάγιο
Λάρισας	192.000	628	72.000	20 m^3 /2μηνο
Κω	18.000 (χειμώνα), 40.000 (καλοκαίρι)	122	13.000	8 m^3 /2μηνο
Κοζάνης	35.942	129,5	28.281	17€/4μηνο

3.1. Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ ΔΕΥΑ ΛΑΡΙΣΑΣ

Η Λάρισα είναι μία πόλη που βρίσκεται στην ανατολική ηπειρωτική Ελλάδα. Το δίκτυο ύδρευσης της εξυπηρετεί 192.000 κατοίκους με 72.000 υδρόμετρα (στοιχεία 2006). Το δίκτυο της έχει μήκος 628 Km και οι αγωγοί που το αποτελούν είναι από αμιαντοσιμέντο, χυτοσίδηρο, χάλυβα, PVC και PE. Μετά το 2004 η ΔΕΥΑ της Λάρισας ξεκίνησε μία προσπάθεια διαχείρισης της πίεσης του δικτύου της εγκαθιστώντας βαλβίδες μείωσης πίεσης (pressure reduction valves – PRVs). Η ΔΕΥΑΛ παρακολουθεί το δίκτυό της με σύστημα τηλεέγχου - τηλεχειρισμού SCADA. Οι υδατικοί πόροι που χρησιμοποιούνται για την υδροδότηση της πόλης είναι υπόγειοι. Η υδροδότηση γίνεται με βαρύτητα. Η μέση πίεση λειτουργίας είναι 3,6 atm. Η εκτίμηση του Υδατικού Ισοζυγίου για την Λάρισα έγινε για τα έτη 2001 έως 2006 σε ετήσια βάση. Τα προβλήματα που αντιμετωπίστηκαν για την περίπτωση της Λάρισας αφορούσαν την μη διαθεσιμότητα στοιχείων για την μη τιμολογούμενη μη μετρούμενη χρήση, την μη εξουσιοδοτημένη κατανάλωση και τα σφάλματα μετρήσεων/μετρητών. Έτσι χρησιμοποιήθηκαν παραδοχές. Η μη τιμολογούμενη μη μετρούμενη κατανάλωση θεωρήθηκε ότι είναι μηδενική αφού η ΔΕΥΑ μετράει την μη τιμολογούμενη κατανάλωση. Η μη εξουσιοδοτημένη κατανάλωση θεωρήθηκε ότι είναι το 1% του εισερχόμενου νερού στο δίκτυο (Kanakoudis & Tolikas, 2001) και τα σφάλματα μετρητών/μετρήσεων ότι είναι το 5% του εισερχόμενου νερού στο δίκτυο (Kanakoudis & Tolikas, 2001; Georgiadis & Kanellopoulou, 2008). Για να διαπιστωθεί η επίδραση των παραδοχών έγινε και ανάλυση ευαισθησίας.

3.2. Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ ΔΕΥΑ ΚΩ

Η Κως είναι η πρωτεύουσα του ομώνυμου νησιού που βρίσκεται στο νοτιο-ανατολικό Αιγαίο και είναι πολύ γνωστός τουριστικός προορισμός. Ο πληθυσμός του νησιού υπερδιπλασιάζεται τους καλοκαιρινούς μήνες. Η Κως έχει περίπου 18.000 μόνιμους κατοίκους που το καλοκαίρι ξεπερνούν τους 40.000. Ο πληθυσμός της πόλης της Κω υδροδοτείται μέσα από ένα δίκτυο 122 km με 13.000 υδρόμετρα (στοιχεία του 2008). Η μέση πίεση λειτουργίας είναι 3 atm. Η ΔΕΥΑ της Κω δεν λαμβάνει κανένα μέτρο για την μείωση του μη ανταποδοτικού νερού και την διαχείριση του δικτύου της. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε σε επίπεδο διμήνων από το 2000 ως το 2008, και όχι σε ετήσια βάση για να μην εξομαλυνθούν οι αιχμές της ζήτησης και οι επιπτώσεις τους στο υδατικό ισοζύγιο. Το βασικότερο πρόβλημα στο δίκτυο της ΔΕΥΑ Κω είναι η μη διαθεσιμότητα των στοιχείων, όπως και στη ΔΕΥΑ Λάρισας. Τα στοιχεία για τα οποία τελικά έγιναν παραδοχές αφορούν στην μη τιμολογούμενη μη μετρούμενη κατανάλωση, στην μη εξουσιοδοτημένη κατανάλωση και στα σφάλματα των μετρητών /μετρήσεων. Έγιναν οι ίδιες παραδοχές όπως και στην περίπτωση της Λάρισας, αφού βασίζονται σε διεθνή και εθνική βιβλιογραφία. Για την μη τιμολογούμενη μη μετρούμενη κατανάλωση η ΔΕΥΑ της

Κω εκτίμησε ότι ανέρχεται σε 66.000m³ το έτος και αυτή κατανεμήθηκε στα έξι δίμηνα κάθε έτους αναλογικά με την κατανάλωση του συγκεκριμένου διμήνου. Πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας όπως και στην περίπτωση της ΔΕΥΑ Λάρισας.

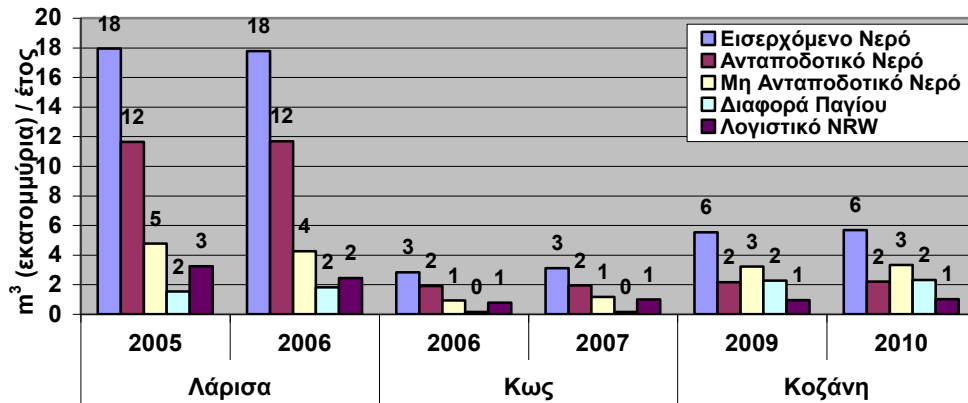
3.3. Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ ΔΕΥΑ ΚΟΖΑΝΗΣ

Η Κοζάνη βρίσκεται στα βορειοδυτικά του ηπειρωτικού τμήματος της χώρας και ανήκει στην περιφέρεια της Δυτικής Μακεδονίας. Η ΔΕΥΑ Κοζάνης υδροδοτεί την πόλη της Κοζάνης και δημοτικά διαμερίσματα. Στην ανάλυση λήφθηκε υπόψη μόνο το δίκτυο της πόλης της Κοζάνης. Το υδραγωγείο της Κοζάνης καλύπτει τις υδρευτικές ανάγκες του πληθυσμού της πόλης, ο οποίος είναι 35.942 άτομα (απογραφή 2001). Τα υδρόμετρα ανέρχονται σε 28.281 (στοιχεία 2010). Το δίκτυο ύδρευσης αποτελείται από αγωγούς συνολικού μήκους 129.584,4 μέτρων. Οι αγωγοί είναι φτιαγμένοι από PVC, αμιαντοτσιμέντο και HDPE. Οι υδατικοί πόροι υδροληψίας είναι υπόγειοι και πηγές. Η μέση πίεση λειτουργίας είναι 4 atm. Η ΔΕΥΑΚ της Κοζάνης παρακολουθεί το δίκτυό της με σύστημα τηλεέγχου - τηλεχειρισμού SCADA, ενώ δεν εφαρμόζε μέχρι τώρα κανένα μέτρο μείωσης του μη ανταποδοτικού νερού. Οι πρώτες προσπάθειες ξεκίνησαν το 2010 με την συμμετοχή της ΔΕΥΑ Κοζάνης στο Ευρωπαϊκό πρόγραμμα WATERLOSS (Zouboulis et al., 2011). Η εκτίμηση του υδατικού ισοζυγίου για την ΔΕΥΑ της Κοζάνης πραγματοποιήθηκε για το 2009 και το 2010 σε ετήσια και τετραμηνιαία βάση. Η ΔΕΥΑ Κοζάνης δεν τηρεί αναλυτικό αρχείο δεδομένων. Οι παραδοχές που έγιναν αφορούν στην μη τιμολογούμενη μη μετρούμενη κατανάλωση (2% του εισερχόμενου νερού στο δίκτυο), στην μη εξουσιοδοτημένη κατανάλωση (1% του εισερχόμενου νερού στο δίκτυο) και στα σφάλματα των μετρητών/μετρήσεων (10% της τιμολογούμενης μετρούμενης κατανάλωσης).

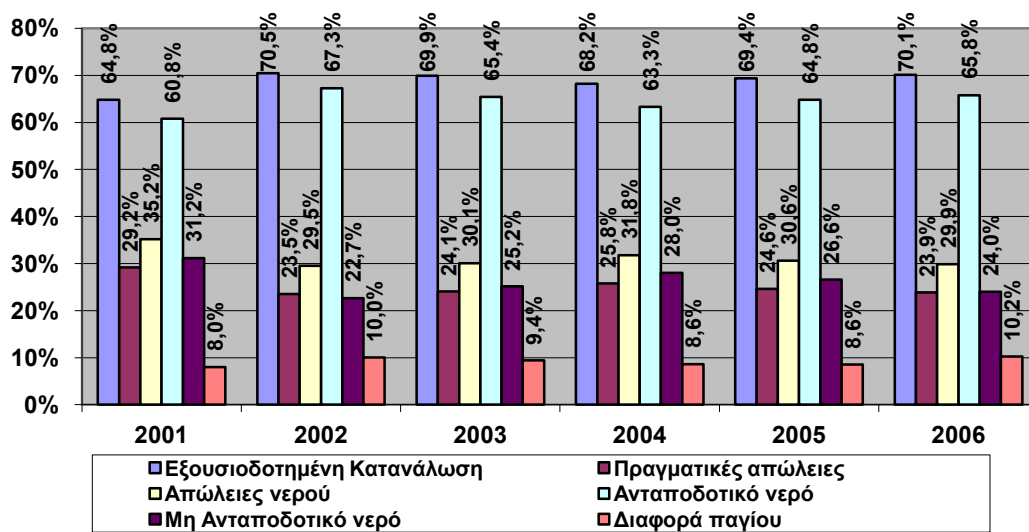
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Τα αποτελέσματα του 2^{ου} τροποποιημένου υδατικού ισοζυγίου της ΙWA και για τις τρεις περιπτώσεις παρουσιάζονται στο Σχήμα 3. Στα Σχήματα 4, 5 και 6 παρουσιάζονται τα βασικά συστατικά του 2^{ου} τροποποιημένου υδατικού ισοζυγίου σαν ποσοστά του εισερχόμενου νερού στο δίκτυο ανά έτος για την Λάρισα, ανά δίμηνο για την Κω και ανά έτος και τετράμηνο για την Κοζάνη. Στην περίπτωση της Λάρισας η εξουσιοδοτημένη κατανάλωση κυμαίνεται από 64,8% ως 70,5% του εισερχόμενου νερού, στην Κω από 37,9% ως 90,2% και στην Κοζάνη από 40,9% ως 48,8%. Το Μη Ανταποδοτικό νερό στην περίπτωση της Λάρισας παίρνει τιμές από 22,7% του εισερχόμενου νερού μέχρι 31,2%, στην περίπτωση της Κω από 9,8% μέχρι 62,1% και στην περίπτωση της Κοζάνης από 53,2% μέχρι 61,1%. Είναι χαρακτηριστικό ότι η μεγαλύτερη διακύμανση παρατηρείται στην περίπτωση της Κω, όπου το μη ανταποδοτικό νερό παίρνει τις μεγαλύτερες τιμές του το 5^ο δίμηνο (Σεπτεμβρίου – Οκτωβρίου). Αυτό είναι αποτέλεσμα της μη καλής διαχείρισης της πίεσης στο δίκτυο και την δημιουργία πραγματικών απωλειών όταν η ζήτηση ελαττώνεται. Είναι προφανές ότι στην περίπτωση της Λάρισας γίνεται καλύτερη διαχείριση του δικτύου και ότι μετά το 2004 το μη ανταποδοτικό νερό έχει μειούμενη τάση. Η Κοζάνη παρουσιάζει μεγάλες τιμές μη ανταποδοτικού νερού αλλά δεν υπάρχει αξιόλογη διακύμανση μεταξύ των τετραμήνων. Η ανάλυση της διαφοράς παγίου σε σχέση με το ανταποδοτικό νερό και το λογιστικό μη ανταποδοτικό νερό έδειξε ότι στην Λάρισα η διαφορά παγίου παίρνει τιμές από 8% μέχρι 10,2% του εισερχόμενου νερού (Σχήματα 4 & 7). Στην περίπτωση της Κω (σε ετήσια βάση) η διαφορά παγίου κυμαίνεται από 5,1% μέχρι 17,3% του εισερχόμενου νερού (Σχήματα 5 & 7) και στην Κοζάνη από 40,6%

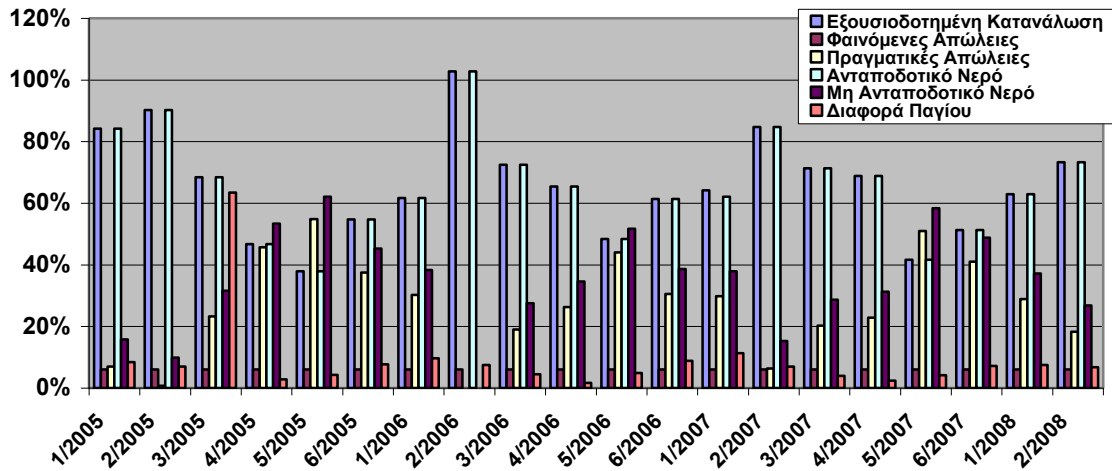
μέχρι 41% του εισερχόμενου νερού (Σχήματα 6 & 7). Το αποτέλεσμα είναι το λογιστικό μη ανταποδοτικό νερό να παρουσιάζεται μικρότερο από το μη ανταποδοτικό νερό (Σχήμα 7). Έτσι οι διαχειριστές των δικτύων δεν αντιλαμβάνονται το πρόβλημα στην πραγματική του διάσταση και δεν λαμβάνουν κανένα μέτρο μείωσης του μη ανταποδοτικού νερού.



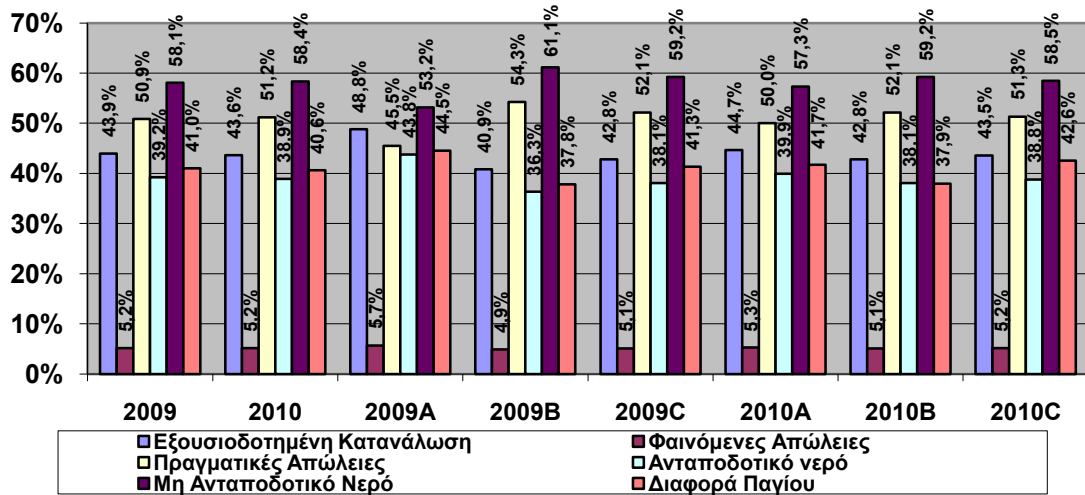
Σχήμα 3: Το εισερχόμενο, το ανταποδοτικό, το μη ανταποδοτικό νερό, η διαφορά παγίου και το λογιστικό μη ανταποδοτικό νερό για τις 3 περιπτώσεις



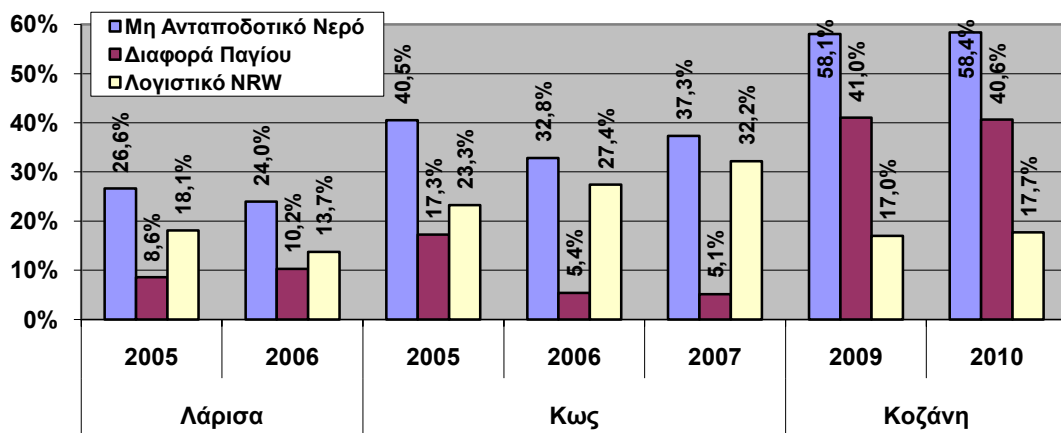
Σχήμα 4: Τα βασικά συστατικά του 2^{ου} τροποποιημένου υδατικού ισοζυγίου ως ποσοστά του εισερχόμενου νερού για το δίκτυο της Λάρισας ανά έτος



Σχήμα 5: Τα βασικά συστατικά του 2^{ου} τροποποιημένου υδατικού ισοζυγίου σαν ποσοστά του εισερχόμενου νερού για το δίκτυο της Κω ανά διμήνο



Σχήμα 6: Τα βασικά συστατικά της 2^{ης} τροποποίησης του υδατικού ισοζυγίου ως ποσοστά του εισερχόμενου νερού για το δίκτυο της Κοζάνης ανά έτος και τετράμηνο



Σχήμα 7: Το Μη Ανταποδοτικό νερό, η διαφορά παγίου και το λογιστικό μη ανταποδοτικό νερό ως ποσοστά του εισερχόμενου νερού για τις τρεις περιπτώσεις

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει τον ρόλο του παγίου στην διαμόρφωση στρατηγικών μείωσης του μη ανταποδοτικού νερού στα δίκτυα ύδρευσης. Η χρήση των αυξανόμενων κλιμακωτών τιμολογίων νερού με ενσωμάτωση πάγιας χρέωσης (που εκφράζεται είτε ως ποσότητα νερού, είτε σε χρηματικές μονάδες) αποτελεί μία καλή δικαιολογία για τους διαχειριστές των δικτύων ύδρευσης ώστε να αποφεύγουν τον σχεδιασμό και την εφαρμογή μέτρων και στρατηγικών για την μείωση του μη ανταποδοτικού νερού. Για αυτόν τον λόγο προτάθηκε η 2^η τροποποίηση του Υδατικού Ισοζυγίου της IWA που περιλαμβάνει την διαφορά παγίου και ενσωματώνει την 1^η τροποποίηση, μετατρέποντας το υδατικό ισοζύγιο από πλήρως ογκομετρικό και σε πλήρως οικονομικό. Γίνεται έτσι προφανές ότι το μη ανταποδοτικό νερό μειώνεται στο λογιστικό μη ανταποδοτικό νερό. Στην εργασία παρουσιάστηκε ο τρόπος υπολογισμού της διαφοράς παγίου ανάλογα με την μορφή που έχει το πάγιο στο τιμολόγιο του νερού, δηλαδή αν εκφράζεται σε m³ ή σε χρηματικές μονάδες (€). Για την επιβεβαίωση των παραπάνω μελετήθηκαν τρεις περίπτωσης αστικών δικτύων από την Ελλάδα (Λάρισα, Κω και Κοζάνης). Η μελέτη των περιπτώσεων αυτών έδειξε ότι η χρήση του παγίου στους λογαριασμούς ύδρευσης μειώνει το μέγεθος του μη ανταποδοτικού νερού κατά 13-70%, ήτοι το φαινόμενο (λογιστικό) μη ανταποδοτικού νερό (που είναι αυτό τελικά που εμφανίζεται στο λογιστικό απολογισμό της εκάστοτε ΔΕΥΑ, ως απώλεια εσόδων) κυμαίνεται από 30-87% της πραγματικής τιμής του μη ανταποδοτικού νερού. Γι' αυτό είναι απαραίτητο να χρησιμοποιείται η 2^η τροποποίηση του υδατικού ισοζυγίου της IWA ώστε να γίνεται προφανές το μη ανταποδοτικό νερό και τα συστατικά του. Επίσης προτείνεται το πάγιο να χρησιμοποιείται μόνο σαν κόστος ευκαιρίας ώστε να είναι κοινωνικά δικαιότερο και ο καταναλωτής να μην δυσφορεί να το πληρώσει. Γι' αυτό προτείνεται το πάγιο να αναφέρεται μόνο στα κόστη συντήρησης των υδρομέτρων, σύνδεσης του καταναλωτή με το δίκτυο και παροχής υπηρεσιών προς αυτόν, όπως η πυρόσβεση, το πότισμα των πάρκων και άλλες δωρεάν δημόσιες χρήσεις νερού.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Georgiadis S., and Kanellopoulou S., 2008. *Pressure Management in the Water Supply Network of Athens, Greece*. World Water Congress 2008, Vienna, Austria.
- Guibentif, H., Rufenacht, H.P., Rapillard, P. and Ruetschi, M., 2007. *Acceptable Level of Water Losses in Geneva*. Proc. IWA Int. Conf. 'WaterLoss 2007', Bucharest, Romania, Vol.1:138-147.
- Kanakoudis, V. and Tolikas, D., 2001. *The role of leaks and breaks in water networks - Technical and economical solutions*. Water Supply: Research & Technology-AQUA, 50(5):301-311
- Kanakoudis, V. and Tsitsifli, S., 2010. *Water volume vs. revenues oriented water balance calculation for urban water networks: the "Minimum Charge Difference" component makes a difference!* e-Proc. Int. Conf. 'Water Loss 2010', IWA, Sao Paulo, Brazil.
- Kolbl, J., Theuretzbacher-Fritz, H., Neunteufel, R., Perfler, R. and Krendelsberger, R., 2006. *Benchmarking in the Austrian Water Supply Sector: Objectives, Development, Structure and First Results of the 2004 Project*. Water and Environmental Management Series, 12:197-204.
- Lambert, A., Brown, T.G., Takizawa, M. and Weimer, D., 1999. *Review of Performance Indicators for Real Losses from Water Supply Systems*. Water Supply: Research & Technology-AQUA, 48:227-237.

- Lambert, A. and Morrison, J., 1996. *Recent Developments in Application of 'Burst and Background Estimates' Concepts for Leakage Management*. Chartered Institute of Water and Environmental Management, 10(2):100-104.
- Morrison, J.A.E., 2002. *Practical Application of Component Analysis of leakage Using Babe Principles*. Proc. IWA Int. Conf. 'Leakage Management 2002', Lemesos, Cyprus, 254-266.
- McKenzie, R., Seago, C. and Liemberger, R., 2007. *Benchmarking of Losses from potable water reticulation systems-Results from IWA Task Team*. Proc. IWA Int. Conf. 'WaterLoss 2007', Bucharest, Romania, vol.1:161-175.
- Paracampos, F. and Thornton, J., 2002. *SABESP's experience in applying the IWA water loss indicators-a field experience*. Proc. IWA Int. Conf. 'Leakage Management 2002', Lemesos, Cyprus, 143-157.
- Pearson, D., 2009. *Developing a Non-Revenue Water Reduction Strategy with Inadequate Data*. E-proc. IWA Int. Conf. 'WaterLoss 2009', Cape Town, South Africa, 6-12.
- Theuretzbacher-Fritz, H., Schielein, J., Kiesl, H., Kölbl, J., Neunteufel, R. and Perfler, R., 2005. *Trans-National Water Supply Benchmarking: The Cross-Border Co-operation of The Bavarian EffWB Project and The Austrian OVGW Project*, Water Science & Technology-Water Supply, 6:273-280.
- Tsitsifli, S. and Kanakoudis, V., 2009. *Evaluating the performance of an urban water distribution network: tips and tricks for troubleshooting*. e-proc. EWRA 6th Int. Conf., Lemessos, Cyprus, 419-426.
- Zouboulis A., Samaras P., Kanakoudis V. and Tsitsifli S., 2011, *WATERLOSS MED project: Establishing a sound benchmarking base across the Mediterranean area regarding the reduction of real and apparent water losses occurring in urban water networks*. e-proc. BWA 4th Int. Conf. on Water Loss Reduction in Water Supply Systems, Sofia, Bulgaria.

**ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΜΕ ΤΗ
ΜΕΘΟΔΟ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΟΦΕΛΟΥΣ: ΜΙΑ ΚΡΙΤΙΚΗ
ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΟΥ ΑΣΩΠΟΥ**

Τέντες Γιώργος, Δαμίγος Δημήτρης

Τομέας Μεταλλευτικής, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών,
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 15780 Ζωγράφου
geotentes@rypos.gr, damigos@metal.ntua.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία διερευνά κρίσιμες πτυχές της εφαρμογής της μεθόδου Μεταφοράς Οφέλους στην αποτίμηση της οικονομικής αξίας των υδατικών πόρων στο πλαίσιο της Οδηγίας 2000/60/ΕΚ, χρησιμοποιώντας ως μελέτη περίπτωσης την αποτίμηση των υπόγειων νερών της περιοχής του Ασωπού ποταμού. Σε αυτή την κατεύθυνση αξιολογούνται συγκριτικά οικονομικές αξίες υπολογιζόμενες με πρωτογενείς μεθόδους και με διάφορες τεχνικές της μεθόδου Μεταφοράς Οφέλους, θέτοντας έτσι την επιστημονική βάση για να διερευνηθούν οι αναγκαίες συνθήκες για περισσότερο αξιόπιστες μεταφορές οικονομικών αξιών των υδατικών πόρων στο μέλλον.

**ECONOMIC VALUATION OF WATER RESOURCES USING
BENEFIT TRANSFER: A CRITICAL APPROACH IN THE CASE
OF ASOPOS GROUND WATER**

Tentes Georgios, Damigos Dimitrios

Mining Engineering Section, School of Mining & Metallurgical Engineering,
National Technical University of Athens
Heroon Polytechniou 9, 15780 Zografou
geotentes@rypos.gr, damigos@metal.ntua.gr

SUMMARY

The present study investigates critical aspects in the application of Benefit Transfer method for water resources valuation, within the WFD 2000/60/EC, using Asopos River Basin aquifer as a case study. To this effect, economic values of groundwater are being estimated through primary methods and various Benefit Transfer approaches. The results are being comparatively evaluated, thus laying the ground for the investigations of the necessary conditions and assumptions for more reliable transfers of economic values and decision making in the field of water resources in the future.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η οικονομική διάσταση των περιβαλλοντικών αγαθών αποτελεί αντικείμενο διερεύνησης για πολλούς επιστημονικούς και θεσμικούς φορείς ήδη από την δεκαετία του 1950 (Pearce, 2002). Η Ευρώπη υιοθέτησε την προσέγγιση αυτή αρκετά αργότερα από τις Η.Π.Α., το 1992, με το 5^ο Πρόγραμμα Δράσης για το Περιβάλλον, το οποίο εισήγαγε τη διασύνδεση οικονομίας και περιβάλλοντος. Όσον αφορά στους υδατικούς πόρους, σημαντικό βήμα προς την ενσωμάτωση αρχών της οικονομίας στην ευρωπαϊκή νομοθεσία είναι η υιοθέτηση της Οδηγίας Πλαίσιο για τα νερά 2000/60/ΕΚ, η οποία εισάγει την αρχή της ανάκτησης του κόστους των υπηρεσιών νερού (Άρθρο 9), ορίζοντας ως συνιστώσες αυτού όχι μόνο το χρηματοοικονομικό κόστος, αλλά και το «περιβαλλοντικό κόστος» και το «κόστος πόρου» (WATECO, 2003).

Για την αποτίμηση του μη χρηματοοικονομικού κόστους χρησιμοποιούνται μέθοδοι αποτίμησης περιβαλλοντικών αγαθών και υπηρεσιών που διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες (WATECO, 2003). Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι λεγόμενες πρωτογενείς μέθοδοι εκτίμησης (π.χ. μέθοδοι δηλωμένης προτίμησης, μέθοδοι αποκαλυπτόμενης προτίμησης, κ.ά.) και στη δεύτερη βρίσκεται η οικογένεια μεθόδων Μεταφοράς Οφέλους (Benefit or Value Transfer method), οι οποίες είναι γνωστές ως δευτερογενείς μέθοδοι. Οι δευτερογενείς μέθοδοι στηρίζονται στην ύπαρξη προγενεστέρων πρωτογενών ερευνών και αφορούν στην οικονομική αποτίμηση ενός περιβαλλοντικού αγαθού ή υπηρεσίας σε μια περιοχή, η οποία αποκαλείται περιοχή εφαρμογής (policy site) με βάση εκτιμήσεις σε μία αρχική περιοχή αναφοράς (study site) (Dumas et al., 2005). Με δεδομένο ότι η μεταφορά μπορεί να αφορά είτε κόστος είτε όφελος (WATECO, 2003), πάντα όμως οικονομική αξία, κρίνεται ως ορθότερη η χρήση του όρου 'value transfer' και η απόδοσή του στα ελληνικά ως 'μεταφορά αξίας'. Παρ' όλα αυτά, στην ευρωπαϊκή και στην ελληνική βιβλιογραφία φαίνεται να επικρατεί ο όρος Μεταφορά Οφέλους, ο οποίος και υιοθετείται εδώ.

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στη δυνατότητα εφαρμογής της μεθόδου Μεταφοράς Οφέλους για την αποτίμηση της αξίας των υπόγειων νερών, χρησιμοποιώντας ως μελέτη περίπτωσης τον υδροφόρο του μέσου και κάτω ρου της λεκάνης του Ασωπού ποταμού στην περιοχή Αττικοβοιωτίας. Στο πλαίσιο αυτό, εξετάζεται η αξία των υπογείων νερών της περιοχής, η οποία εκτιμήθηκε με πρωτογενή έρευνα, σε σχέση με την αξία που υπολογίζεται με τη μέθοδο Μεταφοράς Οφέλους.

2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΚΑΙ ΥΠΟΘΕΣΕΙΣ

2.1. ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΟΦΕΛΟΥΣ

Η μέθοδος Μεταφοράς Οφέλους αποτελεί μια διεθνώς αναγνωρισμένη πρακτική, όταν δεν είναι εφικτή η διενέργεια πρωτογενούς έρευνας λόγω οικονομικών ή και χρονικών περιορισμών. Για να είναι αποτελεσματική η εφαρμογή της μεθόδου, θα πρέπει να ικανοποιούνται ορισμένες συνθήκες και προϋποθέσεις ως προς την περιοχή εφαρμογής και τις περιοχές αναφοράς (βλ. και Rosenberger & Loomis, 2001, VandenBerg et al., 2001). Στη διαθέσιμη βιβλιογραφία, ο όρος Μεταφορά Οφέλους περιλαμβάνει μια σειρά εναλλακτικών προσεγγίσεων (βλ. π.χ. Bateman et al., 2000, Dumas et al., 2005, Navrud & Ready, 2007). Γενικά, η κατηγοριοποίηση των προσεγγίσεων αφορά σε μεταφορά τιμής (value transfer) και μεταφορά συνάρτησης (function transfer). Στην πράξη, κάθε μέθοδος από τις προαναφερόμενες συνήθως περιλαμβάνει και υποπεριπτώσεις, π.χ. είτε χρήση μιας ή πολλαπλών περιοχών αναφοράς, είτε διόρθωση τιμών ως προς μακροοικονομικά και μικροοικονομικά μεγέθη (π.χ. Ready & Navrud, 2006, Santos, 2007, Aulong & Rinaudo, 2008).

2.2. ΘΕΜΕΛΙΩΔΕΙΣ ΥΠΟΘΕΣΕΙΣ

Το βασικό εμπειρικό ερώτημα που επηρεάζει τη λήψη αποφάσεων, όταν αυτή βασίζεται στη μέθοδο Μεταφοράς Οφέλους, είναι κατά πόσον οι τιμές που προέρχονται από την περιοχή αναφοράς προσεγγίζουν την αληθή αξία στην περιοχή εφαρμογής, ήτοι της μέσης προθυμίας πληρωμής \overline{WTP}_p στην περιοχή εφαρμογής. Ο έλεγχος της αξιοπιστίας της μεθόδου Μεταφοράς Οφέλους βασίζεται στη συγκέντρωση πρωτογενών μελετών και στον έλεγχο στατιστικών υποθέσεων (Navrud & Ready, 2007). Οι μελέτες που χρησιμοποιούνται συνήθως προέρχονται από την ίδια χώρα, αφορούν το ίδιο ή παρόμοιο περιβαλλοντικό ζήτημα και έχουν διεξαχθεί είτε ταυτόχρονα είτε εντός περιορισμένου χρονικού διαστήματος, με το ίδιο ερωτηματολόγιο. Έτσι ξεπερνιούνται σφάλματα και προβλήματα που σχετίζονται με διαφορές στα δημογραφικά χαρακτηριστικά, στο επίπεδο ευημερίας, κ.ά. (Scarpa et al., 2007).

Οι βασικές στατιστικές υποθέσεις που εξετάζονται αφορούν στη διαφορά μεταξύ πρωτογενών και δευτερογενών τιμών, καθώς και στον έλεγχο της αξιοπιστίας των εναλλακτικών προσεγγίσεων της Μεταφοράς Οφέλους (VanderBerg et al., 2001, Kristofersson & Navrud, 2007, Scarpa et al., 2007). Τα κριτήρια που συναντώνται στη βιβλιογραφία είναι είτε τιμές που προκύπτουν εμπειρικά (Kristofersson & Navrud, 2007), είτε τιμές που προκύπτουν ως όρια εμπιστοσύνης της διαθέσιμης πρωτογενούς μεθόδου στην περιοχή εφαρμογής (Santos, 2007). Το σύννηθες κριτήριο εγκυρότητας είναι το λεγόμενο σφάλμα μεταφοράς (transfer error), το οποίο ορίζεται ως (Ready & Navrud, 2006):

$$TE = \frac{|WTP_t - \overline{WTP}_p|}{\overline{WTP}_p} \quad (2.1)$$

όπου TE το σφάλμα μεταφοράς και WTP_t η αξία που προέκυψε από τη μεταφορά.

Το TE έχει χρησιμοποιηθεί σε αρκετές μελέτες προκειμένου να κριθεί η απόδοση της μεθόδου Μεταφοράς Οφέλους. Άλλα εφαρμοζόμενα στατιστικά κριτήρια είναι οι κατανομές που ακολουθούν τα ποσά της προθυμίας πληρωμής, οι μεταβλητές των οικονομετρικών μοντέλων, κ.ά.

2.3. ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΤΙΜΩΝ

Ένα σημαντικό ζήτημα στη Μεταφορά Οφέλους, είναι ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η μεταφορά τιμών και η διόρθωσή τους ώστε να αντανακλούν τα διαφορετικά οικονομικά υπόβαθρα των διαφόρων χωρών, αλλά και τη διαχρονική εξέλιξη των επιπέδων των τιμών. Έτσι, προκειμένου να βελτιωθεί η ακρίβεια των εκτιμήσεων, πέραν του υπολογισμού της μέσης τιμής στην περιοχή εφαρμογής (ανεξαρτήτως μεθοδολογίας) θα πρέπει να πραγματοποιηθεί προσαρμογή των δεδομένων σε δύο στάδια με την εφαρμογή του Δείκτη Ισότητας Αγοραστικής Δύναμης Καταναλωτή (Purchasing Power Parity Index-PPPI) και την εφαρμογή του Δείκτη Τιμών Καταναλωτή (Consumer Price Index-CPI). Η εξίσωση που εφαρμόζεται για τον σκοπό αυτό είναι η ακόλουθη (Pattanayak et al., 2002):

$$V(C_1Y_1) = V(C_0Y_0) \times \frac{PPPI(C_1Y_0)}{PPPI(C_0Y_0)} \times \frac{CPI(C_1Y_1)}{CPI(C_1Y_0)} \quad (2.2)$$

Όπου με $V(C_i Y_j)$ συμβολίζεται η αξία στην χώρα C_i το έτος Y_j και με $PPPI(C_i Y_j)$ και με $CPI(C_i Y_j)$ οι αντίστοιχοι δείκτες. Ο $PPPI$ χρησιμοποιείται για τη «χωρική» μεταφορά των δεδομένων (στη συγκεκριμένη περίπτωση από τις υπόλοιπες χώρες στην Ελλάδα) και ο CPI χρησιμοποιείται για τη «χρονική» μεταφορά των αποτελεσμάτων από το έτος της μελέτης αναφοράς στο έτος εκτίμησης (στην παρούσα έρευνα στο έτος 2011), ώστε να ληφθεί υπόψη και η επίδραση των πληθωριστικών τάσεων. Οι τιμές του δείκτη $PPPI$ ελήφθησαν από πίνακες του Οργανισμού Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης και από την Παγκόσμια Τράπεζα, ενώ οι τιμές του CPI ελήφθησαν από την ΕΛΣΤΑΤ.

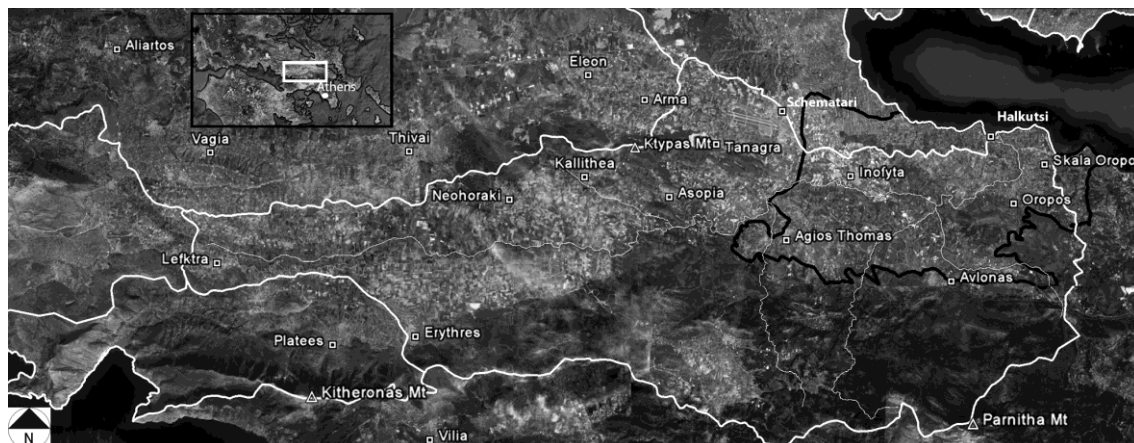
3. ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ

3.1. ΥΠΟΓΕΙΟΣ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑΣ ΑΣΩΠΟΥ

Ο Ασωπός Ποταμός είναι ένας ποταμός σημαντικού μεγέθους, από τους κοντινότερους στο λεκανοπέδιο της Αττικής, στα σύνορα με τη Βοιωτία. Στην περιοχή του μέσου και κάτω ρου του ποταμού, το 1969, με αρχή μια κοινή υπουργική απόφαση που τον ανακήρυσσε αποδέκτη αποβλήτων, δημιουργήθηκε μια άτυπη, μη θεσμοθετημένη βιομηχανική περιοχή. Η ανάπτυξή της εδράσθηκε πάνω σε μία κοινή νομαρχιακή απόφαση του 1979, καθώς και στο Προεδρικό Διάταγμα 84/1984, το οποίο απέκλεισε τη βιομηχανική δραστηριότητα από το Νομό Αττικής. Οι πάσης φύσεως δραστηριότητες που δεν κατάφεραν να εγκατασταθούν στο Νομό Αττικής, επέλεξαν το Νομό Βοιωτίας ως τον προσφορότερο για εγκατάσταση, δημιουργώντας μία περιοχή υπερσυγκέντρωσης δραστηριοτήτων χωρίς όμως τις ανάλογες υποδομές.

Το 2004 με κάποιους αρχικούς ελέγχους και το 2007 με πιο επισταμένη παρακολούθηση διαπιστώθηκε ρύπανση των υπογείων νερών από αρσενικό (As), εξασθενές χρώμιο (Cr(VI)) και άλλες ουσίες (Γιαννουλόπουλος, 2008). Από το 2004 έως το 2009 βεβαιώθηκαν πρόστιμα 4,3 εκατομμυρίων ευρώ για παράβαση της περιβαλλοντικής νομοθεσίας σε 163 από τις πάνω από τις 400 αδειοδοτημένες μονάδες (Μασούρα, 2008), οι οποίες διαθέτουν στερεά και υγρά απόβλητα σε φυσικούς αποδέκτες, μεταξύ αυτών και τα υπόγεια νερά.

Το ρυπασμένο νερό από τον κοκκώδη υπόγειο υδροφόρα, ο οποίος περιγράφεται ως υδατικό σύστημα νεογενών σχηματισμών και τεταρτογενών προσχώσεων (π.χ. Γιαννουλόπουλος, 2008, Αλεξιάδου κ.ά., 2011), έχει βρεθεί ακατάλληλο για ανθρώπινη κατανάλωση. Το γεγονός αυτό έχει επηρεάσει άμεσα συνολικό πληθυσμό 15101 κατοίκων (5025 νοικοκυριά), οι οποίοι ζουν στους κύριους οικισμούς Οινοφύτων και Αγ. Θωμά (7504 κάτοικοι) στα δυτικά και Ωρωπού – Χαλκουτσίου (7597 κάτοικοι) στα ανατολικά. Ο πληθυσμός αυτός χρησιμοποιούσε, έως το 2009, τα υπόγεια νερά ως τη μοναδική πηγή πόσιμου νερού. Στο Σχήμα 1 παρουσιάζονται τα όρια του υδροφόρα με βάση υδρολιθολογικά και πιεζομετρικά κριτήρια, καθώς και οι θέσεις των οικισμών σε υπόβαθρο αεροφωτογραφίας.



Σχήμα 1. Οριζοντιογραφία της λεκάνης απορροής του ποταμού Ασωπού με ένθετο χάρτη προσανατολισμού. Παχιά λευκή γραμμή: υδροκρίτης. Λεπτές λευκές γραμμές: Ποταμός Ασωπός και παραπόταμοι. Μαύρη γραμμή: όριο του υδροφορέα μέσου και κάτω ρου του Ασωπού (περιλαμβάνει και ημιπερατούς σχηματισμούς του τεταρτογενούς και του νεογενούς που θεωρείται ότι σχετίζονται με τον Ασωπό) [Πηγή: Tentes & Damigos, 2011].

3.2. ΠΡΩΤΟΓΕΝΗΣ ΕΡΕΥΝΑ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗΣ

Αναγνωρίζοντας ότι το υπόγειο νερό της λεκάνης του Ασωπού έχει απολέσει υπηρεσίες που παρείχε στους ανθρώπους και το οικοσύστημα και, συνεπώς και σημαντικό μέρος της οικονομικής αξίας του, η έρευνα που διεξάχθηκε στην περιοχή αποπειράθηκε να εκτιμήσει για πρώτη φορά τη συνολική οικονομική αξία (TEV) των υπόγειων νερών της περιοχής χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Υποθετικής Αξιολόγησης (Tentes & Damigos, 2011). Ο πληθυσμός της περιοχής αναφοράς περιλαμβάνει όλα τα νοικοκυριά των οικισμών Οινοφύτων, Αγίου Θωμά, Ωρωπού και Χαλκουτσίου και το επιλεγμένο δείγμα περιέλαβε 310 ερωτηθέντες.

Η μέση τιμή της προθυμίας πληρωμής για την αποκατάσταση του ρυπασμένου υπόγειου νερού στην περιοχή εκτιμήθηκε μεταξύ 250 € και 270 € (εύρος εκτίμησης) ανά νοικοκυριό και έτος (τιμές 2011), επιλογή που έγινε από ένα σύνολο εκτιμήσεων οι οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Το 31% της εκτιμώμενης προθυμίας πληρωμής αναφέρεται σε αξία χρήσης και το 69% σε αξίες μη χρήσης. Σημειώνεται ότι, με βάση τις απαντήσεις των ερωτωμένων στις δημογραφικές ερωτήσεις, το μέσο ετήσιο εισόδημα στην περιοχή υπολογίστηκε σε 25.000 € περίπου.

Πίνακας 1. Εκτιμήσεις προθυμίας πληρωμής για την αποκατάσταση της ρύπανσης υπογείου νερού στην περιοχή Ασωπού ανά νοικοκυριό και μήνα (Πηγή: Tentes & Damigos, 2011).

Μεθοδολογική προσέγγιση	Μέση WTP*
Πλήρες δείγμα (περιλαμβάνονται μηδενικές απαντήσεις)	22,42 €
Εκτίμηση μεθόδου Karlan-Meier	20,67 €
Μικτό παραμετρικό μοντέλο (χωρίς συμμεταβλητές)	20,56 €
Μικτό παραμετρικό μοντέλο (με συμμεταβλητές)	20,56 €

*WTP: Προθυμία Πληρωμής σε τιμές 2011

Η προθυμία πληρωμής εξαρτάται από δημογραφικές μεταβλητές, (ηλικία και τύπος κατοικίας) αλλά και από μεταβλητές γνώμης (αλλαγές στην καθημερινότητα, πεποίθηση για επιπτώσεις και στο οικοσύστημα, χρήση του υπόγειου νερού πριν την δημοσίευση της ρύπανσης). Αντίστοιχες μεταβλητές επηρεάζουν και το προσφερόμενο

ποσό, το οποίο φαίνεται να εξαρτάται ιδιαίτερα από την γενικότερη αντίληψη περί της κατάστασης του περιβάλλοντος και των υπογείων νερών στην περιοχή, από την ικανοποίηση για τις ενέργειες της Πολιτείας, αλλά και από το οικογενειακό εισόδημα. Με βάση το συνολικό αριθμό των νοικοκυριών του πληθυσμού ενδιαφέροντος και το σενάριο αποτίμησης, η ολική αξία του υπόγειου νερού εκτιμήθηκε μεταξύ 7,6 Μ€ και 10,1 Μ€.

3.3. ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΤΙΜΗΣ

3.3.1. Έρευνες περιοχών αναφοράς

Οι διαθέσιμες πρωτογενείς μελέτες αποτίμησης αξίας υπογείων νερών για τον ελληνικό χώρο είναι εξαιρετικά περιορισμένες. Η μελέτη των Tentes & Damigos (2011) στην περιοχή εφαρμογής αποτελεί, με βάση τα διαθέσιμα στους συγγραφείς στοιχεία, την πρώτη απόπειρα αποτίμησης της αξίας του υπογείου νερού ως αγαθού με παρόμοιες μεθόδους. Έχει ακολουθήσει μία δεύτερη μελέτη, για τα υπόγεια νερά της πεδιάδας της Θήβας (Christantoni et al., 2011), η οποία έχει εκτιμήσει την αξία του ίδιου αγαθού σε γειτονική περιοχή, εντός των συμβατικών ορίων της λεκάνης απορροής του Βοιωτικού Κηφισού ποταμού. Η διεθνής βιβλιογραφία περιλαμβάνει σημαντικό αριθμό πρωτογενών ερευνών αποτίμησης της αξίας του υπόγειου νερού με τη μέθοδο Υποθετικής Αξιολόγησης. Για τις ανάγκες της παρούσας έρευνας επιλέχθηκαν 17 μελέτες, οι οποίες έχουν αποτιμήσει αξίες υπογείων νερών σε 23 διακριτές περιπτώσεις. Οι αναφορές για τις έρευνες των περιοχών αναφοράς, διαχωρισμένες ανά μείζονα περιοχή, συνοδεύονται από βασικές πληροφορίες και τις αποτιμώμενες αξίες δίνονται στον Πίνακα 2. Όπως διαπιστώνεται, η διακύμανση των εκτιμώμενων τιμών είναι σημαντική.

Πίνακας 2. Αποδελτίωση διαθέσιμων ερευνών με θέμα την αποτίμηση της υποβάθμισης υπογείων υδάτων

Μελέτη	Χώρα/Περιοχή	Έτος	Αρχική τιμή	Τιμή μεταφοράς
Bergstrom et al., 2001	ΗΠΑ (Maine)	1995	34-126 (USD)	25 €
Bergstrom et al., 2001	ΗΠΑ (Georgia)	1995	60-321 (USD)	222 €
Poe & Bishop, 2001	ΗΠΑ (Wisconsin)	1992	285 (USD)	312 €
Epp & Delavan, 2001	ΗΠΑ (Pennsylvania)	1996	51-255 (USD)	99 €
Crutchfield et al., 1997	ΗΠΑ (Indiana)	1994	45-48 (USD)	592 €
Crutchfield et al., 1997	ΗΠΑ (Nebraska)	1994	51-57 (USD)	683 €
Crutchfield et al., 1997	ΗΠΑ (Susquehanna)	1994	60,8-60,9 (USD)	768 €
Crutchfield et al., 1997	ΗΠΑ (Columbia)	1994	55-65 (USD)	760 €
Edwards, 1988	ΗΠΑ (Massachusetts)	1987	5-25 (USD)	17 €
Hauser & Van Kooten, 1993	Καναδάς (Columbia)	1992	55-155 (CAD)	80 €
Wei et al., 2006	Κίνα (Fengqiu)	2003	1,26-1,40 (YUAN)	0.3 €
Dahn, 2007	Βιετνάμ (Mekong)	2006	10237-11811 (VND)	18 €
Martinez & Prantilla, 2007	Φιλιππίνες (Dumoy)	2006	67-99 (PHP)	31 €
Gren, 1995	Σουηδία (χώρα)	1990	600 (SEK)	80 €
Gren, 1995	Ηνωμένο Βασίλειο (χώρα)	1988	9 (GBP)	20 €
Hasler et al., 2005	Δανία (χώρα)	2003	529-819 (DKK)	71 €
Press & Soderquist, 1998	Ιταλία (ποτ.Πο)	1993	417000-1083000 (ITL)	528 €
Aulong & Rinaudo, 2008	Γαλλία (Άνω Ρήνος)	2007	20-77 (EURO)	36 €
Stenger & Willinger, 1998	Γαλλία (Αλσατία)	1995	617-1545 (FF)	156 €
Christantoni et al, 2011	Ελλάδα (Θήβα)	2010	10-11 (EURO)	13 €

3.3.2. Μεταφορά τιμής από μία περιοχή αναφοράς

Η πλέον συναφής με την υπό εξέταση περιοχή έρευνα είναι των Christantoni et al. (2011) στην περιοχή της Θήβας, η οποία πραγματοποιήθηκε την ίδια περίπου περίοδο με την πρωτογενή έρευνα στην περιοχή του Ασωπού (Tentes & Damigos, 2011), με το ίδιο ερωτηματολόγιο αλλά με ηπιότερο περιβαλλοντικό πρόβλημα στα υπόγεια νερά. Με βάση τον Barton (2002), η γενική διατύπωση της μεταφοράς μετά από προσαρμογή είναι:

$$v^s = \alpha * v^p \quad (3.1)$$

$$\alpha = \left(\frac{Y_p}{Y_s} \right)^\beta \quad (3.2)$$

Όπου v^s είναι η προθυμία πληρωμής στην περιοχή αναφοράς, v^p είναι η εκτιμώμενη προθυμία πληρωμής στην περιοχή εφαρμογής και α είναι ίσο με το λόγο των εισοδημάτων (διορθωμένων βάσει του CPI) στις δύο περιοχές (Y_p , Y_s , αντίστοιχα) στην περίπτωση της διόρθωσης βάσει εισοδήματος. Ο εκθέτης β είναι η ελαστικότητα της ζήτησης του περιβαλλοντικού αγαθού ως προς το εισόδημα, ο οποίος στις συνηθέστερες των περιπτώσεων θεωρείται ίσος με 1. Η απλή μεταφορά τιμής (με χρήση της μη-παραμετρικής εκτίμησης) ανέρχεται σε 143 € ανά νοικοκυριό και έτος (TE: 45,2%), ενώ η διορθωμένη με βάση το εισόδημα τιμή σε 175,32 € (TE: 32,6%).

3.3.3. Μεταφορά τιμής από πολλαπλές περιοχές αναφοράς

Για τη μεταφορά τιμής από πολλαπλές έρευνες, εξετάστηκαν ποικίλοι συνδυασμοί, οι οποίοι παρουσιάζονται ακολούθως.

- Σ1. Χρήση όλων των διαθέσιμων τιμών.
- Σ2. Απόρριψη ακραίων τιμών.
- Σ3. Επιλογή υπογείων νερών με εκτεταμένη περιβαλλοντική ζημία.
- Σ4. Επιλογή αποτιμήσεων συνολικής αξίας υπογείου νερού TEV.
- Σ5. Επιλογή μελετών αποτίμησης αξιών χρήσης του υπόγειου νερού.
- Σ6. Επιλογή αποτιμήσεων υπογείων νερών μόνο από χώρες της Ε.Ε.

Οι συνδυασμοί αυτοί εφαρμόστηκαν επί 3 ομάδων τιμών, οι οποίες σχηματίστηκαν ως εξής:

- Ομάδα 1: το σύνολο των εκτιμώμενων αριθμητικών μέσων των μέσων τιμών που υποδεικνύει κάθε επιμέρους έρευνα
- Ομάδα 2: το σύνολο των ελαχίστων των μέσων τιμών που υποδεικνύει κάθε επιμέρους έρευνα.
- Ομάδα 3: το σύνολο των τιμών που προτεινόταν από τους ερευνητές.

Τα τελικά αποτελέσματα ανά συνδυασμό και ανα ομάδα παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.

Πίνακας 3. Αποτελέσματα ανάλυσης μεταφοράς τιμής για κάθε Ομάδα και Σενάριο εκτίμησης

Ομάδα	Τιμή	Σ1	Σ2	Σ3	Σ4	Σ5	Σ6
Ομάδα 1	Μέση WTP (€2011)	225 €	218 €	313 €	147 €	229 €	146 €
	TE	9,9%	12,5%	25,4%	41,0%	196,3%	41,5%
Ομάδα 2	Μέση WTP (€2011)	189 €	177 €	280 €	95 €	233 €	100 €
	TE	24,2%	29,2%	12,3%	61,7%	201,3%	59,8%
Ομάδα 3	Μέση WTP (€2011)	236 €	225 €	371 €	73 €	247 €	96 €
	TE	5,5%	9,6%	49,0%	70,8%	219,4%	61,6%

3.4. ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ

Με τη μεταφορά συνάρτησης επιδιώκεται η μεταφορά οφέλους μέσα από τη χρήση των εκτιμώμενων οικονομετρικών μοντέλων (π.χ. logit, tobit ή άλλων) της πρωτογενούς έρευνας στην περιοχή αναφοράς (Dumas et al., 2005). Η προθυμία πληρωμής εκτιμάται με βάση το οικονομετρικό μοντέλο, χρησιμοποιώντας τις μέσες τιμές των μεταβλητών που λαμβάνονται για την περιοχή εφαρμογής. Για τη μεταφορά συνάρτησης εξετάστηκαν όλες οι διεθνείς έρευνες του Πίνακα 2 και επελέγησαν οι μελέτες οι οποίες παρουσίαζαν την μεγαλύτερη ομοιότητα ως προς τα στοιχεία που θεωρούν πρωτεύοντα, π.χ. τα χαρακτηριστικά των πληθυσμών, το αποτιμώμενο αγαθό και το επίπεδο παροχής του, κ.ά. Οι έρευνες που τελικά επελέγησαν είναι αυτές των Press & Soderquist (1998) και των Christantoni et al. (2011).

Στο πλαίσιο της χρήσης της συνάρτησης της περιοχής αναφοράς στην περιοχή εφαρμογής, πρέπει να γίνουν εκτιμήσεις των μέσων τιμών των μεταβλητών της συνάρτησης αυτής. Οι εκτιμήσεις είναι τριών ειδών:

- i. Εκτίμηση αριθμητικής μέσης τιμής δημογραφικής μεταβλητής για την οποία διατίθενται στοιχεία στην περιοχή εφαρμογής, όπως π.χ. η μέση ηλικία του πληθυσμού
- ii. Εκτίμηση αριθμητικής μέσης τιμής μεταβλητής γνώμης, η οποία διατίθεται στην περιοχή εφαρμογής από άλλες πρωτογενείς έρευνες, όχι κατ' ανάγκην οικονομικές
- iii. Εκτίμηση αριθμητικής μέσης τιμής για μεταβλητή γνώμης, για την οποία δεν υπάρχει δυνατότητα εκτίμησης στην περιοχή εφαρμογής

Κατά πάγια τακτική (Dumas et al., 2005), όταν δεν διατίθενται στατιστικά στοιχεία για δημογραφικές μεταβλητές της περιοχής εφαρμογής, χρησιμοποιούνται τιμές για ευρύτερες γεωγραφικές ενότητες (π.χ. στη συγκεκριμένη περίπτωση για το ποσοστό των παιδιών κάτω από 4 ετών και για το μέσο εισόδημα ελήφθησαν στοιχεία της ΕΛΣΤΑΤ σε επίπεδο τοπικής κοινότητας). Στην περίπτωση που δεν υπάρχει δυνατότητα εκτίμησης της μέσης τιμής μιας μεταβλητής γνώμης στην περιοχή εφαρμογής, τότε η συνήθης πρακτική είναι να λαμβάνεται αυτούσια η αντίστοιχη τιμή από την περιοχή αναφοράς (με την παραδοχή ότι οι απόψεις των δύο πληθυσμών είναι ταυτόσημες ως προς την συγκεκριμένη μεταβλητή). Τέτοιου είδους περίπτωση αποτελεί η μεταβλητή που σχετίζεται με το αν ο ερωτώμενος προμηθεύεται είδη μαναβικής από την περιοχή ή όχι, η οποία υφίσταται στην έρευνα των Press & Soderquist (1998).

Κατά τη μεταφορά ελέγχεται το μέγεθος του σφάλματος μεταφοράς και το κατά πόσον οι μεταφερόμενες τιμές εμπίπτουν στο εύρος ελέγχου. Τα τελικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.

Πίνακας 4. Αποτελέσματα ανάλυσης μεταφοράς συνάρτησης για κάθε περιοχή αναφοράς

Περιοχή	Μέση WTP	TE
Πεδιάδα π.Πο (Press & Soderquist, 1998)	547 €	119,6%
Θήβα (Christantoni et al., 2011)	209 €	16,4%

4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ & ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η μέθοδος Μεταφοράς Οφέλους έχει πολλαπλώς ελεγχθεί ως προς την αξιοπιστία της στην αποτίμηση περιβαλλοντικών αγαθών. Ορισμένοι ερευνητές διαπιστώνουν ότι ως προς την αμφισβήτηση που δέχεται η μέθοδος λίγα πράγματα έχουν αλλάξει τα τελευταία 20 χρόνια. Ειδικά για τα υπόγεια νερά, οι απόψεις των ερευνητών φαίνεται να συγκλίνουν στο ότι η αβεβαιότητα που εκφράζεται για τις αξίες που εκτιμώνται με

τις πρωτογενείς μεθόδους, πολλαπλασιάζεται όταν οι αξίες μεταφέρονται σε άλλες περιοχές.

Οι Ready & Navrud (2006) συνοψίζοντας συμπεράσματα διαφόρων μελετών διαπιστώνουν ότι:

1. Σε διεθνείς μεταφορές οφέλους το μέσο σφάλμα μεταφοράς κυμαίνεται μεταξύ 20% και 40%, ενώ επιμέρους σφάλματα μπορεί να αγγίξουν το 200%
2. Οι τιμές σφάλματος μεταφοράς βρίσκονται στα ίδια επίπεδα είτε πρόκειται για διεθνείς Μεταφορές Οφέλους είτε για ενδοχώριες μεταφορές.
3. Οι διεθνείς μεταφορές εμφανίζουν συχνά μικρότερα σφάλματα όταν χρησιμοποιούνται στοιχεία από μια «δεξαμενή» πολλών χωρών.
4. Οι αξίες μη-χρήσης φαίνεται να παρουσιάζουν σταθερότερη συμπεριφορά κατά τη μεταφορά από χώρα σε χώρα (βλ. και Kristofersson & Navrud, 2007).

Τα ευρήματα της παρούσας έρευνας επιβεβαιώνουν τη διεθνή εμπειρία. Το μικρότερο εύρος σφάλματος προκύπτει από τη χρήση όλων των τιμών των διαθέσιμων μελετών (πολλαπλή μεταφορά τιμής για Σ1). Η περαιτέρω εξειδικευμένη επεξεργασία των διαθέσιμων μελετών οδηγεί σε μεγαλύτερο σφάλμα (έως και 206% για τις αξίες χρήσης), όπως παρατηρούν και οι Bateman et al. (2000). Η μεταφορά τιμής μόνο από την περίπτωση της Θήβας, οδηγεί σε σφάλμα υποεκτίμησης 33-45%. Η διαφοροποίηση αυτή αποδίδεται κυρίως στη διαφοροποίηση του περιβαλλοντικού προβλήματος και των αντιλήψεων του πληθυσμού μεταξύ των περιοχών εφαρμογής και αναφοράς.

Όσον αφορά στη μεταφορά συνάρτησης, η έρευνα της Θήβας οδήγησε σε υποεκτίμηση της αναμενόμενης προθυμίας πληρωμής κατά 16% περίπου, ενώ αυτή της Ιταλίας σε υπερεκτίμηση κατά 120%. Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν συμβατότητα με τα ευρήματα άλλων ερευνητών, όπως οι Eshet et al. (2007), οι οποίοι αναφέρουν ότι η ομοιότητα των χαρακτηριστικών αγαθού και πληθυσμού οδηγούν σε μικρότερο σφάλμα εκτίμησης κατά τη μεταφορά συνάρτησης.

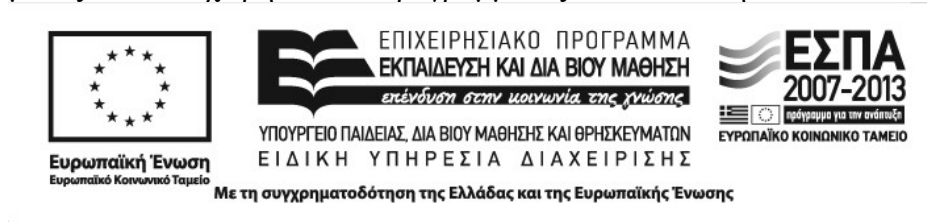
Αναφορικά με το επίπεδο του σφάλματος μεταξύ μεταφοράς τιμής και μεταφοράς συνάρτησης, οι απόψεις στη βιβλιογραφία δίστανται. Με βάση τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας φαίνεται ότι η μεταφορά τιμής οδηγεί σε μικρότερο σφάλμα εκτίμησης, σε σύγκριση με τη μεταφορά συνάρτησης. Αυτό αποδίδεται στην απουσία διαθέσιμων δεδομένων για άλλες μεταβλητές πλην των δημογραφικών (π.χ. πεποιθήσεων του ερωτώμενου για διάφορα θέματα) στην περιοχή εφαρμογής (υπό την παραδοχή ότι δεν έχει εκπονηθεί πρωτογενής έρευνα στην περιοχή ενδιαφέροντος), γεγονός που δυσχεραίνει την εφαρμογή του οικονομετρικού μοντέλου της περιοχής αναφοράς.

Συμπερασματικά, είναι σαφές ότι η πρωτογενής έρευνα αποτελεί σε κάθε περίπτωση την «πρώτη καλύτερη» (first-best) επιλογή. Ωστόσο, όταν για λόγους κόστους ή χρόνου δεν είναι εφικτή η εκπόνηση πρωτογενούς μελέτης, η μέθοδος Μεταφοράς Οφέλους αποτελεί τη «δεύτερη καλύτερη» (second-best) λύση, συμβάλλοντας θετικά στην ορθότερη λήψη αποφάσεων. Σε αυτή τη βάση, η μέθοδος Μεταφοράς Οφέλους μπορεί να αξιοποιηθεί και στο πλαίσιο της Οδηγίας 2000/60/ΕΚ. Μακροπρόθεσμα, ωστόσο, θα πρέπει να ενισχυθεί η έρευνα στην αποτίμηση των υδατικών πόρων με πρωτογενείς μελέτες στον ελλαδικό χώρο, με σκοπό τη δημιουργία μιας εξειδικευμένης ελληνικής βάσης δεδομένων που θα βελτιώσει την ακρίβεια των δευτερογενών εκτιμήσεων στο εν λόγω πεδίο.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα αποτελεί τμήμα ευρύτερης έρευνας η οποία συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και εθνικούς πόρους, στο

πλαίσιο της πράξης «Ηράκλειτος II - Ενίσχυση του ανθρώπινου ερευνητικού δυναμικού μέσω της υλοποίησης βασικής και εφαρμοσμένης έρευνας σε επίπεδο διδακτορικού διπλώματος» του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Διά Βίου Μάθηση».



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Αλεξιάδου, Μ.Χ., Παναγόπουλος, Α. και Σιδέρης, Γ., 2011. *Υδρογεωλογική μελέτη τεχνητού εμπλουτισμού Ανατολικής Βοιωτίας – Σύνταξη μαθηματικού μοντέλου*. Τεύχος υδρογεωλογικής μελέτης, υποτεύχος τελικής έκθεσης ΥΔ-ΤΕ1.1. Τμήμα Υδρογεωλογίας, Γεωτρήσεων και Μαθηματικών Ομοιωμάτων, Δ/ση Γεωλογίας – Υδρολογίας, Διοικητικός Τομέας κοινοτικών πόρων και υποδομών, ΥΠΑΑΤ, 311σς.
- Γιαννουλόπουλος, Π., 2008. *Αναγνωριστική υδρογεωλογική – υδροχημική έρευνα ποιοτικής επιβάρυνσης των υπογείων νερών της ευρύτερης περιοχής της λεκάνης του Ασωπού Ν.Βοιωτίας*. Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών. Τεχνική Έκθεση Γ2834/Υ2062. Αθήνα.
- Μασούρα, Γ., 2008. *Ρυπαντική υδροχημεία της λεκάνης του ποταμού Ασωπού Νομού Βοιωτίας*. Μεταπτυχιακή Εργασία, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών.
- Aulong S. and Rinaudo, J.D., 2008. *Assessing the benefits of different groundwater protection levels: results and lessons learnt from a contingent valuation survey in the Upper Rhine valley aquifer, France*. Paper presented at the 13th IWRA World Water Congress 2008, 1-4 September, Montpellier, France
- Barton, D.N., 2002. *The transferability of benefit transfer: contingent valuation of water quality improvements in Costa Rica*. *Ecol Econ* 42: 147–164.
- Bateman, I.J., Jones, A.P., Nishikawa, N. and Brouwer, R., 2000. *Benefit transfer in theory and practice: A Review*. CSERGE Working Paper GEC 2000-25, 88 pp.
- Bergstrom, J.C., Boyle, K.J. and Yabe, M., 2001. *Determinants of groundwater quality values: Georgia and Maine Case Studies*. In: Bergstrom, J.C., Boyle, K.J. and Poe, G.L. (eds.), 2001. *The economic value of water quality*, Edward Elgar Publishing, pp.18-37.
- Christantoni, M., Tentes, G. and Damigos, D., 2011. *Groundwater valuation: Testing the transferability of secondary values*. Proceedings of the 3rd International Conference on Environmental Management, Engineering, Planning and Economics (CEMEPE) & SECOTOX Conference.
- Crutchfield, S.R., Cooper, J.C. and Hellerstein, D., 1997. *Benefits of Safer Drinking Water: The Value of Nitrate Reduction*. U.S. Department of Agriculture, Economic Research Service, Food and Consumer Economics Division. Agricultural Economic Report No. 752
- Dahn, V.T., 2007. *Economic Value of Groundwater Protection in the Mekong Delta*. School of Economics and Business Administration. CAULES-DANIDA Project. Available at <http://www.uwgb.edu/envsustain/CVMstudyongroundwaterpollutioninMekongDeltaofVietnam.pdf>. Accessed 26/3/2012
- Dumas, C.F., Schuhmann, P.W. and Whitehead, J.C., 2005. *Measuring the Economic Benefits of Water Quality Improvement with Benefit Transfer: An Introduction for Noneconomists*. Working Papers from Department of Economics, Appalachian State

- University, No 04-12. Available at <http://econpapers.repec.org/paper/aplwpaper/04-12.htm>. Accessed 14 December 2011.
- Edwards, S.F., 1988. *Option Prices for Groundwater Protection*. Journal of Environmental Economics and Management 15: 475-487.
- Epp, D.J. and Delavan, W., 2001. *Measuring the value of protecting ground water quality from nitrate contamination in Southeastern Pennsylvania*. In: Bergstrom, J.C., Boyle, K.J. and Poe, G.L. (eds), 2001. The economic value of water quality, Edward Elgar Publishing, pp.66-82.
- Eshet, T., Baron, M.G. and Shechter, M., 2007. Exploring Benefit Transfer: Disamenities of Waste Transfer Stations. Environ. Resour. Econ. 37(3): 521-547.
- Gren, I.M., 1995. *Costs and benefits of restoring wetlands: two Swedish case studies*. Ecological Engineering 4: 153-162.
- Hasler, B. et al., 2005. *Valuation of groundwater protection versus water treatment in Denmark by Choice Experiments and Contingent Valuation*. NERI Technical Report No. 543. National Environmental Research Institute, Ministry of the Environment, Denmark.
- Hauser, A. and Van Kooten, G.C., 1993. *Benefits of improving water quality in the abbotsford Aquifer: An application of Contingent valuation methods*. Fraser River Action Plan DOE-FRAP 1993-40. Department of Agricultural Economics, University of British Columbia, Vancouver, B.C..
- Kristofersson, D. and Navrud, S., 2007. *Can use and non-use values be transferred across countries?* In: Navrud, S., Ready, R. (eds.), 2007. Environmental Value Transfer: Issues and Methods, pp 207–225.
- Martinez, C.P. and Prantilla, E.B., 2007. *Economic Valuation of the Groundwater in Dumoy Aquifer*. 10th National Convention on Statistics (NCS). October 1-2.
- Navrud, S. and Ready, R., 2007. *Review of methods for value transfer*. In: Navrud, S. and Ready, R. (eds.), 2007. Environmental Value Transfer: Issues and Methods, pp 1–10.
- Pattanayak, S. et al., 2002. *International health benefits transfer application tool: the use of PPP and inflation indices*. Final report, prepared for Economic Analysis and Evaluation Division, Office of Policy Coordination and Economic Analysis Policy and Planning Directorate, Healthy Environments and Consumer Safety Branch, Health Canada.
- Pearce, D., 2002. *An intellectual history of environmental economics*. Annu. Rev. Energy Environ., 27: 57-81.
- Poe, G.L. and Bishop, R.C., 2001. *Information and the valuation of nitrates in Groundwater, Portage County, Wisconsin*. In: Bergstrom, J.C., Boyle, K.J. and Poe, G.L. (eds.), 2001. The economic value of water quality, Edward Elgar Publishing, pp. 38-65.
- Press, J. and Soderquist, T., 1998. *On estimating the benefits of groundwater protection: a contingent valuation study in Milan*. In: Swanson T and Vighi M (eds.), 2004. Regulating Chemical Accumulation in the Environment. Cambridge University Press, pp.121-182
- Ready, R. and Navrud, S., 2006. *International benefit transfer: Methods and validity tests*. Ecol. Econ. 60: 429-434.
- Rosenberger, R.S. and Loomis, J.B., 2001. *Benefit transfer of outdoor recreation use values: A technical document supporting the Forest Service Strategic Plan*. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-72. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station (2000 revision), 60 pp.

- Santos, J.M.L., 2007. *Transferring landscape values: How and how accurately*. In: Navrud, S. and Ready, R. (eds.), 2007. *Environmental Value Transfer: Issues and Methods*, pp 45–75.
- Scarpa, R., Hutchinson, W.G., Chilton, S.M. and Buongiorno, J., 2007. *Benefit value transfers conditional on site attributes: some evidence of reliability from forest recreation in Ireland*. In: Navrud, S., and Ready, R (eds.).2007. *Environmental Value Transfer: Issues and Methods*, pp 89–109.
- Stenger, A. and Willinger, M., 1998. *Preservation value for groundwater quality in a large aquifer: a contingent-valuation study of the Alsatian aquifer*. *Journal of Environmental Management* 53: 177–193.
- Tentes, G. and Damigos, D., 2011. *The Lost Value of Groundwater: The Case of Asopos River Basin in Central Greece*. *Water Resour. Manage* 26:147–164.
- WATECO, 2003. *Economics and the environment*. Common Implementation Strategy for the Water Framework Directive (2000/60/EC), Guidance Document No1, 270 pp.
- Wei, Y., Davidson, B., Chen, D., White, R., Li, B. and Zhang, J., 2006. *Can Contingent Valuation be Used to Measure the in Situ Value of Groundwater on the North China Plain?* *Water. Resour. Manag.* 21: 1735–1749.

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΥΔΡΕΥΣΗΣ ΑΠΟ ΤΙΣ
Δ.Ε.Υ.Α. ΤΩΝ ΝΟΜΩΝ ΠΕΛΛΑΣ ΚΑΙ ΗΜΑΘΙΑΣ:
ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ**

**Σταύρος Γιαννόπουλος¹, Ολυμπία Πέτκου^{2*}, Ιωάννα Γιαννοπούλου³,
Χρήστος Τζιμόπουλος⁴**

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τ.Α.Τ.Μ., Τομέας Σ.Υ.Ε.,
54124 Θεσσαλονίκη.

e-mails: ¹giann@vergina.eng.auth.gr, ²olypetkou@yahoo.gr, ³igiannop@gmail.com,
⁴tzimop@eng.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Έγινε μια έρευνα με τη συμπλήρωση δύο ερωτηματολογίων για τη διερεύνηση της υδατικής πολιτικής που ακολουθείται από τις Δ.Ε.Υ.Α. των νομών Πέλλας και Ημαθίας. Στην έρευνα αυτή επιχειρείται όχι μόνο η ανάλυση της οικονομικής διάστασης του νερού, αλλά και η διερεύνηση της τιμολογιακής πολιτικής που ακολουθείται από αυτές, η αποδοτικότητά της, η δυνατότητα αύξησης των τιμών των εφαρμοζόμενων τιμολογίων κ.λπ. Επίσης, εξετάζονται θέματα που αφορούν στην ποιότητα του πόσιμου νερού. Τέλος, γίνονται προτάσεις για τον επαναπροσδιορισμό της υδατικής τους πολιτικής, τόσο ως προς τη διαχείριση της ζήτησης για την εξοικονόμηση νερού, όσο και προς την κατεύθυνση της ποιότητας του πόσιμου νερού.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Αστική χρήση νερού, πολιτική τιμολόγησης, ποιότητα πόσιμου νερού, Δημοτικές Επιχειρήσεις Ύδρευσης Αποχέτευσης (Δ.Ε.Υ.Α.), Νομός Πέλλας, Νομός Ημαθίας.

**INVESTIGATION OF WATER SUPPLY CONDITIONS FROM
M.W.S.C. (D.E.Y.A) OF THE PREFECTURES OF PELLA AND
IMATHIA: PROBLEMS AND PERSPECTIVES**

**Stavros Yannopoulos¹, Olympia Petkou^{2*}, Ioanna Giannopoulou³,
Christos Tzimopoulos⁴**

Aristotle University of Thessaloniki, School of Rural and Surveying Engineering,
Department of Transportation and Hydraulic Engineering,
GR-54124, Thessaloniki, Greece

e-mails: ¹giann@vergina.eng.auth.gr, ²olypetkou@yahoo.gr, ³igiannop@gmail.com,
⁴tzimop@eng.auth.gr

ABSTRACT

Within the framework of the present paper, a survey became through two questionnaires in order to investigate the water policy, which is followed from the Municipal Water and Sewage Companies of the Prefectures (M.W.S.C. - D.E.Y.A.) of Pella and Imathia. Particularly, in this survey, the aim is not only the analysis of economic dimension of water, but the investigation of pricing policy of water supply which is followed by these Companies, its efficiency, the possibility to increase the prices, the problems which they face etc. Finally, suggestions are made for the redefinition of water policy concerning the demand management in order to water saving and ensuring of drinking water quality.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Urban water, pricing policy, potable water quality, Municipal Water and Sewage Companies (M.W.S.C. - D.E.Y.A.), Prefecture of Pella, Prefecture of Imathia.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το νερό αποτελεί ουσιώδες στοιχείο για την ανθρώπινη υγεία, καθώς και ένα από τους σημαντικότερους φυσικούς πόρους που είναι αναγκαίοι για την κοινωνική και οικονομική ανάπτυξη. Η διανομή νερού επαρκούς ποιότητας για οικιακή κατανάλωση αποτελεί σημαντικό προαπαιτούμενο για την ανάπτυξη (Ε.Ε.Σ., 2010).

Η ύδρευση είναι ένας εξαιρετικά ευαίσθητος τομέας, γι' αυτό η Οδηγία 2000/60/ΕΚ και ο ν.3199/2003 ορίζουν ότι η χρήση νερού για ύδρευση έχει προτεραιότητα ως προς την ποιότητα και την ποσότητα έναντι κάθε άλλης χρήσης (βιομηχανική, ενεργειακή κ.λπ.). Οι γενικοί κανόνες χρήσεως των υδάτων στην Ελλάδα ορίζονται με σαφήνεια στο άρθρο 10 του ν. 3199/2003 σύμφωνα με τους οποίους απαιτούνται: α) βιώσιμη και ισόρροπη ικανοποίηση των αναπτυξιακών αναγκών, β) διασφάλιση της μακροπρόθεσμης προστασίας των υδάτων, γ) επάρκεια αποθεμάτων και διατήρηση της ποιότητάς τους, δ) μείωση και αποτροπή της ρύπανσής τους, ε) ικανοποίηση της ζήτησης του νερού με βάση τα όρια και τις δυνατότητες των υδατικών αποθεμάτων κ.λπ. Μέσα στα πλαίσια των γενικών αυτών κανόνων χρήσεως του νερού είναι απαραίτητη η γνώση των υφιστάμενων συνθηκών για καθεμία κατηγορία χρήσης νερού, ώστε να ληφθούν αυτές υπόψη στα σχέδια διαχείρισης και στα προγράμματα μέτρων (άρθρα 11 και 13 της Οδηγίας 2000/60/ΕΚ και άρθρα 7 και 8 του ν. 3199/2003) (Γιαννόπουλος κ.α., 2006).

Στην Ελλάδα μέχρι τα πρώτα χρόνια της δεκαετίας του '80, η διαχείριση του πόσιμου νερού γινόταν από τις υπηρεσίες ύδρευσης των Οργανισμών Τοπικής Αυτοδιοίκησης (Ο.Τ.Α.), που κατά κανόνα ήταν πλημμελώς οργανωμένες και εξοπλισμένες με άμεση συνέπεια στην ποιότητα των παρεχομένων υπηρεσιών. Σήμερα, σύμφωνα με την ισχύουσα νομοθεσία (ν. 1069/1980), οι κύριοι και νόμιμοι διαχειριστές του πόσιμου νερού και των υγρών αποβλήτων είναι οι Δημοτικές Επιχειρήσεις Ύδρευσης Αποχέτευσης (Δ.Ε.Υ.Α.), που δραστηριοποιούνται σε πόλεις με πληθυσμό μεγαλύτερο των 10.000 κατοίκων, εκτός της μείζονος περιοχής της Πρωτεύουσας και του πολεοδομικού συγκροτήματος Θεσσαλονίκης, όπου δραστηριοποιούνται η Ε.Υ.Δ.Α.Π. Α.Ε. και η Ε.Υ.Α.Θ. Α.Ε., αντιστοίχως. Οι Δ.Ε.Υ.Α. αποτελούν νομικά πρόσωπα ιδιωτικού δικαίου κοινωφελούς χαρακτήρα, τα οποία λειτουργούν με τους κανόνες της ιδιωτικής οικονομίας (ν. 1069/1980), εφόσον δεν ορίζεται διαφορετικά από άλλο νόμο, και είναι επιχειρήσεις ειδικού σκοπού (ν. 3463/2006).

Στους Ο.Τ.Α. που δεν έχουν ενταχθεί σε Δ.Ε.Υ.Α., η διαχείριση του πόσιμου νερού γίνεται από τις υπηρεσίες ύδρευσης τους. Οι επιχειρήσεις ύδρευσης (Δ.Ε.Υ.Α. κ.λπ.) πρέπει να στοχεύουν όχι μόνο στην οικονομική τους βιωσιμότητα και στην κάλυψη των υδρευτικών αναγκών, αλλά πρέπει να επιδιώκουν και την υψηλή ποιότητα παρεχομένων υπηρεσιών, φροντίζοντας ταυτόχρονα για την προστασία του περιβάλλοντος και τη βιωσιμότητα του υδατικού δυναμικού των απολήψεων εφαρμόζοντας μία ολοκληρωμένη υδρευτική πολιτική, η οποία θα δίνει έμφαση στη διαχείριση της ζήτησης του νερού και όχι της προσφοράς του.

Όμως, ενώ έχει γίνει αρκετή προσπάθεια για τη διερεύνηση των συνθηκών ύδρευσης από τις Δ.Ε.Υ.Α. διαφόρων πόλεων της χώρας, όπως π.χ. Βόλου, Ξάνθης, Κομοτηνής, Καρδίτσας, Κοζάνης, Θεσσαλονίκης κ.λπ. (Kolokytha et al., 2002, Φαφούτης κ.α., 2003, Κολοκυθά κ.α., 2005, Ανέστης κ.α., 2005, Mylopoulos and Mentis, 2005, Vagiona et al., 2005, Γιαννόπουλος κ.α., 2006, Γκράτζιου, 2006, Γιαννόπουλος κ.α., 2009), δεν φαίνεται να έχει γίνει ανάλογη προσπάθεια για τις Δ.Ε.Υ.Α. στο δυτικό και βόρειο τμήμα της Κεντρικής Μακεδονίας.

Στην παρούσα εργασία διερευνάται η υφιστάμενη υδατική πολιτική των Δ.Ε.Υ.Α. των νομών Ημαθίας και Πέλλας. Συγκεκριμένα, εξετάζονται η τιμολογιακή τους πολιτική για την ύδρευση, η αποδοτικότητά της, η ενδεχόμενη αύξηση των τιμών των εφαρμοζόμενων τιμολογίων, η ποιότητα του νερού που παρέχεται στους καταναλωτές, τα προβλήματα που αντιμετωπίζουν οι επιχειρήσεις για την ικανοποίηση των μελλοντικών τους αναγκών, οι ενέργειες που πρέπει να γίνονται για τη διαφύλαξη ή / και τη βελτίωση της ποιότητας του

παρεχόμενου νερού, η παρακολούθηση και ο έλεγχος της ποιότητας του πόσιμου νερού και τέλος, γίνονται προτάσεις για τον επαναπροσδιορισμό της υδατικής τους πολιτικής για την εξοικονόμηση νερού και την παροχή πόσιμου νερού καλής ποιότητας στους δημότες.

2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Ο νομός Ημαθίας, που βρίσκεται στο δυτικό τμήμα της Κεντρικής Μακεδονίας, έχει έκταση περίπου 1.701 km² και συνορεύει βόρεια με το νομό Πέλλας, δυτικά και νοτιοδυτικά με το νομό Κοζάνης, ανατολικά με το νομό Θεσσαλονίκης, νότια και νοτιοανατολικά με το νομό Πιερίας, ενώ ένα μικρό τμήμα του στα ανατολικά βρέχεται από τον Θερμαϊκό κόλπο. Σύμφωνα με την απογραφή του έτους 2001, ο νομός Ημαθίας έχει πληθυσμό 144.177 κατοίκων, συγκεντρώνει ποσοστό 1,32% του πληθυσμού της χώρας και αποτελείται από 3 Δήμους (ν. 3852/2010 - σχέδιο «Καλλικράτης»), οι οποίοι προήλθαν με τη συνένωση των 12 Καποδιστριακών Δήμων. Ο νομός Πέλλας, που βρίσκεται στο βόρειο τμήμα της Κεντρικής Μακεδονίας, έχει έκταση 2.506 km² και συνορεύει βόρεια με την Πρώην Γιουγκοσλαβική Δημοκρατία της Μακεδονίας, δυτικά με το νομό Φλώρινας, ανατολικά με το νομό Κιλκίς, νότια με τους νομούς Ημαθίας και Κοζάνης και νοτιοανατολικά με το νομό Θεσσαλονίκης. Σύμφωνα με την απογραφή του έτους 2001, ο νομός Πέλλας έχει πληθυσμό 149.531 κατοίκων, συγκεντρώνει ποσοστό 1,36% του πληθυσμού της χώρας και αποτελείται από 4 Δήμους (ν. 3852/2010 - σχέδιο «Καλλικράτης»), οι οποίοι προήλθαν με τη συνένωση των 11 Καποδιστριακών Δήμων.

3. ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΥΔΡΕΥΣΗΣ

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας διεξήχθη έρευνα με σκοπό τη συλλογή στοιχείων για την υδατική πολιτική, που ακολουθεί καθεμία Δ.Ε.Υ.Α της περιοχής μελέτης. Χρησιμοποιήθηκαν δύο ερωτηματολόγια από τα οποία το ένα αφορούσε στην τιμολογιακή πολιτική και το άλλο στην ποιότητα του πόσιμου νερού. Συγκεκριμένα, με το πρώτο ερωτηματολόγιο εξετάστηκαν θέματα: (α) ζήτησης νερού (ταξινόμηση χρήσεων, κατανάλωσης νερού), (β) τιμολόγησης (μέθοδος, περιθώρια αύξησης της τιμής του νερού, αποτελέσματα οικονομικών μέτρων), (γ) πραγματοποίησης νέων έργων, των οποίων το κόστος να καλύπτεται μερικώς ή ολικώς από την αντίστοιχη τιμή χρέωσης νερού και (δ) προβλήματα νερού. Με το δεύτερο ερωτηματολόγιο εξετάστηκαν θέματα: (α) εργαστηριακού ελέγχου του νερού (ύπαρξη εργαστηρίου ελέγχου ή συνεργαζόμενων με τη Δ.Ε.Υ.Α. εργαστηρίων, εξασφάλιση αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων, μέθοδος απολύμανσης κ.λπ.), (β) δειγματοληψίας (αντιπροσωπευτικός χαρακτήρας των δειγμάτων, ζώνες παροχής, τήρηση του Παραρτήματος II της Κ.Υ.Α. Υ2/2600/2001 κ.λπ.), (γ) ενημέρωσης του καταναλωτικού κοινού, (δ) πραγματοποίησης έργων εκσυγχρονισμού και βελτίωσης των δικτύων ύδρευσης και (ε) λήψης μέτρων εφαρμογής του προγράμματος «Καλλικράτης» (ν. 3852/2010). Τα ερωτηματολόγια συμπληρώθηκαν για καθεμία Δ.Ε.Υ.Α. που λειτουργεί στα όρια των νομών Ημαθίας και Πέλλας με βάση στοιχεία και πληροφορίες που ελήφθησαν, είτε από τους Διευθυντές τους, είτε από αρμόδιους υπαλλήλους τους.

Στα όρια του Νομού Ημαθίας (περιφερειακή ενότητα με το ν. 3852/2010) δραστηριοποιούνται: (α) Η Δ.Ε.Υ.Α. Βέροιας με περιοχή αρμοδιότητας το Δήμο Βέροιας, ο οποίος έχει έδρα τη Βέροια και ιστορική έδρα τη Βεργίνα και περιλαμβάνει τις Δημοτικές Ενότητες (i) Αποστόλου Παύλου (1 Δημοτική Κοινότητα και 4 Τοπικές Κοινότητες), (ii) Βεργίνας (4 Τοπικές Κοινότητες), (iii) Βέροιας (1 Δημοτική Κοινότητα και 10 Τοπικές Κοινότητες), (iv) Δοβράς (5 Τοπικές Κοινότητες) και (v) Μακεδονίδος (4 Τοπικές Κοινότητες). (β) Η Δ.Ε.Υ.Α. Αλεξάνδρεια με περιοχή αρμοδιότητας το Δήμο Αλεξάνδρεια, ο οποίος έχει έδρα την Αλεξάνδρεια και περιλαμβάνει τις Δημοτικές Ενότητες (i)

Αλεξάνδρειας (1 Δημοτική Κοινότητα και 5 Τοπικές Κοινότητες), (ii) Αντιγονιδών (6 Τοπικές Κοινότητες), (iii) Μελίκης (5 Τοπικές Κοινότητες) και (iv) Πλατέως (2 Δημοτικές Κοινότητες και 6 Τοπικές Κοινότητες) και (γ) τη Δ.Ε.Υ.Α. Νάουσας με περιοχή αρμοδιότητας το Δήμο Νάουσας, ο οποίος έχει έδρα τη Νάουσα και περιλαμβάνει τις Δημοτικές Ενότητες (i) Ανθεμίων (1 Δημοτική Κοινότητα και 5 Τοπικές Κοινότητες), (ii) Ειρηνούπολης (3 Τοπικές Κοινότητες) και (iii) Νάουσας (1 Δημοτική Κοινότητα και 4 Τοπικές Κοινότητες).

Στα όρια του Νομού Πέλλας (περιφερειακή ενότητα με το ν. 3852/2010) δραστηριοποιούνται: (α) Η Δ.Ε.Υ.Α. Πέλλας με περιοχή αρμοδιότητας το Δήμο Πέλλας, ο οποίος έχει έδρα τα Γιαννιτσά και ιστορική έδρα την Πέλλα και περιλαμβάνει τις Δημοτικές Ενότητες (i) Γιαννιτσών (1 Δημοτική Κοινότητα και 2 Τοπικές Κοινότητες), (ii) Κρύας Βρύσης (1 Δημοτική Κοινότητα και 3 Τοπικές Κοινότητες), (iii) Κύρρου (1 Δημοτική Κοινότητα και 6 Τοπικές Κοινότητες), (iv) Μεγάλου Αλεξάνδρου (1 Δημοτική Κοινότητα και 6 Τοπικές Κοινότητες) και (v) Πέλλας (1 Δημοτική Κοινότητα και 5 Τοπικές Κοινότητες) (β) τη Δ.Ε.Υ.Α. Έδεσσας με περιοχή αρμοδιότητας το Δήμο Έδεσσας, ο οποίος έχει έδρα την Έδεσσα και περιλαμβάνει τις Δημοτικές Ενότητες (i) Βεγορίτιδας (5 Τοπικές Κοινότητες) και (ii) Έδεσσας (1 Δημοτική Κοινότητα και 9 Τοπικές Κοινότητες), (γ) τη Δ.Ε.Υ.Α. Αλμωπίας με περιοχή αρμοδιότητας το Δήμο Αλμωπίας, ο οποίος έχει έδρα την Αριδαία και περιλαμβάνει τις Δημοτικές Ενότητες (i) Αριδαίας (1 Δημοτική Κοινότητα και 16 Τοπικές Κοινότητες) και (ii) Εξαπλατάνου (13 Τοπικές Κοινότητες) και (δ) τη Δ.Ε.Υ.Α. Σκύδρας με περιοχή αρμοδιότητας το Δήμο Σκύδρας, ο οποίος έχει έδρα τη Σκύδρα και περιλαμβάνει τις Δημοτικές Ενότητες (i) Μενήιδος (6 Τοπικές Κοινότητες) και (ii) Σκύδρας (1 Δημοτική Κοινότητα και 10 Τοπικές Κοινότητες).

Αναλυτικότερες πληροφορίες για τους Δήμους αυτούς δίνονται στην απόφαση αρ. 45892/2010 (ΦΕΚ 1292/τ.Β/11-8-2010) του Υπουργού Εσωτερικών. Στους Πίνακες 1 και 2 δίνονται ο πληθυσμός που εξυπηρετείται από τις Δ.Ε.Υ.Α των νομών Ημαθίας και Πέλλας, η εξυπηρετούμενη έκταση, τα εγκατεστημένα υδρόμετρα και η συχνότητα καταμέτρησης.

Πίνακας 1: Στοιχεία των Δ.Ε.Υ.Α. του νομού Ημαθίας

Δ.Ε.Υ.Α.	Πληθυσμός	Εξυπ. Έκταση	Υδρόμετρα	Καταμέτρηση
(-)	(κάτοικοι)	(km ²)	(τεμ.)	(μήνες)
Βέροιας	65.968	791,43	24.818	2
Αλεξάνδρειας	43.209	473,39	-	2
Νάουσας	35.000	424,91	15.000	4

Πίνακας 2: Στοιχεία των Δ.Ε.Υ.Α. του νομού Πέλλας

Δ.Ε.Υ.Α.	Πληθυσμός	Εξυπ. Έκταση	Υδρόμετρα	Καταμέτρηση
(-)	(κάτοικοι)	(km ²)	(τεμ.)	(μήνες)
Πέλλας	70.000	668,58	-	2
Έδεσσας	29.030	-	11.749	4
Αλμωπίας	29.354	980,86	10.000	12
Σκύδρας	21.147	239,57	7.500	4

Από τον Πίνακα 1 προκύπτει ότι το σύνολο των εγκατεστημένων υδρομέτρων για τις Δ.Ε.Υ.Α. Βέροιας και Νάουσας ανέρχεται σε 39.818, ενώ για τη Δ.Ε.Υ.Α. Αλεξάνδρειας δεν

υπάρχουν στοιχεία. Από τον Πίνακα 2 προκύπτει ότι το σύνολο των εγκατεστημένων υδρομέτρων για τις Δ.Ε.Υ.Α. Πέλλας, Αλμωπίας και Σκύδρας ανέρχεται σε 29.249, ενώ για τη Δ.Ε.Υ.Α. Έδεσσας δεν υπάρχουν στοιχεία.

Η κάλυψη των υδρευτικών αναγκών της Δ.Ε.Υ.Α. Βέροιας γίνεται από τις πηγές Ασπρονερίου και Μαυρονερίου, της Δ.Ε.Υ.Α. Αλεξάνδρειας από τον ποταμό Τριπόταμο και γεωτρήσεις, της Δ.Ε.Υ.Α. Νάουσας από πηγές και τον ποταμό Αραπίτσα, της Δ.Ε.Υ.Α. Πέλλας από πηγές στο όρος Πάικο και γεωτρήσεις, της Δ.Ε.Υ.Α. Αλμωπίας από πηγές και γεωτρήσεις, της Δ.Ε.Υ.Α. Σκύδρας από γεωτρήσεις και της Δ.Ε.Υ.Α. Έδεσσας από πηγές. Σύμφωνα με τα στοιχεία των Δ.Ε.Υ.Α. Βέροιας, Αλεξάνδρειας, Νάουσας, Πέλλας, Έδεσσας και Αλμωπίας η μέση ειδική ημερήσια κατανάλωση ανέρχεται σε 102, 130, 110, 98, 157 και 224 L/κατ/μέρα, αντιστοίχως, ενώ στη Δ.Ε.Υ.Α. Σκύδρας δεν τηρούνται στοιχεία.

4. ΤΙΜΟΛΟΓΙΑΚΗ ΠΟΛΙΤΙΚΗ ΤΩΝ Δ.Ε.Υ.Α.

4.1. ΟΙΚΙΑΚΗ ΧΡΗΣΗ

Οι Δ.Ε.Υ.Α. που συμμετέχουν στην έρευνα, εκτός από τις Δ.Ε.Υ.Α. Αλμωπίας και Σκύδρας, εφαρμόζουν το κλιμακωτό τιμολόγιο. Οι υπηρεσίες που καλύπτουν τα τιμολόγια χρέωσης περιλαμβάνουν συντήρηση δικτύου, εκτέλεση νέων έργων, επεξεργασία του νερού, εκσυγχρονισμό του δικτύου, παροχή υπηρεσιών και αποσβέσεις παγίων δαπανών. Στη Δ.Ε.Υ.Α. Βέροιας περιλαμβάνουν επιπλέον και δαπάνες για το βιολογικό καθαρισμό. Αναλυτικότερα, η τιμολογιακή πολιτική για οικιακή χρήση που ακολουθείται από τις Δ.Ε.Υ.Α. των νομών Ημαθίας και Πέλλας κατατάσσεται σε τέσσερις ομάδες:

Ομάδα 1η: Κλιμακωτή χρέωση, ίδια για όλες τις Δημοτικές και Τοπικές Κοινότητες

Το τιμολόγιο της Δ.Ε.Υ.Α. Νάουσας περιλαμβάνει τέσσερις κλίμακες (0,319 €/m³ για κατανάλωση < 20 m³/4μηνο, 0,50 €/m³ για κατανάλωση 40-60 m³/4μηνο, 0,65 €/m³ για κατανάλωση 60-80 m³/4μηνο και 0,80 €/m³ για κατανάλωση >80 m³/4μηνο). Στη Δ.Ε.Υ.Α. Πέλλας το τιμολόγιο περιλαμβάνει έντεκα κλίμακες και συγκεκριμένα, για κατανάλωση 0-10 m³/2μηνο η χρέωση είναι 0,658 €/m³. Στη συνέχεια, για κάθε κλίμακα αυξάνεται η χρέωση σε σχέση με την αμέσως προηγούμενη. Η αύξηση αυτή είναι 0,062 €/m³ για κατανάλωση 11-20 m³/2μηνο, 0,074 €/m³ για κατανάλωση 21-30 m³/2μηνο, 0,381 €/m³ για κατανάλωση 31-40 m³/2μηνο, 0,467 €/m³ για κατανάλωση 41-50 m³/2μηνο, 0,517 €/m³ για κατανάλωση 51-60 m³/2μηνο, 0,541 €/m³ για κατανάλωση 61-120 m³/2μηνο, 1,046 €/m³ για κατανάλωση 121-200 m³/2μηνο, 1,599 €/m³ για κατανάλωση 201-300 m³/2μηνο, 2,153 €/m³ για κατανάλωση 301-400 m³/2μηνο και μία αύξηση της προηγούμενης κλίμακας 2,460 €/m³ για κατανάλωση >401 m³/2μηνο). Στη Δ.Ε.Υ.Α. Έδεσσας το τιμολόγιο περιλαμβάνει τρεις κλίμακες (0,1679 €/m³ για κατανάλωση 0-34 m³/4μηνο, 0,19 €/m³ για κατανάλωση 34-80 m³/4μηνο και 0,29 €/m³ για κατανάλωση >80 m³/4μηνο) και πάγιο τέλος 26,00 €/υδρ./4μηνο.

Ομάδα 2η: Σταθερή τιμή χρέωσης με σταθερό ή όχι πάγιο ανεξάρτητα από την κατανάλωση

Στην ομάδα αυτή υπάγονται: (α) Η Δ.Ε.Υ.Α. Αλμωπίας, της οποίας το τιμολόγιο περιλαμβάνει μια σταθερή τιμή 0,16 €/m³ ανεξάρτητα από την ποσότητα που καταναλώνεται. Η χρέωση αυτή επιβαρύνεται με ειδικό τέλος (ποσοστό 80% επί της αξίας του νερού που καταναλώνεται) εκτός από τις Τοπικές Κοινοτικές, στις οποίες δεν υπάρχουν υδρόμετρα και η χρέωση γίνεται σε ετήσια βάση με 20,5 € / άτομο. (β) Η Δ.Ε.Υ.Α. Σκύδρας της οποίας το τιμολόγιο περιλαμβάνει μια σταθερή τιμή 0,25 €/m³ ανεξάρτητα από την κατανάλωση.

Ομάδα 3η: Κλιμακωτή χρέωση, διαφορετική για τη Δημοτική και τις Τοπικές Κοινότητες

Στην ομάδα αυτή ανήκει μόνο η Δ.Ε.Υ.Α. Αλεξάνδρειας, η οποία εφαρμόζει άλλη τιμολογιακή πολιτική για τη Δημοτική Κοινότητα της Αλεξάνδρειας και άλλη τιμολογιακή πολιτική για τις Τοπικές Κοινότητες. Συγκεκριμένα, στη Δημοτική Κοινότητα Αλεξάνδρειας για κατανάλωση μέχρι 21 m³ η συνολική χρέωση είναι 34,85 €. Για μεγαλύτερες

καταναλώσεις το τιμολόγιο αποτελείται από τρεις κλίμακες (0,358 €/m³ για κατανάλωση 21 m³/2μνηο, 0,546 €/m³ για κατανάλωση 22-27 m³/2μνηο και 0,625 €/m³ για κατανάλωση 28-100 m³/2μνηο), ενώ στις Τοπικές Κοινότητες το τιμολόγιο περιλαμβάνει πέντε κλίμακες (0,10 €/m³ για κατανάλωση 0-25 m³/2μνηο, 0,20 €/m³ για κατανάλωση 26-50 m³/2μνηο, 0,30 €/m³ για κατανάλωση 51-75 m³/2μνηο, 0,40 €/m³ για κατανάλωση 76-100 m³/2μνηο και 0,50 €/m³ για κατανάλωση >100 m³/2μνηο) και πάγιο τέλος 8,0 €/υδρ./2μνηο. Η χρέωση αυτή επιβαρύνεται με ειδικό τέλος 80%.

Ομάδα 4η: Διαφοροποίηση της χρέωσης μεταξύ πόλης και Δημοτικών Ενοτήτων.

Στην ομάδα αυτή ανήκει μόνο η Δ.Ε.Υ.Α. Βέροιας. Στις Δημοτικές Ενώτητες Αποστόλου Παύλου, Βεργίνας, Δοβρά και Μακεδονίδος η χρέωση του νερού είναι σταθερή και ανεξάρτητη της κατανάλωσης 36,70€/έτος/διαμέρισμα. Στη Δημοτική Ενότητα της Βέροιας για κατανάλωση μέχρι 20 m³ η συνολική χρέωση ανέρχεται σε 18,64 €/2μνηο. Για κατανάλωση > 20 m³, η χρέωση γίνεται κλιμακωτά ως εξής: 1,11 €/m³ για κατανάλωση 21 m³ και προσαύξηση της τιμής αυτής κατά 0,02 €/m³ μέχρι κατανάλωση >21-24 m³, 1,18 €/m³ για κατανάλωση 25 m³, 1,20 €/m³ για κατανάλωση 26 m³ και προσαύξηση της τιμής αυτής κατά 0,01 €/m³ για κατανάλωση των >26-28 m³, 1,24 €/m³ για κατανάλωση 29 m³ και προσαύξηση της τιμής αυτής κατά 0,01 €/m³ για κατανάλωση των >29-33 m³, 1,28 €/m³ για κατανάλωση 33-34 m³, 1,29 €/m³ για κατανάλωση 35 m³, 1,30 €/m³ για κατανάλωση 36 m³, 1,31 €/m³ για κατανάλωση 37-38 m³, 1,32 €/m³ για κατανάλωση 39 m³, 1,33 €/m³ για κατανάλωση 40-41 m³, 1,34 €/m³ για κατανάλωση 42-43 m³ κ.ο.κ. μέχρι την κατανάλωση των 47 m³, 1,37 €/m³ για κατανάλωση 48-50 m³, 1,38 €/m³ για κατανάλωση 51-53 m³ κ.ο.κ. μέχρι την κατανάλωση των 59 m³, 1,41 €/m³ για κατανάλωση 60-63 m³, 1,42 €/m³ για κατανάλωση 64-68 m³, 1,43 €/m³ για κατανάλωση 69-73 m³, 1,44 €/m³ για κατανάλωση 74-80 m³, 1,45 €/m³ για κατανάλωση 81-87 m³, 1,46 €/m³ για κατανάλωση 88-96 m³ και 1,47 €/m³ για κατανάλωση 97-100 m³. Σημειώνεται ότι η καταμέτρηση γίνεται ανά δίμηνο.

4.2. ΤΕΛΗ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΥΔΡΕΥΣΗΣ

Ως προς τα τέλη σύνδεσης με το δίκτυο ύδρευσης η τιμολογιακή πολιτική που ακολουθούν οι Δ.Ε.Υ.Α. μπορεί να καταταγεί στις εξής τέσσερις ομάδες:

Ομάδα 1^η: Ανάλογα με τη διατομή του αγωγού σύνδεσης. Στην ομάδα αυτή υπάγονται οι Δ.Ε.Υ.Α. Έδεσσας, Αλμωπίας και Σκύδρας (Πίνακας 3).

Πίνακας 3: Τέλη σύνδεσης με το δίκτυο ύδρευσης (€/υδρόμ.)

Δ.Ε.Υ.Α	Διάμετρος αγωγού σύνδεσης (ίντσες)			
	2	1½	1	¾
Έδεσσας	1545,20	871,20	389,70	245,30
Αλμωπίας	426,80	-	264,20	182,90
Σκύδρας	-	-	70,00+τέλη σύνδεσης*	50,00+τέλη σύνδεσης*
Πέλλας	-	-	-	130,00

*Τα τέλη σύνδεσης προκύπτουν από εκτίμηση της Δ.Ε.Υ.Α. Σκύδρας.

Ομάδα 2^η: Ανάλογα με το αν το υδροδοτούμενο ακίνητο βρίσκεται εντός ή εκτός σχεδίου πόλεως και με τη διατομή του αγωγού σύνδεσης. Στην ομάδα αυτή ανήκει η Δ.Ε.Υ.Α. Νάουσας, στην οποία τα τέλη σύνδεσης για την πόλη της Νάουσας είναι 1 €/m² κτίσματος, ενώ για τα εκτός σχεδίου πόλεως ακίνητα ισχύει ο Πίνακας 4.

Πίνακας 4: Τέλη σύνδεσης με το δίκτυο ύδρευσης (€/υδρόμ.) για ακίνητα εκτός σχεδίου πόλεως στη Δ.Ε.Υ.Α. Νάουσας

Διάμετρος αγωγού σύνδεσης (ίντσες)	2	1½	1	¾	½
Τέλη σύνδεσης (€/υδρόμ.)	1949,60	1019,30	567,20	407,60	354,60

Ομάδα 3^η: *Ανεξάρτητα από τη διατομή του αγωγού σύνδεσης.* Στην κατηγορία αυτή ανήκει μόνο η Δ.Ε.Υ.Α. Βέροιας με τέλη σύνδεσης 1,47 €/ μ.μ. αγωγού.

Ομάδα 4^η: *Ανάλογα με τη Δημοτική/Τοπική Κοινότητα.* Η Δ.Ε.Υ.Α. Αλεξάνδρειας εφαρμόζει μία ενιαία τιμή τελών σύνδεσης για όλες τις Τοπικές Κοινότητες (190,30 €/υδρόμ. για αγωγό σύνδεσης διατομής μίας ίντσας) και μία τιμή αποκλειστικά για την πόλη της Αλεξάνδρειας (248,70 €/υδρόμ. για αγωγό σύνδεσης διατομής μίας ίντσας).

4.3 ΛΟΙΠΕΣ ΧΡΗΣΕΙΣ

α. Αρδευση: Οι Δ.Ε.Υ.Α. Βέροιας, Αλεξάνδρειας, Νάουσας, Σκύδρας και Έδεσσας δεν έχουν διαφορετική τιμολογιακή πολιτική χρέωσης για αρδευτική χρήση νερού. Η Δ.Ε.Υ.Α. Πέλλας δε χορηγεί νερό για αρδευτική χρήση. Η Δ.Ε.Υ.Α. Αλμωπίας εφαρμόζει ανεπίσημα την ίδια τιμολογιακή πολιτική με την ύδρευση.

β. Βιομηχανία – Τουρισμός – Επαγγελματίες: Στη Δ.Ε.Υ.Α. Βέροιας η χρέωση για τις βιομηχανίες και τους επαγγελματίες ανέρχεται σε 1,20 €/ m³ για κατανάλωση 28 m³. Για μεγαλύτερες καταναλώσεις ισχύει ένα κλιμακωτό τιμολόγιο ως εξής: Για κατανάλωση 29 m³ η χρέωση είναι 1,23 €/m³ και προσαύξηση της τιμής αυτής κατά 0,02 €/m³ για κατανάλωση >29-33 m³, 1,31 €/m³ για κατανάλωση 34 m³, 1,33 €/m³ για κατανάλωση 35 m³ και μία προσαύξηση κατά 0,01 €/m³ για κατανάλωση >35-46 m³, 1,45 €/m³ για κατανάλωση 46-47 m³, 1,46 €/m³ για κατανάλωση 48 m³ και προσαύξηση κατά 0,01 €/m³ για κατανάλωση > 48-50 m³, 1,48 €/m³ για κατανάλωση 50-51 m³, 1,49 €/m³ για κατανάλωση 52 m³, 1,50 €/m³ για κατανάλωση 53-54 m³, 1,51 €/m³ για κατανάλωση 55-56 m³, 1,52 €/m³ για κατανάλωση 57-58 m³ κ.ο.κ. μέχρι κατανάλωση 67 m³, 1,57 €/m³ για κατανάλωση 67-69 m³, 1,58 €/m³ για κατανάλωση 70-72 m³ κ.ο.κ. μέχρι την κατανάλωση των 76 m³, 1,60 €/m³ για κατανάλωση 76-79 m³, 1,61 €/m³ για κατανάλωση 81-83 m³ κ.ο.κ. μέχρι και την κατανάλωση των 100 m³. Για τον τουρισμό οι Δ.Ε.Υ.Α. Βέροιας, Αλεξάνδρειας, Νάουσας, Έδεσσας, Αλμωπίας και Σκύδρας εφαρμόζουν την ίδια τιμολογιακή πολιτική με την ύδρευση. Η Δ.Ε.Υ.Α. Πέλλας δε διαφοροποιεί την τιμή του νερού, είτε προορίζεται για οικιακή χρήση, είτε για χρήση από επαγγελματίες.

γ. Χρέωση νερού για το Δημόσιο: Οι Δ.Ε.Υ.Α. Βέροιας, Αλμωπίας, Σκύδρας, Νάουσας και Πέλλας εφαρμόζουν την ίδια χρέωση με την ύδρευση. Η Δ.Ε.Υ.Α. Αλεξάνδρειας εφαρμόζει το ίδιο πάγιο των 21 m³, αλλά αλλάζει τη χρέωση για κατανάλωση >22 m³ από 0,625 € που ισχύει για την ύδρευση σε 0,208 €. Η Δ.Ε.Υ.Α. Έδεσσας διαφοροποιεί την τιμή χρέωσης του νερού ανάλογα με την ποσότητα που καταναλώνεται δηλαδή 0,29 €/m³ για κατανάλωση 0 – 34 m³, 0,34 €/m³ για κατανάλωση 34 – 80 m³ και 0,52 €/m³ για κατανάλωση > 80 m³.

4.4. ΤΙΜΗ ΧΡΕΩΣΗΣ ΚΑΙ ΟΡΘΟΛΟΓΙΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΝΕΡΟΥ

Οι πέντε από τις επτά Δ.Ε.Υ.Α. θεωρούν ότι η τιμή χρέωσης των καταναλωτών είναι φθηνή με εξαίρεση τις Δ.Ε.Υ.Α. Αλεξάνδρειας και Έδεσσας, που την χαρακτηρίζουν λογική. Ομοίως, οι πέντε από τις επτά Δ.Ε.Υ.Α. θεωρούν ότι οι τιμές αυτές συμβάλλουν στην ορθολογική κατανάλωση του νερού και στην οικονομία στη χρήση με εξαίρεση τις Δ.Ε.Υ.Α.

Σκύδρας και Αλμωπίας, που πιστεύουν η μεν πρώτη ότι η τιμολογιακή πολιτική που ασκεί ωθεί τους καταναλωτές να είναι σπάταλοι στη χρήση του νερού ύδρευσης και η δεύτερη ότι τους ωθεί να είναι αδιάφοροι.

5. ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΑΝΑΓΚΕΣ ΣΕ ΝΕΡΟ

Οι Δ.Ε.Υ.Α. Νάουσας και Πέλλας πιστεύουν ότι η ικανοποίηση των μελλοντικών τους αναγκών σε νερό θα προέλθει από την ανεύρεση και την εκμετάλλευση νέων υδατικών πόρων, οι Δ.Ε.Υ.Α. Βέροιας, Έδεσσας και Σκύδρας ότι θα επιτευχθεί με εκμετάλλευση των υφιστάμενων υδροληψιών και τέλος, οι Δ.Ε.Υ.Α. Αλεξάνδρειας και Αλμωπίας ότι οι μελλοντικές τους ανάγκες σε νερό θα καλυφθούν με το συνδυασμό των παραπάνω.

6. ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΝΕΡΟΥ

Τα κυριότερα προβλήματα νερού που αντιμετωπίζουν οι Δ.Ε.Υ.Α. αφορούν: (α) στην επάρκεια νερού κατά τους θερινούς μήνες (Έδεσσας), (β) στην ποιότητα νερού (Αλεξάνδρειας και Νάουσας), (γ) στην αδυναμία κατασκευής νέων υδραυλικών έργων (Αλμωπίας και Νάουσας). Σημειώνεται ότι οι Δ.Ε.Υ.Α. Βέροιας, Πέλλας και Σκύδρας δηλώνουν ότι δεν αντιμετωπίζουν προβλήματα.

7. ΑΥΞΗΣΗ ΤΗΣ ΤΙΜΗΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ

Από τις επτά Δ.Ε.Υ.Α. της έρευνας μόνο της Νάουσας πιστεύει ότι οποιαδήποτε αύξηση της τιμής του νερού θα προκαλούσε αντιδράσεις και δεν θα ήταν αποδεκτή από τους καταναλωτές. Οι υπόλοιπες θεωρούν ότι ποσοστά αύξησης έως 10% (Πέλλας), 10%-15% (Αλεξάνδρειας και Έδεσσας), 15%-35% (Βέροιας και Αλμωπίας) και άνω 100% (Σκύδρας) θα ήταν αποδεκτά από τους καταναλωτές. Κατά την τελευταία πενταετία, η τιμή του νερού έχει παραμείνει αμετάβλητη στις Δ.Ε.Υ.Α. Πέλλας, Έδεσσας και Σκύδρας. Οι Δ.Ε.Υ.Α. Αλεξάνδρειας και Αλμωπίας αύξησαν την τιμή του νερού έκτακτα λόγω συγχωνεύσεων και χρεών η πρώτη και λόγω χρηματοοικονομικών αναγκών η δεύτερη. Κατά τα τελευταία πέντε χρόνια, η Δ.Ε.Υ.Α. Νάουσας έχει εφαρμόσει μία αύξηση της τάξης του 20% για την κάλυψη του αυξημένου κόστους της επιχείρησης, ενώ η Δ.Ε.Υ.Α. Βέροιας αύξησε το τιμολόγιο της με ρυθμούς χαμηλότερους του πληθωρισμού.

8. ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΠΟΣΙΜΟΥ ΝΕΡΟΥ

Οι πέντε από τις επτά Δ.Ε.Υ.Α., που συμμετέχουν στην έρευνα, αναφέρουν πως έχουν λάβει χώρα, κατά το παρελθόν, γεγονότα ακαταλληλότητας του πόσιμου νερού. Ωστόσο, η συχνότητα εμφάνισης δεν είναι μεγάλη. Για παράδειγμα στις Δ.Ε.Υ.Α. Βέροιας και Αλεξάνδρειας έχουν λάβει χώρα από μία φορά μέχρι σήμερα, στη Δ.Ε.Υ.Α. Νάουσας συνήθως μία φορά ανά έτος, στη Δ.Ε.Υ.Α. Πέλλας πέντε φορές κατά την τελευταία τριετία και στη Δ.Ε.Υ.Α. Αλμωπίας 20 φορές μέχρι σήμερα. Ακόμη, στις Δ.Ε.Υ.Α. Βέροιας, Αλεξάνδρειας, Νάουσας και Πέλλας έχουν παρατηρηθεί περιστατικά μη τήρησης κάποιας παραμετρικής τιμής, που άμεσα συνοδεύτηκαν από τις απαραίτητες επανορθωτικές ενέργειες. Μόνο στις Δ.Ε.Υ.Α. Έδεσσας και Σκύδρας δεν έχουν παρατηρηθεί περιστατικά ακαταλληλότητας του πόσιμου νερού ή μη τήρησης των παραμετρικών τιμών. Ιδιαίτερα θετικό είναι το γεγονός ότι, κατά τη γνώμη των Δ.Ε.Υ.Α., το καταναλωτικό κοινό εμπιστεύεται την ποιότητα του νερού που του παρέχουν.

8.1 ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΛΕΓΧΟΥ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΝΕΡΩΝ

Μόνο οι Δ.Ε.Υ.Α. Βέροιας και Πέλλας διαθέτουν δικό τους Εργαστήριο για τη διεξαγωγή των απαραίτητων ελέγχων της ποιότητας του πόσιμου νερού. Οι υπόλοιπες Δ.Ε.Υ.Α. είναι συμβεβλημένες με εξωτερικά εργαστήρια και συνεργάτες. Η Δ.Ε.Υ.Α. Αλεξάνδρειας συνεργάζεται με το πιστοποιημένο εργαστήριο AGROLAB A.E., η Δ.Ε.Υ.Α. Νάουσας με το τοπικό πιστοποιημένο Εργαστήριο Χημικών Αναλύσεων Δ.ΕΛ.ΚΟ.Φ. Α.Ε. (Δίκτυο Ελληνικών Κονσερβοποιών Φρούτων), καθώς και με το Εργαστήριο Αναλυτικής Χημείας του Τμήματος Χημικών Μηχανικών του Α.Π.Θ. Η Δ.Ε.Υ.Α. Αλμωπίας έχει αναθέσει τον εργαστηριακό έλεγχο σε πιστοποιημένα ιδιωτικά και δημόσια εργαστήρια, όπως η AGROLAB A.E., το ABIEM (Αναλυτικά Βιολογικά Εργαστήρια Μακεδονίας), η Χημική Υπηρεσία Έδεσσας και Φλώρινας και το Ι.Γ.Μ.Ε. (Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών). Οι Δ.Ε.Υ.Α. Έδεσσας και Σκύδρας συνεργάζονται με ιδιώτη Χημικό, ο οποίος παίρνει τα δείγματα νερού και τα δίνει για επεξεργασία στο πιστοποιημένο εργαστήριο AGROLAB A.E.

Και οι επτά Δ.Ε.Υ.Α. εφαρμόζουν ως μέθοδο απολύμανσης του πόσιμου νερού τη χλωρίωση με χρήση χλωρίου σε μορφή αερίου ή υποχλωριωδών αλάτων.

Σύμφωνα με την ισχύουσα νομοθεσία στην Ελλάδα, οι εργαστηριακές αναλύσεις για την παρακολούθηση του νερού που προορίζεται για ανθρώπινη κατανάλωση, διενεργούνται από: (α) Τους υπεύθυνους (ΟΤΑ, Δ.Ε.Υ.Α. κ.λπ.) σε: (i) οργανωμένα εργαστήρια των Ο.Τ.Α, Δ.Ε.Υ.Α. και (ii) ιδιωτικά διαπιστευμένα εργαστήρια. (β) Τις λοιπές αρμόδιες αρχές σε: (i) Δημόσια Κεντρικά και Περιφερειακά Εργαστήρια ή και εξειδικευμένα Εργαστήρια άλλων φορέων (πρέπει να πληρούν τις απαιτήσεις του παραρτήματος ΙΙΙ της ΚΥΑ Υ2/2600/2001).

8.2 ΕΝΗΜΕΡΩΣΗ ΤΟΥ ΚΑΤΑΝΑΛΩΤΙΚΟΥ ΚΟΙΝΟΥ

Σύμφωνα με το άρθρο 13 § 1 της Κ.Υ.Α. Υ2/2600/2001, οι συναρμόδιες αρχές οφείλουν να παρέχουν στους καταναλωτές κατάλληλες και ενημερωμένες πληροφορίες σχετικά με την ποιότητα νερού ανθρώπινης κατανάλωσης. Όλες οι Δ.Ε.Υ.Α. υποστηρίζουν ότι ενημερώνουν τους καταναλωτές σε περιπτώσεις προβλημάτων της ποιότητας του πόσιμου νερού, καθώς και σε περιπτώσεις μη τήρησης κάποιων παραμετρικών τιμών. Η ενημέρωση γίνεται κυρίως με ανακοινώσεις από μεγάφωνα, αλλά και από το διαδίκτυο, τον τοπικό τύπο, το ραδιόφωνο και την τηλεόραση.

8.3 ΔΙΚΤΥΑ ΥΔΡΕΥΣΗΣ

Στα πλαίσια των προσπαθειών που γίνονται από τις Δ.Ε.Υ.Α. για τον εκσυγχρονισμό των δικτύων ύδρευσης και της παροχής καλύτερων υπηρεσιών στους ιδιώτες έχουν γίνει διάφορα έργα κατά την τελευταία δεκαετία που αφορούν κυρίως σε: (α) επεκτάσεις των δικτύων ύδρευσης (Έδεσσας, Αλμωπίας, Σκύδρας), (β) αντικαταστάσεις αγωγών (Βέροιας, Πέλλας, Αλμωπίας, Έδεσσας και Σκύδρας), (γ) κατασκευές διυλιστηρίου, δεξαμενών (Πέλλας) και εκκενωτών (Αλεξάνδρειας), (δ) ενεργοποίηση του νέου δικτύου (Νάουσας), (ε) τηλεέλεγχο και τηλεχειρισμό των δικτύων (Αλεξάνδρειας).

Η προστασία των πηγών ύδρευσης αποτελεί μείζον ζήτημα, καθώς τα αίτια που προκαλούν τη μόλυνση τους μπορούν να είναι τα έντονα καιρικά φαινόμενα, η ύπαρξη ποιμνιοστασιών στην ευρύτερη περιοχή των πηγών, τα κόπρανα των ζώων, τα φυτοφάρμακα, τα λιπάσματα, οι συστηματικές καλλιέργειες, τα αστικά λύματα κ.λπ. Για το λόγο αυτό καθεμία Δ.Ε.Υ.Α. (με εξαίρεση της Σκύδρας που δεν αναφέρει κάτι σχετικό) προβαίνει στην κατασκευή έργων προστασίας των πηγών, όπως (α) διαμόρφωση και βελτίωση τους, (β) περίφραξή τους, (γ) συντήρηση και επισκευή τους, (δ) απομόνωση των επιφανειακών

υδάτων, (ε) προστασία των υδρομαστεύσεων και στ) καθαρισμό των υφιστάμενων φρεατίων ή κατασκευή νέων.

Όλες οι Δ.Ε.Υ.Α. προβαίνουν στη συντήρηση των δικτύων ύδρευσης και στην αντικατάσταση των προβληματικών τμημάτων τους. Σε καμία Δ.Ε.Υ.Α. δεν έχει παρατηρηθεί η παρουσία αιωρούμενων υλικών στο πόσιμο νερό στα δίκτυα ύδρευσης.

Ιδιαίτερα ενθαρρυντικό είναι το γεγονός ότι καμία Δ.Ε.Υ.Α. δεν αντιμετωπίζει προβλήματα ανεπάρκειας υδατικών πόρων. Η Δ.Ε.Υ.Α. Βέροιας επισημαίνει ότι υπάρχουν ελάχιστες περιπτώσεις στις οποίες συμβαίνει αυτό (Τοπική Ενότητα Κουμαριάς), ενώ η Δ.Ε.Υ.Α. Πέλλας το πιθανολογεί σαν μελλοντικό ενδεχόμενο για τους θερινούς μήνες.

Οι περισσότερες Δ.Ε.Υ.Α. χαρακτήρισαν μέτρια την κατάσταση των δικτύων ύδρευσης τους (Αλεξάνδρειας, Νάουσας, Έδεσσας και Αλμωπίας), ενώ οι υπόλοιπες θεωρούν ότι τα δίκτυα τους βρίσκονται σε καλή κατάσταση (Βέροιας, Πέλλας και Σκύδρας).

8.4. ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ

Στον Πίνακα Β1 του Παραρτήματος ΙΙ της Κ.Υ.Α Υ2/2600/2001 ρυθμίζεται ο ελάχιστος αριθμός των δειγμάτων που πρέπει να λαμβάνονται ετησίως, τόσο για τη δοκιμαστική, όσο και για την ελεγκτική παρακολούθηση σε μια ζώνη παροχής, όπου ως ζώνη παροχής (Κ.Υ.Α Υ2/2600/2001) θεωρείται «μια γεωγραφικά καθορισμένη περιοχή εντός της οποίας το νερό ανθρώπινης κατανάλωσης εισέρχεται από μία ή περισσότερες πηγές και εντός της οποίας η ποιότητα του νερού μπορεί να θεωρηθεί ως περίπου ομοιόμορφη». Δηλαδή σύμφωνα με την ανωτέρω Κ.Υ.Α., ως σημείο αναφοράς για την παρακολούθηση της ποιότητας πόσιμου νερού λαμβάνεται ο υδροδοτούμενος πληθυσμός ανά μονάδα υδροδότησης (π.χ. δεξαμενή), στην οποία η ποιότητα του νερού είναι ομοιόμορφη και όχι αναγκαστικά ο πληθυσμός μιας Δημοτικής Ενότητας, η οποία πιθανώς να υδροδοτείται από περισσότερες της μιας παροχών, με ανομοιόμορφη ποιότητα πόσιμου νερού.

Σημειώνεται ότι σύμφωνα με το ερωτηματολόγιο η Δ.Ε.Υ.Α. Βέροιας έχει ορίσει μία (1) ζώνη παροχής, η Δ.Ε.Υ.Α. Αλεξάνδρειας καμία, η Δ.Ε.Υ.Α. Νάουσας δέκα οκτώ (18), η Δ.Ε.Υ.Α. Πέλλας τριάντα δύο (32), η Δ.Ε.Υ.Α. Έδεσσας μία (1) ανά Δημοτική ή Τοπική Κοινότητα, η Δ.Ε.Υ.Α. Αλμωπίας πενήντα (50) και η Δ.Ε.Υ.Α. Σκύδρας δέκα εννέα (19). Στον Πίνακα 5 σημειώνονται τα σημεία δειγματοληψίας για καθεμία Δ.Ε.Υ.Α., όπως αναγράφονται στο ερωτηματολόγιο.

Πίνακας 5: Αριθμός δειγμάτων και σημεία δειγματοληψίας

Δ.Ε.Υ.Α.	Αριθμός δειγμάτων και σημεία δειγματοληψίας
Βέροιας	1 σημείο / εβδομάδα διαφορετικό κάθε φορά
Αλεξάνδρειας	7 σημεία στην πόλη της Βέροιας, 2 σημεία από κάθε τοπική ενότητα (συνολικά 21 δείγματα / μήνα)
Νάουσας	1 ελεγκτική ανάλυση / πηγή & εντός της ζώνης του εκάστοτε δικτύου δοκιμαστικές αναλύσεις σύμφωνα με τη νομοθεσία
Πέλλας	90 – 100 σημεία
Έδεσσας	5 στην πόλη της Έδεσσας, 1 – 3 στις τοπικές ενότητες
Αλμωπίας	Όσα δείγματα επιβάλλει η Κ.Υ.Α. Υ2/2600/2001 σε παροχές δημοτών, σχολεία κ.λπ.
Σκύδρας	Δεξαμενή και σχολεία

Όλες οι Δ.Ε.Υ.Α. που συμμετείχαν στην έρευνα πιστεύουν ότι τα δείγματα που λαμβάνουν είναι αντιπροσωπευτικά της υφιστάμενης κατάστασης και σύμφωνα με την ισχύουσα νομοθεσία. Σημειώνεται ότι σύμφωνα με την ισχύουσα νομοθεσία στην Ελλάδα, ένα ποσοστό των δειγμάτων πρέπει να λαμβάνεται από σταθερό σημεία (αντλιοστάσια, δεξαμενές αποθήκευσης), καθώς και από θέσεις που κατά το παρελθόν υπήρξαν προβλήματα. Άλλα δείγματα καθορίζεται ότι πρέπει να λαμβάνονται τυχαία στο δίκτυο, όπου κατά προτεραιότητα θα συμπεριλαμβάνονται πολυσύχναστα κτίρια, όπως νοσοκομεία, σχολεία, δημόσια κτίρια, πολυκατοικίες, ξενοδοχεία, εργοστάσια και άλλες θέσεις που υπάρχει μεγάλη πιθανότητα κινδύνου μόλυνσης λ.χ. διακλαδώσεις, σημεία υποπίεσης. Οι θέσεις δειγματοληψίας πρέπει να περιλαμβάνονται σε προγράμματα που υποβάλλονται στην Δ/ση Υγείας της Ν.Α. προς έγκριση, μαζί με την κατάλληλη απεικόνιση σε σχέδια των σημείων δειγματοληψίας και κοινοποιούνται στις Περιφέρειες. Με την Εγκύκλιο ΔΥΓ2/οικ111540/10-9-2010 του Υπουργείου Πρόνοιας και Κοιν. Αλληλεγγύης επισημαίνεται με έμφαση ότι «οι δειγματοληψίες για την παρακολούθηση της ποιότητας του πόσιμου νερού θα γίνονται από τους υπευθύνους ύδρευσης υποχρεωτικά και στη βρύση των καταναλωτών, η οποία χρησιμοποιείται κυρίως για την παροχή πόσιμου νερού».

9. ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ «ΚΑΛΛΙΚΡΑΤΗΣ» (ν. 3852/2010)

Η ψήφιση του νόμου 3852/2010 (πρόγραμμα «Καλλικράτης») σηματοδότησε μία νέα περίοδο για τους πρωτοβάθμιους Ο.Τ.Α. της χώρας, καθώς και για τους φορείς που έχουν ιδρύσει για την εξυπηρέτηση των δημοτών τους, όπως είναι οι Δ.Ε.Υ.Α. Η δυνατότητα που έχουν οι Δήμοι να έχουν τη δική τους Δ.Ε.Υ.Α. αποτελεί αναγνώριση του έργου των Δ.Ε.Υ.Α. μετά από 32 και πλέον χρόνια λειτουργίας τους.

Οι Δ.Ε.Υ.Α. Βέροιας, Αλεξάνδρειας, Νάουσας, Πέλλας και Αλμωπίας έχουν προχωρήσει στις απαραίτητες ενέργειες για να προσαρμοστούν στις συνθήκες που επιβάλλει το πρόγραμμα «Καλλικράτης», με εξαίρεση τη Δ.Ε.Υ.Α. Έδεσσας που δεν έχει διευρυνθεί διοικητικά στα όρια του νέου Δήμου και τη Δ.Ε.Υ.Α. Σκύδρας που αδυνατεί λόγω έλλειψης προσωπικού (Πίνακας 6).

Πίνακας 6: Ενέργειες για την προσαρμογή των Δ.Ε.Υ.Α. στο ν. 3852/2010

Δ.Ε.Υ.Α.	Ενέργειες
Βέροιας	Εκπονούνται μελέτες, ωριμάζουν έργα για υποβολή προς χρηματοδότηση από το Ε.Σ.Π.Α. (ήδη δημοπρατούνται 4 έργα).
Αλεξάνδρειας	Συγχωνεύσεις υφιστάμενων Δ.Ε.Υ.Α. σε επίπεδο Δήμου. Καταγραφή δικτύων, γεωτρήσεων, υδατοδεξαμενών, παγίων.
Νάουσας	Έλεγχος υφιστάμενων εγκαταστάσεων, αναβάθμιση κτιριακών & ηλεκτρομηχανολογικών εγκαταστάσεων, παροχή τεχνογνωσίας για τη βελτίωση των συνθηκών & του ελέγχου στις τοπικές ενότητες.
Πέλλας	Συντήρηση δικτύου ύδρευσης & αποχέτευσης, προστασία γεωτρήσεων, αντικατάσταση χλωριωτών για την καλύτερη ποιότητα του νερού
Αλμωπίας	Έχουν γίνει οι επιβαλλόμενες από τη νομοθεσία ενέργειες
Σκύδρας	-

Οι Δ.Ε.Υ.Α. που συμμετέχουν στην έρευνα, με εξαίρεση της Σκύδρας, είναι υπέρ του προγράμματος «Καλλικράτης», γιατί πιστεύουν ότι το πρόγραμμα αυτό θα οδηγήσει σε

αναβάθμιση των παρεχόμενων υπηρεσιών στους δημότες, στην καλύτερη τους οργάνωση, στελέχωση, εξοπλισμό, τεχνογνωσία κ.λπ. Όμως, οι Δ.Ε.Υ.Α. Έδεσσας, Αλμωπίας και Σκύδρας αμφισβητούν ότι το πρόγραμμα «Καλλικράτης» θα συμβάλλει στην παροχή νέων υπηρεσιών και προϊόντων από τις Δ.Ε.Υ.Α. Παρά το γεγονός ότι όλες οι Δ.Ε.Υ.Α. είναι θετικές απέναντι στην εφαρμογή του προγράμματος «Καλλικράτης» μόνο οι δύο από αυτές (Αλμωπίας και Αλεξάνδρειας) πιστεύουν ότι θα ενδυναμώσουν σαν επιχειρήσεις ως προς το μέγεθος και την οικονομική ισχύ. Η Δ.Ε.Υ.Α. Αλεξάνδρειας υποστηρίζει ότι το μεγαλύτερο καταναλωτικό κοινό που θα δημιουργηθεί μετά την εφαρμογή του νόμου 3852/2010 θα αποφέρει περισσότερα έσοδα και έτσι οι Δ.Ε.Υ.Α. δε θα είναι χρεωμένες, ενώ παράλληλα θα καλύπτουν τα έξοδά τους από τα έσοδά τους. Ωστόσο, υπάρχει και η αντίθετη άποψη που εκφράζεται από τη Δ.Ε.Υ.Α. Έδεσσας ότι τα νέα δίκτυα που θα προστεθούν στη δικαιοδοσία τους θα αυξήσουν τις υποχρεώσεις τους χωρίς ταυτόχρονη αύξηση των εσόδων τους.

10. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Σύμφωνα με την ισχύουσα ευρωπαϊκή (Οδηγία 2000/60/ΕΚ) και ελληνική νομοθεσία (ν. 3199/2003, π.δ/γμα 51/2007) η χρήση νερού για ύδρευση έχει προτεραιότητα ως προς την ποιότητα και την ποσότητα έναντι κάθε άλλης ανταγωνιστικής χρήσης νερού (βιομηχανική, ενεργειακή κ.λπ.). Οι υπεύθυνοι ύδρευσης για τους Δήμους που είναι η αρμόδια Δημοτική Αρχή ή η Δ.Ε.Υ.Α. ή οι Σύνδεσμοι Ύδρευσης κ.λπ. είναι υποχρεωμένοι να εξασφαλίζουν στους καταναλωτές, σε μόνιμη βάση, την παροχή πόσιμου νερού επαρκούς ποσότητας και καλής ποιότητας. Η ισχύουσα νομοθεσία (Οδηγία 2000/60/ΕΚ, ν. 3199/2003) θεωρεί ότι: (α) το νερό δεν είναι εμπορικό αγαθό, αλλά αποτελεί και κοινωνικό αγαθό, που πρέπει να προστατεύεται, (β) η ύδρευση είναι υπηρεσία κοινής ωφέλειας και (γ) το κόστος των παρεχόμενων υπηρεσιών ύδατος θα πρέπει να ανακτάται σε συνδυασμό με την αρχή «ο ρυπαίνων πληρώνει» (Γιαννόπουλος και Τζιμόπουλος, 2003).

Δύο από τις Δ.Ε.Υ.Α. που συμμετείχαν στην έρευνα καλύπτουν τις υδρευτικές τους ανάγκες μόνο από πηγές (Βέροιας και Έδεσσας), δύο από πηγές και γεωτρήσεις (Πέλλας και Αλμωπίας), μία μόνο από γεωτρήσεις (Σκύδρας), μία από πηγές και ποτάμι (Νάουσας) και μία από ποτάμι και γεωτρήσεις (Αλέξανδρεια). Τα δίκτυα ύδρευσης των διαφόρων Δημοτικών και Τοπικών Κοινοτήτων είναι ανεξάρτητα αλλήλων. Αυτό οφείλεται στην υδατική πολιτική που ακολούθησαν επί σειρά ετών οι πρώην Δήμοι και Κοινότητες από τους οποίους προήλθαν με συνενώσεις οι άλλοτε Καποδιστριακοί Δήμοι (ν. 2539/1977) σε συνεργασία με τις άλλοτε Νομαρχίες και τις αρμόδιες Τεχνικές Υπηρεσίες Δήμων και Κοινοτήτων (Τ.Υ.Δ.Κ.) των δύο νομών. Στα πλαίσια του Προγράμματος «Καλλικράτης» (ν. 3852/2010) σωστό θα ήταν να εξετάσουν οι Δ.Υ.Ε.Α. με οικονομοτεχνικά κριτήρια και τη δυνατότητα διασύνδεσης των δικτύων όμορων Κοινοτήτων (Δημοτικών/Τοπικών).

Σε σχέση με τα προβλήματα που αντιμετωπίζουν οι Δ.Ε.Υ.Α. διαπιστώθηκε ότι μια από αυτές (Έδεσσας) αντιμετωπίζει πρόβλημα κατά τους θερινούς μήνες, δύο (Αλεξάνδρειας και Νάουσας) πρόβλημα ποιότητας νερού, δύο (Αλμωπίας και Νάουσας) αδυναμία κατασκευής νέων υδραυλικών έργων, ενώ τρεις από αυτές (Βέροιας, Πέλλας και Νάουσας) δεν αντιμετωπίζουν προβλήματα.

Όσον αφορά στη χρέωση του νερού οικιακής χρήσης διαπιστώθηκε ότι οι Δ.Ε.Υ.Α. Αλμωπίας και Σκύδρας εφαρμόζουν ένα υπεραπλουστευμένο σύστημα σταθερής τιμής χρέωσης όπου υπάρχουν υδρόμετρα και όπου δεν υπάρχουν μια σταθερή χρέωση ανά άτομο σε ετήσια βάση. Η Δ.Ε.Υ.Α. Πέλλας χρησιμοποιεί ένα κλιμακωτό τιμολόγιο αρκετά περίπλοκο αφού περιλαμβάνει έντεκα κλίμακες με προσαυξήσεις και μικρά εύρη κατανάλωσης. Το ίδιο περίπλοκο είναι και το κλιμακωτό τιμολόγιο της Δ.Ε.Υ.Α. Βέροιας στη Δημοτική Ενότητα της Βέροιας, αφού περιλαμβάνει μεγάλο αριθμό κλιμάκων με προσαυξήσεις και μικρά εύρη κατανάλωσης, ενώ στις υπόλοιπες Δημοτικές Ενότητες η

χρέωση γίνεται σε ετήσια βάση ανά διαμέρισμα ανεξάρτητα από την κατανάλωση. Οι Δ.Ε.Υ.Α. Αλεξάνδρειας και Νάουσας εφαρμόζουν κλιμακωτά τιμολόγια που είναι πολύ πιο απλά από αυτά της Πέλλας και της Βέροιας. Από τα ανωτέρω συνάγεται ότι η υδατική πολιτική που ακολουθείται στρέφεται περισσότερο προς την πλευρά της διαχείρισης της προσφοράς και όχι της ζήτησης. Είναι, λοιπόν, απαραίτητο να φροντίσουν οι Δ.Ε.Υ.Α. να προγραμματίσουν χρονικά και οικονομικά μελέτες για την ανάκτηση του πλήρους κόστους των παρεχομένων υπηρεσιών ύδατος σε συνδυασμό με την τοποθέτηση υδρομέτρων και τη χρέωση της κατανάλωσης του νερού με ένα κλιμακωτό τιμολόγιο ανάλογα με την κατανάλωση. Σημειώνεται ότι το σημαντικότερο εργαλείο για την εφαρμογή της διαχείρισης της ζήτησης του νερού της πολιτικής και όχι της προσφοράς είναι η τιμολόγηση του νερού.

Σήμερα, οι Δ.Ε.Υ.Α. βρίσκονται σε μία περίοδο προσαρμογής λόγω της ψήφισης του ν. 3852/2010 (πρόγραμμα Καλλικράτης). Μετά την εφαρμογή του νόμου αυτού αναμένεται ότι θα δημιουργηθούν μεγάλες και ισχυρές επιχειρήσεις, που θα είναι ικανές να δραματίσουν πρωτεύοντα ρόλο στις τοπικές κοινωνίες και να προσφέρουν πιά εξειδικευμένες υπηρεσίες, αλλά και νέα προϊόντα στους δημότες. Επίσης, με τη δημιουργία μεγαλύτερων σε μέγεθος Δ.Ε.Υ.Α. αναμένεται ότι θα ξεπεραστεί το πρόβλημα της υπολειτουργίας και της βιωσιμότητας που αντιμετώπιζαν κατά το παρελθόν οι μικρές από αυτές και θα οδηγήσει στη δημιουργία Δ.Ε.Υ.Α. με βιώσιμα μεγέθη και προοπτικές περαιτέρω ανάπτυξης. Όμως, για να επιτευχθούν οι στόχοι αυτοί χρειάζεται πολύ δουλειά, πιστώσεις και στενή συνεργασία ανάμεσα στην κεντρική εξουσία, στις Δ.Ε.Υ.Α. και τους αυτοδιοικητικούς παράγοντες.

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 8.4 της παρούσας εργασίας η δειγματοληψία για την παρακολούθηση της ποιότητας του πόσιμου νερού γίνεται με βάση τη «ζώνη παροχής». Από τα στοιχεία της έρευνας προέκυψε ότι η Δ.Ε.Υ.Α. Βέροιας έχει ορίσει μόνο μία ζώνη για 29 συνολικά Δημοτικές και Κοινοτικές Ενότητες, η Δ.Ε.Υ.Α. Αλεξάνδρειας καμία για 25 συνολικά Δημοτικές και Κοινοτικές Ενότητες, ενώ η Δ.Ε.Υ.Α. Έδεσσας μία για κάθε Δημοτική και Κοινοτική Ενότητα. Οι υπόλοιπες Δ.Ε.Υ.Α. (Νάουσας, Πέλλας, Σκύδρας και Αλμωπίας) έχουν ορίσει περισσότερες ζώνες παροχής από το σύνολο των Δημοτικών και Τοπικών Κοινοτήτων που έχουν στην ευθύνη τους. Δεδομένου ότι ο καθορισμός της ζώνης παροχής είναι κρίσιμο θέμα για το πρόγραμμα δειγματοληψίας και συνακόλουθα για την παρακολούθηση και τον έλεγχο της ποιότητας του πόσιμου νερού θα πρέπει οι συγκεκριμένες Δ.Ε.Υ.Α. να προβούν στις απαραίτητες ενέργειες για τη λύση του προβλήματος.

Το αντικείμενο και οι αρμοδιότητες των Δ.Ε.Υ.Α. δεν τους επιτρέπουν την επαναπαύση. Προκειμένου, λοιπόν, να εξελιχθούν θα πρέπει να εφαρμόσουν μία ολοκληρωμένη υδρευτική πολιτική, η οποία θα δίνει έμφαση στη διαχείριση της ζήτησης του νερού και στη διαφύλαξη της ποιότητάς του λαμβάνοντας μέτρα, που θα αφορούν: (α) Στην εφαρμογή νέων τεχνολογιών και μεθόδων ελέγχου και λειτουργίας των δικτύων ύδρευσης (τηλεέλεγχος-τηλεχειρισμός, μοντέλα προσομοίωσης της υδραυλικής λειτουργίας των δικτύων ύδρευσης αλλά και της ποιότητας του πόσιμου νερού κ.λπ.), (β) στην ενημέρωση και «εκπαίδευση» των δημοτών, ώστε να συμμετέχουν σε προγράμματα εξοικονόμησης νερού και να αντιλαμβάνονται τη σημασία της ορθολογικής του χρήσης, (γ) στη συντήρηση, βελτίωση και επισκευή των υφιστάμενων δικτύων, ώστε να περιορίζονται οι απώλειες νερού, (δ) στην αναβάθμιση των υπηρεσιών που παρέχονται στον καταναλωτή κ.λπ.

Σημειώνεται ότι σε όλες τις χρεώσεις που αναφέρονται στην παρούσα εργασία δεν έχει ληφθεί υπόψη ο Φ.Π.Α. για ευνόητους λόγους.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς επιθυμούν να ευχαριστήσουν τους αρμόδιους των Δ.Ε.Υ.Α. που συμμετείχαν στην έρευνα για θέματα ύδρευσης για την ευγενική ανταπόκριση και την αгаσθή

συνεργασία τους, ελπίζουν δε και εύχονται ότι τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας θα βοηθήσουν τους αρμοδίους φορείς στον καλύτερο σχεδιασμό της υδατικής τους πολιτικής.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Ανέστης, Θ., Πεταλάς, Χ. και Τσιχριντζής, Β., 2005. *Προσέγγιση των χαρακτηριστικών της κατανάλωσης νερού στο Δήμο Ξάνθης*. Πρακτικά 5^{ου} Εθνικού Συνεδρίου Ε.Ε.Δ.Υ.Π., Ξάνθη, 389-398.
- Απόφαση ΥΠ.ΕΣ. αριθμ. 45892/2010 (Φ.Ε.Κ. 1292/τ.Β/11-8-2010). *Πρωτοβάθμιοι και Δευτεροβάθμιοι Οργανισμοί Τοπικής Αυτοδιοίκησης της Χώρας με το Ν. 3852/2010 και αναλογική κατανομή πληθυσμού στις δημοτικές κοινότητες του άρθρου 2, παρ. 4 του Ν. 3852/2010, ο οποίος δεν είναι δυνατόν να κατανεμηθεί, λόγω ελλείπων στοιχείων τόπου εγκατάστασης*.
- Γιαννόπουλος, Σ. και Τζιμόπουλος, Χ., 2003. *Η πλήρης ανάκτηση κόστους για τις υπηρεσίες ύδατος στην Οδηγία 2000/60 για τα νερά*. Πρακτικά 3^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου Γεωργικής Μηχανικής, Θεσσαλονίκη.
- Γιαννόπουλος, Σ., Μπούρη, Σ., Τζιβάνη, Ε. και Γιαννοπούλου, Ιω., 2006. *Διερεύνηση των Συνθηκών Ύδρευσης στο Νομό Καρδίτσας*. Πρακτικά 10^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου Ε.Υ.Ε., Ξάνθη, 209-216.
- Γιαννόπουλος, Στ., Σπανοθύμιου, Μ., Κόνιαλη, Ιω. και Γιαννοπούλου, Ιω., 2009. *Διερεύνηση της υδατικής πολιτικής των ΔΕΥΑ του Νομού Θεσσαλονίκης*. Πρακτικά Κοινού Συνεδρίου των Ε.Υ.Ε. και Ε.Ε.Δ.Υ.Π., Βόλος: 1049-1057.
- Γκράτζιου, Μ., 2006. *Ζήτηση νερού σε Δημοτικές Επιχειρήσεις Ύδρευσης της Θράκης και Επιδρώντες Παράγοντες*. Πρακτικά 10^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου Ε.Υ.Ε., Ξάνθη, 225-232.
- Ε.Ε.Σ. (Ευρωπαϊκό Ελεγκτικό Συνέδριο), 2010. *Ειδική Έκθεση 9/2010: Πραγματοποιείται βέλτιστη χρήση των πόρων της Ε.Ε. όσον αφορά τις δαπάνες στο πλαίσιο των διαρθρωτικών μέτρων σχετικά με την υδροδότηση για οικιακή κατανάλωση; Υπηρεσία Εκδόσεων Ε.Ε., Λουξεμβούργο, 68 σελ.*
- Κολοκυθά, Ε., Μυλόπουλος Γ., Αμανατίδου, Ε., Αδαμίδου, Κ., Τσικριτζής, Λ. και Ταουσανίδης, Ν., 2005. *Κοινωνικές και Οικονομικές Διαστάσεις στη Διαχείριση του Αστικού Νερού. Εξοικονόμηση νερού στην πόλη της Κοζάνης*. Πρακτικά 5^{ου} Εθνικού Συνεδρίου Ε.Ε.Δ.Υ.Π., Ξάνθη, 375-380.
- Νόμος 1069/1980. *Περί κινήτρων για την ίδρυση επιχειρήσεων υδρεύσεως και αποχετεύσεως* (Φ.Ε.Κ. 191/τεύχος Α/1980).
- Νόμος 3852/2010. *Νέα αρχιτεκτονική της Αυτοδιοίκησης και της Αποκεντρωμένης Διοίκησης – Πρόγραμμα Καλλικράτης* (ΦΕΚ 87/τ.Α/7-6-2010).
- Φαφούτης, Χ., Μυλόπουλος, Ν. και Λιακόπουλος, Α., 2003. *Παράμετροι διαχείρισης της ζήτησης στον τομέα της ύδρευσης στη Θεσσαλία*. Πρακτικά 9^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου Ε.Υ.Ε., Θεσσαλονίκη, 277-284.
- Kolokytha, E., Mylopoulos, Y. and Mentis, A., 2002. *Evaluating demand management aspects of urban water policy. A field survey in the city of Thessaloniki. Greece*. Urban Water, 4(4): 391-400.
- Mylopoulos, N. and Mentis, A., 2005. *A sustainable framework for water resources management in an urban watershed: The case of Volos, Greece*. Urban Water Journal, 2(1): 13-22.
- Vagiona, D, Mylopoulos, N. and Fafoutis, C., 2005. *Water demand management aspects in the residential sector. The city of Volos case, Greece*. Proceedings 6th International Conference of European Water Resources Association, Menton, CD.

**ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΡΟΘΥΜΙΑΣ ΠΛΗΡΩΜΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΩΝ
ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ ΝΕΡΟΥ ΣΤΗΝ ΠΟΛΗ ΤΟΥ ΒΟΛΟΥ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ
ΤΗΣ ΕΞΑΡΤΗΜΕΝΗΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ**

Χρυσόστομος Φαφούτης*, Νικήτας Μυλόπουλος

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών,
Πεδίον Άρεως, 38334, Βόλος

*Στοιχεία επικοινωνίας: fafoutis@uth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο αυτής της εργασίας είναι να διερευνηθεί το πώς η Προθυμία Πληρωμής (Π.Π.) επηρεάζεται από το εισόδημα των καταναλωτών και τη μορφή της σχετικής συνάρτησης χρησιμότητας. Τα δεδομένα του εισοδήματος καταγράφηκαν με τη βοήθεια ερωτηματολογίου σε δείγμα καταναλωτών νερού στην πόλη του Βόλου, με το εισόδημα του ερωτώμενου χωρισμένο σε κατηγορίες. Η Π.Π. προσδιορίζεται από εννέα μοντέλα ανάλογα με την μορφή της μεταβλητής του εισοδήματος και τη μορφή της συνάρτησης χρησιμότητας. Για τα μοντέλα με την ίδια συνάρτηση χρησιμότητας το εισόδημα δεν έχει σημαντική επίδραση στις εκτιμώμενες τιμές της Π.Π., ενώ τα γραμμικά μοντέλα εκτιμούν καλύτερα την Π.Π. σε σχέση με τα λογαριθμικά. Επίσης, προέκυψαν χρήσιμα συμπεράσματα από την εκτίμηση της Π.Π. ανά τομέα, ηλικία και επίπεδο μόρφωσης των καταναλωτών.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Προθυμία πληρωμής, Μέθοδος Εξαρτημένης Αξιολόγησης, βελτίωση υπηρεσιών νερού, Βόλος.

**ASSESSMENT OF WILLINGNESS-TO-PAY FOR THE
IMPROVEMENT OF WATER SERVICES IN THE CITY OF VOLOS
USING THE CONTINGENT VALUATION METHOD**

Chrysostomos Fafoutis*, Nikitas Mylopoulos

University of Thessaly, Department of Civil Engineering,
Pedion Areos, 38334, Volos

*Corresponding author: fafoutis@uth.gr

ABSTRACT

The objective of this paper is to study how Willingness to Pay (WTP) values are affected by the treatment of income variable with different forms and by the use of different functional forms. Data are collected using a face-to-face questionnaire in a sample of residential consumers in the city of Volos, Greece. WTP values are derived from three different functional models and three different expressions of income variable. The respondent's income is collected in terms of bracketed form to increase response rates. For the models with same functional form, the income variable does not have a significant effect on predicted WTP values, while the linear functional forms seem to estimate better the WTP values than the logarithmic ones. Finally, the useful conclusions resulted from the estimation of WTP per sector, age and education level of the consumers.

KEY WORDS: Willingness-to-pay, Contingent Valuation Method, water services, Volos.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Αποτέλεσμα του προβληματισμού για τα ζητήματα του νερού στην Ευρωπαϊκή Ένωση αποτελεί η Ευρωπαϊκή Οδηγία - Πλαίσιο 2000/60 (Directive 2000/60/EC, 2000), που ανάμεσα σε όλα τα άλλα τονίζει την επιτακτική ανάγκη για εκπόνηση οικονομικής ανάλυσης στα έργα υδατικών πόρων, λαμβάνοντας υπόψη την αρχή της ανάκτησης του κόστους των υπηρεσιών ύδρευσης και την αρχή «ο ρυπαίνων πληρώνει».

Ο τελικός στόχος της οικονομικής ανάλυσης είναι να καταλήξει σε ρεαλιστικές προβλέψεις προσφοράς και ζήτησης των υπηρεσιών ύδρευσης και να πραγματοποιηθεί τιμολογιακή πολιτική με σκοπό την κάλυψη του κόστους λειτουργίας του συστήματος, την κάλυψη των ιδίων κεφαλαίων κατασκευής νέων έργων, καθώς και την κάλυψη του κόστους για το περιβάλλον.

Στο Glossary of Terms της οδηγίας της WATECO (Working Group 2.6 – WATECO, 2003), το περιβαλλοντικό κόστος ορίζεται ως το κόστος από τις ζημιές που προκαλούν οι χρήσεις ύδατος στο περιβάλλον και τα υδατικά οικοσυστήματα, καθώς και εκείνοι που χρησιμοποιούν το περιβάλλον (π.χ. υποβάθμιση της ποιότητας των υδατικών οικοσυστημάτων ή της υφαιλμύρισης και της υποβάθμισης των παραγωγικών εδαφών).

Σύμφωνα με το Drafting Group ECO1 (Drafting Group ECO1, 2004), το περιβαλλοντικό κόστος αποτελείται από το κόστος της υποβάθμισης και εξάντλησης των αποθεμάτων των υδατικών οικοσυστημάτων, που προκαλούνται από μια συγκεκριμένη χρήση ύδατος.

Στην οικονομική θεωρία, διάφορα μοντέλα και τεχνικές έχουν αναπτυχθεί για να υπολογίσουν την αξία που προσδίδουν οι άνθρωποι στους φυσικούς πόρους, στα αγαθά και στις υπηρεσίες που αυτοί οι πόροι παρέχουν. Οι περιβαλλοντικές αξίες υπολογίζονται με οικονομικούς όρους, προκειμένου αυτές να καταστούν συγκρίσιμες με άλλες αγοραστικές αξίες. Η Προθυμία Πληρωμής των καταναλωτών αντικατοπτρίζει το Περιβαλλοντικό Κόστος του νερού, δηλαδή το κόστος από τις ζημιές που προκαλούνται από τη χρήση νερού στο περιβάλλον και τα υδατικά οικοσυστήματα, όπως αυτό ορίζεται στην Οδηγία – Πλαίσιο 2000/60 της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Υπάρχουν δύο κύριες προσεγγίσεις στην εκτίμηση του περιβαλλοντικού κόστους, μια «βασισμένη στο κόστος» και μια «βασισμένη στο όφελος»: α) η «βασισμένη στο κόστος» προσέγγιση, βασίζεται στον υπολογισμό του κόστους των μέτρων, τα οποία στοχεύουν να προστατεύσουν το υδατικό περιβάλλον από την περιβαλλοντική ζημία, και β) η «βασισμένη στο όφελος» προσέγγιση, βασίζεται στην εκτίμηση της απώλειας ευημερίας λόγω της περιβαλλοντικής ζημίας ή στην αύξηση της ευημερίας εάν η περιβαλλοντική ζημία αποφεύγεται μέσω της Προθυμίας Πληρωμής (Willingness To Pay - WTP) και της Προθυμίας Αποδοχής Αποζημίωσης (Willingness To Accept Compensation - WTAC).

Η Προθυμία Πληρωμής, η οποία χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, είναι η ευρύτερα διαδεδομένη καθώς έχει εφαρμοστεί σε πλήθος μελετών (Arrow et al., 1993, Al-Ghuraiz and Enhassi, 2004, Routa et al., 2004, Adamowicz et al., 1993, Calkins et al., 2002, Coursey, 1987, Cho, 1996, Jaysasundara et al., 1999). Για την εκτίμηση της χρησιμοποιήθηκε η Μέθοδος Εξαρτημένης Αξιολόγησης (Contingent Valuation Method – CVM), η οποία βασίζεται στην εκτίμηση της πρόθεσης των καταναλωτών να πληρώσουν για τη διατήρηση ενός συγκεκριμένου περιβαλλοντικού αγαθού (του νερού στην περίπτωση μας) με βάση ερωτηματολόγια για υποθετικές ή πειραματικές αγορές.

1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

1.1 Η ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Η έρευνα πραγματοποιήθηκε στην ευρύτερη περιοχή του Βόλου. Ο Βόλος είναι η πρωτεύουσα του Νομού Μαγνησίας με εξυπηρετούμενο πληθυσμό 120,000 κατοίκων. Η

Δημοτική Επιχείρηση Ύδρευσης Αποχέτευσης Μείζονος Βόλου (ΔΕΥΑΜΒ), με περιοχή ευθύνης τους Δήμους Βόλου, Νέας Ιωνίας και Αισωνίας, υδροδοτεί το πολεοδομικό συγκρότημα του Βόλου, παρουσιάζοντας ειδική κατανάλωση 350 λίτρα ανά υδρόμετρο ανά ημέρα.

Η ετήσια συνολική παραγωγή νερού αυξάνεται από έτος σε έτος, για να καλύψει τις διαρκώς αυξανόμενες ανάγκες κατανάλωσης (αύξηση αριθμού καταναλωτών κτλ). Η απόδοση των πηγών, που εξαρτάται από τις καιρικές συνθήκες (βροχή, χιόνι κ.α.), κατά τα τελευταία χρόνια μειώθηκε σημαντικά, οπότε αναγκαστικά αυξήθηκαν αντίστοιχα οι αντλούμενες από τις γεωτρήσεις ποσότητες νερού, για την κάλυψη των αναγκών της κατανάλωσης. Ευνόητο είναι ότι η μείωση του ποσοστού του νερού των πηγών σημαίνει και την υποβάθμιση της ποιότητας του μίγματος νερού (πηγών – γεωτρήσεων) που διατίθεται στην κατανάλωση. Κατά τη διάρκεια ενός έτους, το πρόβλημα είναι οξύτερο κατά τους μήνες αυξημένης κατανάλωσης (από Μάιο έως Σεπτέμβριο ή και Οκτώβριο) και ιδιαίτερα κατά το Γ' τρίμηνο κάθε έτους. Την περίοδο αυτή έχουμε την μέγιστη κατανάλωση (άρα και τη μέγιστη παραγωγή νερού) με τις πηγές στο ελάχιστο της απόδοσης τους και τις γεωτρήσεις στη μέγιστη άντληση.

Το πολεοδομικό συγκρότημα υδροδοτείται όπως προαναφέρθηκε, τόσο από νερά γεωτρήσεων όσο και πηγαία. Η εντατική άντληση νερού από τις γεωτρήσεις του κάμπου, αλλά και του αστικού ιστού (Βόλος – Νέα Ιωνία), είχε ως συνέπεια την ποσοτική και ποιοτική υποβάθμισή του, με αποτέλεσμα να γίνει στροφή προς την ανακάλυψη νέων πηγών.

Όσον αφορά στην ποιότητα, το νερό με το οποίο υδροδοτείται η μείζονα περιοχή του Βόλου παρουσιάζει επί σειρά ετών πρόβλημα υφαλμύρινσης, ιδιαίτερα τους καλοκαιρινούς μήνες. Το πρόβλημα εντοπίζεται περιμετρικά του Βόλου και της Νέας Ιωνίας, καθώς τα νερά των γεωτρήσεων της περιοχής, λόγω της υπεράντλησης, είναι τόσο υφάλμυρα που χαρακτηρίζονται πλέον σχεδόν ακατάλληλα (ΔΕΥΑΜΒ, 1996).

Ένα άλλο ζήτημα αποτελεί και η αυξανόμενη ζήτηση νερού στο πολεοδομικό συγκρότημα της μείζονος περιοχής Βόλου. Το 1979, όταν ιδρύθηκε η ΔΕΥΑΜΒ, η παραγωγή νερού ήταν περίπου 6 εκατ. κυβικά το χρόνο με 28,500 παροχές. Σήμερα, η παραγωγή του νερού ανέρχεται σε 15 εκατ. κυβικά το χρόνο με 71,000 παροχές, δηλαδή παρατηρείται αύξηση μεγαλύτερη του 150% στα τελευταία είκοσι επτά χρόνια, ενώ οι νέες παροχές υπολογίζεται πως θα ανέρχονται σε 1000 σε ετήσια βάση. Έχει υπολογισθεί ότι για την κάλυψη των αναγκών ύδρευσης μέχρι το 2035, το πολεοδομικό συγκρότημα απαιτεί ποσότητα νερού 22 εκατ. κυβικών ετησίως. Είναι επομένως φανερό πως η υπόλοιπη ποσότητα θα πρέπει να εξασφαλιστεί από επιφανειακά νερά και νέες πηγές.

1.2 ΕΡΕΥΝΑ ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΩΝ

Για την έρευνα ερωτηματολογίων που πραγματοποιήθηκε για την εκτίμηση της Προθυμίας Πληρωμής (Willingness to Pay) συγκεντρώθηκαν 110 ερωτηματολόγια. Από αυτά, 100 ήταν πλήρως απαντημένα και χρησιμοποιήθηκαν για περαιτέρω επεξεργασία. Το μέγεθος του δείγματος θεωρείται ικανοποιητικό για την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων συγκρινόμενο με τον συνολικό πληθυσμό της μείζονος περιοχής του Βόλου.

Όσον αφορά στην κατανομή του δείγματος, η μείζονα περιοχή του Βόλου αποτελείται από 3 δήμους, Βόλου, Νέας Ιωνίας και Αισωνίας. Οι τρεις δήμοι χωρίζονται σε 4 τομείς, εκ των οποίων οι τομείς 1, 2 και 3 αποτελούν το Δήμο Βόλου και ο τομέας 4 από το Δήμο Νέας Ιωνίας και το Δήμο Αισωνίας (Σχήμα 1).



Σχήμα 1. Οι τέσσερις τομείς του δικτύου ύδρευσης της ΔΕΥΑΜΒ.

Με βασικό σκεπτικό την αντιπροσωπευτικότητα όλων των περιοχών της μείζονος περιοχής Βόλου στο δείγμα, ο αριθμός των ερωτηματολογίων με τα οποία κάθε δήμος συμμετέχει, καθώς και ο πληθυσμός κάθε δήμου φαίνονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Κατανομή του δείγματος.

Δήμος	Πληθυσμός δείγματος	Ποσοστό	Συνολικός πληθυσμός	Ποσοστό
Βόλου	70	70%	82,439	70.2%
Νέας Ιωνίας	25	25%	31,929	27.2%
Αιτωνίας	5	5%	3,031	2.6%
Σύνολο	100	100%	117,399	100%

Όσον αφορά στην δειγματοληπτική μέθοδο που ακολουθήθηκε, η επιλογή του δείγματος έγινε με τη μέθοδο της τυχαίας δειγματοληψίας. Σύμφωνα με αυτή δεν υφίσταται υποκειμενικός παράγοντας. Για την αξιοπιστία του δείγματος η συλλογή των στοιχείων έγινε με γνώμονα τη συμπλήρωση ενός ερωτηματολογίου από κάθε πολυκατοικία ή μονοκατοικία και ανά οικοδομικό τετράγωνο. Εξασφαλίστηκε έτσι όσο το δυνατόν καλύτερα η έννοια της τυχαίας δειγματοληψίας (Pouta et al, 2002).

Το ερωτηματολόγιο αποτελείται από 3 μέρη. Στο πρώτο μέρος: «Κοινωνικά Χαρακτηριστικά», ορίζονται τα κοινωνικά χαρακτηριστικά του δείγματος (φύλο, ηλικία, εκπαίδευση κ.τ.λ.), ενώ υπάρχουν γενικές ερωτήσεις που δίνουν πληροφορίες για τις κατοικίες, τα άτομα που κατοικούν μαζί κ.τ.λ. Καθορίζεται με αυτό τον τρόπο η ταυτότητα του δείγματος.

Στο δεύτερο μέρος: «Χρήση και εξοικονόμηση του νερού», υπάρχουν ερωτήσεις που εξετάζουν την κατανάλωση και τις χρήσεις του νερού στην πόλη (εξωτερική χρήση του νερού, διαρροές, χρήση συσκευών εξοικονόμησης νερού). Επίσης περιλαμβάνονται ερωτήσεις όπου ζητείται από το κοινό να αξιολογήσει ορισμένους παράγοντες ως προς την

κατανάλωση του νερού, όπως η τιμή του και τα μέλη μιας οικογένειας. Εδώ ζητείται να αξιολογηθούν και κάποιοι παράγοντες που συμβάλλουν -και κατά πόσο- στην εξοικονόμηση του νερού, όπως η εφαρμογή κατάλληλης τιμολογιακής πολιτικής και ο έλεγχος διαρροών δικτύου.

Τέλος, στο τρίτο μέρος: «Τιμολόγηση νερού – Πολιτική Εξοικονόμησης», περιλαμβάνονται ερωτήσεις όπου ζητείται από το κοινό να απαντήσει αν είναι διατεθειμένο να συμμετάσχει και να ενημερώνεται για προγράμματα εξοικονόμησης νερού. Οι καταναλωτές ερωτώνται επίσης κατά πόσον είναι διατεθειμένοι να συμβάλλουν στη βελτίωση των υπηρεσιών που παρέχει η ΔΕΥΑΜΒ μέσω της αύξησης του τιμολογίου, και αν ναι με τι ποσό ετησίως (Willingness to Pay).

Η επεξεργασία των δεδομένων έγινε με σύγχρονες μεθόδους ανάλυσης δεδομένων, με τη βοήθεια του στατιστικού λογισμικού πακέτου S-Pro (Παπαδημητρίου, 1994).

1.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

1.3.1 Διαρροές δικτύου

Αρχικά ερευνήθηκε το κατά πόσον οι καταναλωτές ελέγχουν πιθανές διαρροές των εσωτερικών τους δικτύων ύδρευσης. Ο έλεγχος για πιθανές διαρροές με παρατήρηση των υδρομετρητών τους, αφού πρώτα κλείσουν όλες τις βρύσες και τις συσκευές (π.χ. πλυντήριο πιάτων, πλυντήριο ρούχων, καζανάκι τουαλέτας κλπ) των σπιτιών τους. Στην περίπτωση που ο υδρομετρητής καταγράφει έστω και μικρή κατανάλωση νερού, αυτό σημαίνει εσωτερική διαρροή.

Τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν ότι 61% των ερωτηθέντων ελέγχει τις διαρροές του δικτύου, ενώ το υπόλοιπο 39% δεν ελέγχει πιθανές διαρροές. Ένα σημαντικό μέρος των καταναλωτών δηλαδή, ασχολείται με πιθανές βλάβες του δικτύου και τη συνεπακόλουθη διαρροή νερού. Ο έλεγχος των διαρροών συνεπάγεται διπλό όφελος, καθώς από τη μια πλευρά συντελεί στην εξοικονόμηση του νερού, ενώ από την άλλη εξυπηρετεί και τα οικονομικά συμφέροντα της ΔΕΥΑΜΒ αφού δε χάνεται νερό το οποίο δε χρεώνεται.

Σ' ένα επόμενο στάδιο διερευνάται η συχνότητα ελέγχου των διαρροών του δικτύου. Η πλειοψηφία αυτών που ελέγχουν τις διαρροές (27%), πραγματοποιούν τον έλεγχο μια φορά το χρόνο, ένα 15% τις ελέγχει μία φορά το μήνα, ένα 13% μια φορά στους δύο μήνες, ενώ το 39% δεν ελέγχει ποτέ πιθανές διαρροές που μπορεί να συμβούν στο δίκτυο.

1.3.2 Προγράμματα εξοικονόμησης νερού

Παρά την έλλειψη ενημέρωσης και την μη αποτελεσματική εγρήγορση των καταναλωτών, παρατηρούμε ότι η πλειοψηφία των ερωτηθέντων δηλώνει ενεργό ενδιαφέρον συμμετοχής σε προγράμματα εξοικονόμησης νερού. Το 87% των ερωτηθέντων επιθυμεί τη συμμετοχή σε οποιοδήποτε πρόγραμμα εξοικονόμησης νερού και μόλις ένα 13% δηλώνει αδιαφορία.

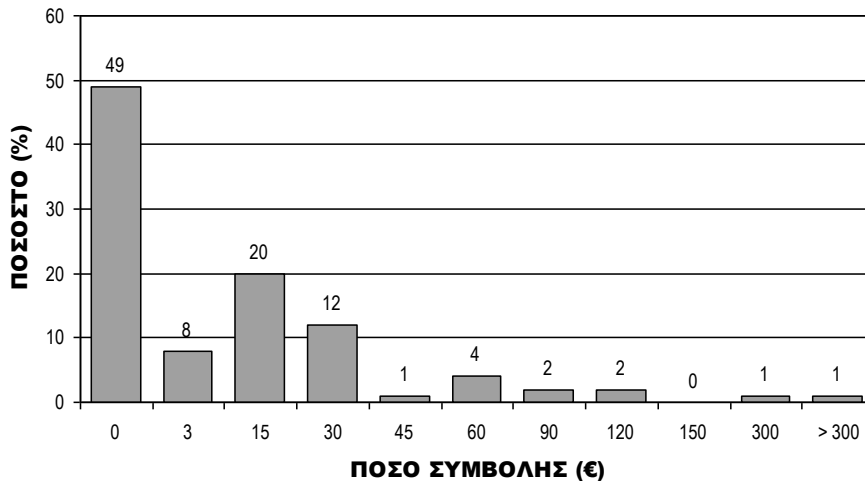
Η διάθεση του καταναλωτικού κοινού για ενημέρωση πάνω σε προγράμματα και υπηρεσίες εξοικονόμησης νερού φαίνεται από το συντριπτικό ποσοστό της τάξεως του 90%, το οποίο επιθυμεί την ενημέρωση-πληροφόρηση, ενώ ένα μικρό ποσοστό (10%) δε δηλώνει οποιοδήποτε ενδιαφέρον για την ύπαρξη και τα οφέλη προγραμμάτων εξοικονόμησης νερού.

1.3.3 Βελτίωση των υπηρεσιών που παρέχει η ΔΕΥΑΜΒ μέσω της αύξησης του τιμολογίου

Πρόθυμο να συνεισφέρει οικονομικά (από 3 έως 300+ ευρώ), προκειμένου να βελτιωθούν οι υπηρεσίες της ΔΕΥΑΜΒ, εμφανίζονται οι 51 από τους 100 ερωτηθέντες

καταναλωτές, ενώ οι υπόλοιποι 49 θεωρούν ότι αποτελεί υποχρέωση της επιχείρησης να εξασφαλίζει άριστη ποιότητα και επαρκή παροχή νερού, υποστηρίζοντας μάλιστα ότι το νερό αποτελεί κοινωνικό αγαθό.

Το ποσοστό των καταναλωτών που εμφανίζεται διατεθειμένο να συμβάλει στη βελτίωση των υπηρεσιών, δήλωσε το ποσό που θα μπορούσε να διαθέσει ετησίως. Πιο συγκεκριμένα, η πλειοψηφία αυτών (89%) διαθέτει μέχρι και €30 ετησίως, ενώ ελάχιστοι ήταν αυτοί οι οποίοι δέχονται να επιβαρυνθούν με περισσότερα από €45 ετησίως (Σχήμα 2).



Σχήμα 2. Ποσό συμβολής καταναλωτών για τη βελτίωση των υπηρεσιών νερού.

2. ΜΟΝΤΕΛΑ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ ΧΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑΣ

Πολλές μελέτες Προθυμίας Πληρωμής (Willingness to Pay - WTP) που χρησιμοποιούν τη θεωρητική προσέγγιση της συνάρτησης χρησιμότητας (Hanemann, 1984), συλλέγουν το εισόδημα του ερωτώμενου χωρισμένο σε κατηγορίες εισοδήματος, προκειμένου να αυξήσουν τα ποσοστά των σωστών απαντήσεων. Στόχος των μελετών είναι να διερευνηθεί το πώς η Προθυμία Πληρωμής επηρεάζεται από το εισόδημα των καταναλωτών και τη μορφή της συνάρτησης χρησιμότητας.

Σε αυτές τις μελέτες, η μεταβλητή του εισοδήματος θεωρείται συνήθως ως συνεχής μεταβλητή με τη χρησιμοποίηση είτε της μέσης τιμής των κατηγοριών εισοδήματος, είτε των τιμών της κατηγορίας εισοδήματος (δηλ. 1, 2, 3, ..., n, όπου: 1 η χαμηλότερη κατηγορία εισοδήματος, 2 η αμέσως ψηλότερη κατηγορία κ.λ.π.). Ένας τρίτος τρόπος αντιμετώπισης της μεταβλητής του εισοδήματος στις μελέτες WTP, είναι η χρήση των ψευδομεταβλητών (dummy variables) που αντιπροσωπεύουν τις διάφορες κατηγορίες εισοδήματος.

Στο μοντέλο του Hanemann (utility difference model), η συνάρτηση χρησιμότητας $v(y, q, \alpha)$ είναι συνάρτηση του εισοδήματος y , του αγαθού q , και ενός διανύσματος άλλων κοινωνικοοικονομικών μεταβλητών α . Ο καταναλωτής είναι πρόθυμος να πληρώσει ένα ποσό b , για να αποκτήσει $q_1 > q_0$ αν $\Delta v = v(y - b, q_1, \alpha) - v(y, q_0, \alpha) \geq 0$. Η Προθυμία Πληρωμής (WTP) για την αλλαγή αυτή προσδιορίζεται από $v(y - WTP, q_1, \alpha) - v(y, q_0, \alpha) = 0$ έτσι ώστε, να εξασφαλιστεί η μονοτονία της συνάρτησης $WTP = f(q_1, q_0, y, \alpha)$.

Υποτίθεται ότι η Προθυμία Πληρωμής είναι γνωστή στον καταναλωτή, αλλά είναι άγνωστη στον μελετητή. Ο μελετητής μπορεί μόνο να παρατηρήσει τις προσφορές και τις απαντήσεις από την έρευνα. Το οικονομετρικό πρόβλημα επομένως αποτελείται από τον προσδιορισμό των παραμέτρων μιας συνάρτησης Δv , οι οποίες μεγιστοποιούν την πιθανότητα της παρατήρησης των ναι/όχι απαντήσεων στις προσφερθείσες προσφορές b .

Δύο κρίσιμες αποφάσεις πρέπει να ληφθούν για τον προσδιορισμό του οικονομετρικού μοντέλου: καθορισμός της μεταβλητής του εισοδήματος και επιλογή της μορφής της συνάρτησης. Τα δεδομένα του εισοδήματος συλλέγονται με τη βοήθεια ερωτηματολογίου με μια ερώτηση που ζητά από τον καταναλωτή να προσδιορίσει σε ποια από τις n κατηγορίες εισοδήματος ανήκει το εισόδημά του (π.χ. €6,000 - €12,000). Αυτά τα στοιχεία μπορούν έπειτα να επεξεργαστούν με έναν από τους τρεις παρακάτω τρόπους:

α) ο αναλυτής μπορεί να χρησιμοποιήσει τον αριθμό κατηγορίας του εισοδήματος $c=1,2,\dots,n$,
 β) οι n ψευδομεταβλητές μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις οποίες $d_i = 1$ αν $c = i$,
 γ) οι απαντήσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να προβλέψουν τα πραγματικά εισοδήματα σε ευρώ, χρησιμοποιώντας τη μέση τιμή m της κατηγορίας.

Αφού διευκρινιστεί η μεταβλητή του εισοδήματος, επιλέγεται στη συνέχεια η μορφή της συνάρτησης.

Ο Πίνακας 2 παρουσιάζει εννέα πιθανά πρότυπα μοντέλα (Aiew et al., 2004). Οι στήλες διαιρούν τα μοντέλα ανάλογα με την επεξεργασία της μεταβλητής του εισοδήματος και οι σειρές του πίνακα διαιρούν τα μοντέλα ανάλογα με τη μορφή της συνάρτησης.

Πίνακας 2. Μοντέλα συνάρτησης χρησιμότητας.

Μορφή συνάρτησης	Ψευδομεταβλητές εισοδήματος	Μέση τιμή κατηγορίας εισοδήματος	Αριθμός κατηγορίας εισοδήματος
	Μοντέλο 1	Μοντέλο 2	Μοντέλο 3
Γραμμική	$\Delta v = \alpha_0 + \beta_0 b + \sum a_i d_i + \beta_1 d_i b$	$\Delta v = \alpha_0 + \beta_0 b + a_1 y$	$\Delta v = \alpha_0 + \beta_0 b + a_1 c$
	$WTP = - \frac{\alpha_0 + \sum \alpha_i d_i}{\beta_0 + \sum \beta_i d_i}$	$WTP = - \frac{\alpha_0 + a_1 y}{\beta_0}$	$WTP = - \frac{\alpha_0 + a_1 c}{\beta_0}$
	NA	Μοντέλο 4	NA
Λογαριθμική ως προς το καθαρό εισόδημα		$\Delta v = (a_1 - \alpha_0) + \beta_0 \ln \left(\frac{y - b}{y} \right)$	
		$WTP = y \left(1 - \exp \left(- \frac{a_1 - \alpha_0}{\beta_0} \right) \right)$	
	Μοντέλο 5	Μοντέλο 6	Μοντέλο 7
Λογαριθμική ως προς b	$\Delta v = \alpha_0 + \beta_0 \ln b + \sum (\alpha_i d_i + \beta_i d_i \ln b)$	$\Delta v = \alpha_0 + \beta_0 \ln b + a_1 y$	$\Delta v = \alpha_0 + \beta_0 \ln b + a_1 c$
	$WTP = \exp \left(- \frac{\alpha_0 + \sum \alpha_i d_i}{\beta_0 + \sum \beta_i d_i} \right)$	$WTP = \exp \left(- \frac{\alpha_0 + a_1 y}{\beta_0} \right)$	$WTP = \exp \left(- \frac{\alpha_0 + a_1 c}{\beta_0} \right)$
	NA	Μοντέλο 8	Μοντέλο 9
Λογαριθμική ως προς y και b		$\Delta v = \alpha_0 + \beta_0 \ln b + a_1 \ln y$	$\Delta v = \alpha_0 + \beta_0 \ln b + a_1 \ln c$
		$WTP = \exp \left(- \frac{\alpha_0 + a_1 \ln y}{\beta_0} \right)$	$WTP = \exp \left(- \frac{\alpha_0 + a_1 \ln c}{\beta_0} \right)$

3. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΡΟΘΥΜΙΑΣ ΠΛΗΡΩΜΗΣ

Για τις ανάγκες της έρευνας των ερωτηματολογίων, το εισόδημα των καταναλωτών έχει χωριστεί σε τέσσερις προκαθορισμένες κατηγορίες. Οι τέσσερις αυτές κατηγορίες είναι:

- μικρότερο από €6,000
- από €6,000 έως €12,000

γ) από €12,000 έως €20,000 και
 δ) μεγαλύτερο από €20,000.

Στον Πίνακα 3 φαίνονται οι εξισώσεις της εκτιμώμενης Προθυμίας Πληρωμής (WTP) με βάση τα μοντέλα του Πίνακα 2.

Πίνακας 3. Εξισώσεις Προθυμίας Πληρωμής.

a/a	Εξισώσεις Προθυμίας Πληρωμής	Πλήθος παρατηρήσεων	F-test	Significance level	Adj-R ²
1	$WTP = 18.0000 + 0.0000*d_1 + 9.1875*d_2 + 8.1429*d_3 + 57.3333*d_4$	51	2.33	8.6 %	0.0741
2	$WTP = -8.83085 + 0.0035*y$	51	4.43	4.0 %	0.0642
3	$WTP = -13.06373 + 19.3232*c$	51	5.02	3.0 %	0.0744
4	N/A	51	---	---	---
5	$\ln WTP = 2.6229 + 0.0000*d_1 - 0.0026*d_2 + 0.2513*d_3 + 1.1226*d_4$	51	3.48	2.3 %	0.1295
6	$\ln WTP = 1.8967 + 0.0001*y$	51	8.12	0.6 %	0.1246
7	$\ln WTP = 1.8497 + 0.4268*c$	51	8.40	0.6 %	0.1289
8	$\ln WTP = -5.7524 + 0.9284*\ln y$	51	6.81	1.2 %	0.1041
9	$\ln WTP = 2.2156 + 0.8693*\ln c$	51	6.23	1.6 %	0.0947

όπου:

d_1, d_2, d_3 και d_4 : οι ψευδομεταβλητές (dummy variables) του εισοδήματος

y : το εισόδημα

c : η κατηγορία του εισοδήματος

WTP : η Προθυμία Πληρωμής

Οι εκτιμώμενες ετήσιες τιμές της Προθυμίας Πληρωμής είναι **€39.98** για τα μοντέλα 1-3 (γραμμικά μοντέλα), ενώ για τα μοντέλα 5-9 (λογαριθμικά μοντέλα) είναι **€20.52**. Η απόκλιση αυτή πιθανόν να οφείλεται στο μικρότερο μέγεθος του δείγματος ($n = 51$) που δήλωσαν πρόθυμοι για πληρωμή και του μεγάλου ποσοστού «ψήφων διαμαρτυρίας». Η επίλυση των μοντέλων έγινε με τη μέθοδο της γραμμικής παλινδρόμησης (linear regression) με τη βοήθεια του στατιστικού προγράμματος Stata.

Η εκτιμώμενη τιμή των γραμμικών μοντέλων (39.98 €/yr) σχεδόν ταυτίζεται με τη μέση τιμή του ποσού προσφοράς b (40.00 €/yr) των καταναλωτών. Αντιθέτως τα λογαριθμικά μοντέλα φαίνεται να έχουν καλύτερους στατιστικούς δείκτες (F, R^2) από τα γραμμικά.

Σε κάθε περίπτωση η Προθυμία Πληρωμής ακόμη και των 39.98 ευρώ το χρόνο, θεωρείται μάλλον ικανοποιητική, αφού ένα ποσό της τάξης των €3.33 ανά μήνα ή των €10.00 ανά λογαριασμό ύδρευσης αντιστοιχεί στο 1/3 ενός λογαριασμού ύδρευσης μιας μέσης οικογένειας καταναλωτών.

4. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΡΟΘΥΜΙΑΣ ΠΛΗΡΩΜΗΣ (WTP) ΑΝΑ ΤΟΜΕΑ, ΗΛΙΚΙΑ ΚΑΙ ΕΠΙΠΕΔΟ ΜΟΡΦΩΣΗΣ

Έχοντας υπολογίσει την Προθυμία Πληρωμής συναρτήσει του εισοδήματος των καταναλωτών, στη συνέχεια έγινε προσπάθεια να διερευνηθεί η Προθυμία Πληρωμής ανά τομέα, ηλικία και επίπεδο μόρφωσης. Χρησιμοποιήθηκε και πάλι μια εξίσωση γραμμικής μορφής, η οποία φαίνεται να εκτιμά καλύτερα τις ετήσιες τιμές Π.Π.:

$$WTP = a_0 + a_1*y + a_2*m2 + a_3*mem + a_4*rown \quad (4.1)$$

όπου:

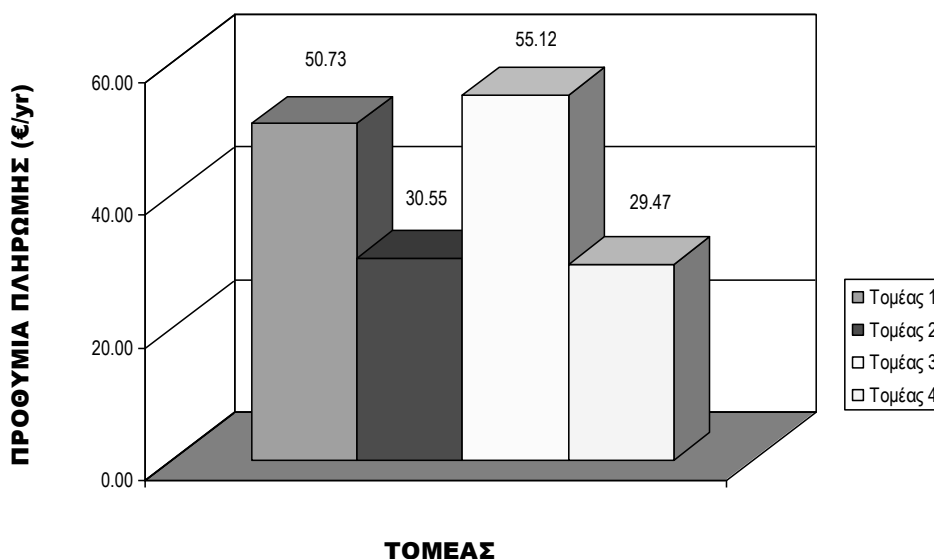
WTP: η Προθυμία Πληρωμής
y: το εισόδημα των καταναλωτών
m2: το μέγεθος της κατοικίας
mem: ο αριθμός των μελών της οικογένειας
rown: η ιδιοκτησία της κατοικίας

Με τη μέθοδο της γραμμικής παλινδρόμησης (linear regression) και με τη βοήθεια του στατιστικού προγράμματος Stata υπολογίστηκαν οι συντελεστές a_0 , a_1 , a_2 , a_3 και a_4 , και προέκυψε η τελική εξίσωση της Προθυμίας Πληρωμής:

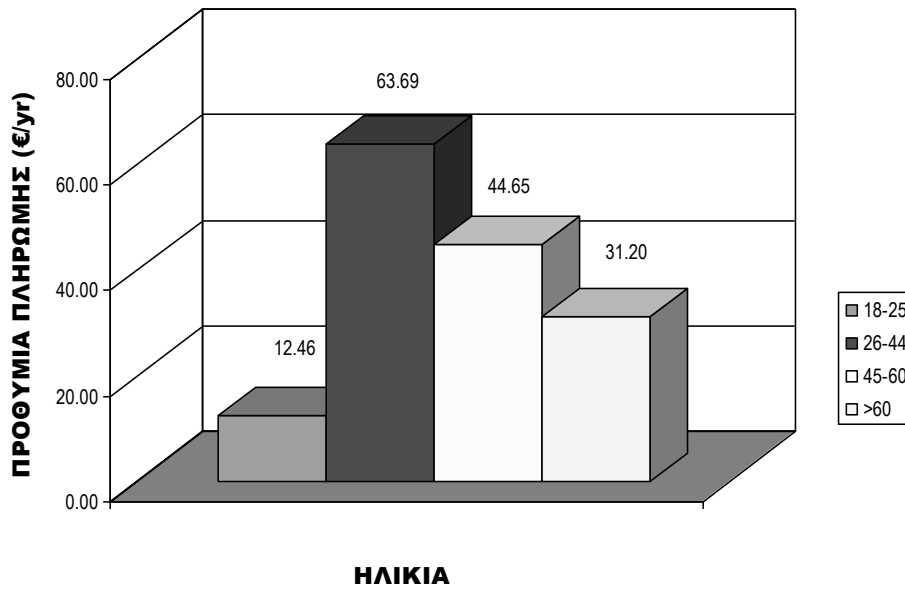
$$WTP = -89.2036 + 0.0027*y + 0.2444*m2 + 10.2415*mem + 26.0957*rown \quad (4.2)$$

Στη συνέχεια υπολογίστηκαν οι εκτιμώμενες τιμές της Προθυμίας Πληρωμής ανά Τομέα κατανάλωσης σύμφωνα με το διαχωρισμό της ΔΕΥΑΜΒ, ανά Ηλικία (18-25, 26-44, 45-60, >60) και ανά Επίπεδο Μόρφωσης (Α'θμια, Β'θμια και Γ'θμια εκπαίδευση). Στους Τομείς 1 και 3 (Σχήμα 3), όπου το δίκτυο ύδρευσης είναι πεπαλαιωμένο με περισσότερες θραύσεις και διαρροές αλλά και διακοπές υδροδότησης, η Προθυμία Πληρωμής των καταναλωτών είναι σημαντικά μεγαλύτερη σε σχέση με τους Τομείς 2 και 4, όπου το δίκτυο είναι καινούργιο, καθώς έχει αντικατασταθεί στο μεγαλύτερο τμήμα του.

Στο Σχήμα 4, η Προθυμία Πληρωμής εκτινάσσεται στα 63.69 €/yr στις ηλικίες 26-44, όπου υπάρχει ευαισθητοποίηση πάνω σε θέματα που αφορούν στο νερό και είναι διατεθειμένοι να συνεισφέρουν οικονομικά για τη βελτίωση των υπηρεσιών νερού.



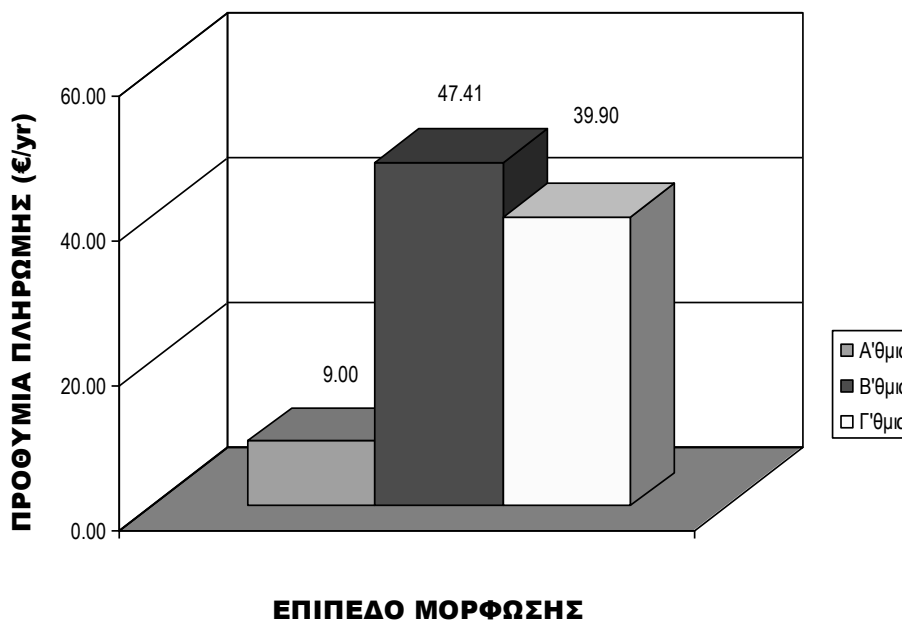
Σχήμα 3. Προθυμία Πληρωμής ανά Τομέα Κατανάλωσης.



Σχήμα 4. Προθυμία Πληρωμής ανά Ηλικία.

Στις υπόλοιπες ηλικιακές ομάδες (45-60 και >60), η Προθυμία Πληρωμής ακολουθεί φθίνουσα πορεία, ενώ στις ηλικίες 18-25 είναι σε πολύ χαμηλά επίπεδα, το οποίο δικαιολογείται από τα χαμηλά εισοδήματα των νέων.

Στο Σχήμα 5 οι καταναλωτές με χαμηλό μορφωτικό επίπεδο δεν είναι ιδιαίτερα πρόθυμοι να συμμετέχουν πληρώνοντας παραπάνω για το νερό (μόνο 9.00 €/yr) σε σχέση με τους καταναλωτές με μέσο και υψηλό επίπεδο μόρφωσης (Β'θμια και Γ'θμια εκπαίδευση. Αυτό οφείλεται κυρίως στα χαμηλότερα εισοδήματα των πρώτων, θεωρώντας ότι το νερό είναι ήδη αρκετά ακριβό και είναι υποχρέωση της ΔΕΥΑΜΒ για την αναβάθμιση των υπηρεσιών της.



Σχήμα 5. Προθυμία Πληρωμής ανά Επίπεδο Μόρφωσης.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αντικείμενο αυτής της εργασίας είναι η διερεύνηση του τρόπου με τον οποίο η Προθυμία Πληρωμής επηρεάζεται από το εισόδημα των καταναλωτών και τη μορφή της συνάρτησης χρησιμότητάς τους.

Η εκτίμηση της Προθυμίας Πληρωμής είναι μια διαδικασία εξαιρετικά ευαίσθητη και πολύπλοκη, όπως είδαμε πιο πάνω και υλοποιήθηκε χρησιμοποιώντας μια από τις μεθόδους πρόθεσης και συγκεκριμένα τη Μέθοδο Εξαρτημένης Αξιολόγησης, η οποία βασίζεται στην εκτίμηση της πρόθεσης των καταναλωτών να πληρώσουν για τη διατήρηση ενός συγκεκριμένου περιβαλλοντικού αγαθού (του νερού στην περίπτωση μας) με βάση ερωτηματολόγια για υποθετικές ή πειραματικές αγορές.

Για τον προσδιορισμό του οικονομετρικού μοντέλου δύο κρίσιμες αποφάσεις πρέπει να ληφθούν: α) ο καθορισμός της μεταβλητής του εισοδήματος, και β) η επιλογή της μορφής της συνάρτησης χρησιμότητας.

Χρησιμοποιήθηκαν εννέα πιθανά πρότυπα μοντέλα ανάλογα με την μορφή της μεταβλητής του εισοδήματος (μέση τιμή m , κατηγορία c και ψευδομεταβλητή d του εισοδήματος) και τη μορφή της συνάρτησης χρησιμότητας (γραμμική, λογαριθμική) ως προς το εισόδημα y και την προσφορά b .

Η επίλυση των μοντέλων έγινε με τη μέθοδο της γραμμικής παλινδρόμησης (linear regression) με τη βοήθεια του στατιστικού προγράμματος Stata και προέκυψαν οι τιμές της εκτιμώμενης Προθυμίας Πληρωμής.

Τα γραμμικά μοντέλα εκτιμούν ότι η Προθυμία Πληρωμής των καταναλωτών, σχεδόν ταυτίζεται με τη μέση τιμή του ποσού προσφοράς b των καταναλωτών, σε αντίθεση με τα λογαριθμικά μοντέλα που παρουσιάζουν καλύτερους στατιστικούς δείκτες.

Με τη μέθοδο της γραμμικής παλινδρόμησης προέκυψε η εξίσωση γραμμικής μορφής για την εκτίμηση της Προθυμίας Πληρωμής ανά τομέα, ηλικία και επίπεδο μόρφωσης των καταναλωτών της πόλης του Βόλου. Η εκτίμηση αυτή, μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τις επιχειρήσεις ύδρευσης, έτσι ώστε να προκύψουν χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με την τιμολογιακή πολιτική, προγράμματα ενημέρωσης και εκπαίδευσης των καταναλωτών και την εναρμόνιση με την Ευρωπαϊκή Οδηγία 2000/60.

Τέλος, έχοντας εκτιμήσει πιο πάνω την Προθυμία Πληρωμής των καταναλωτών μπορούμε να υπολογίσουμε το Περιβαλλοντικό Κόστος (Φαφούτης, 2008) του νερού, που αποτελεί μια από τις τρεις συνιστώσες του συνολικού κόστους των υπηρεσιών νερού, σύμφωνα με το άρθρο 9.1 της Ευρωπαϊκής Οδηγίας – Πλαίσιο (Drafting Group ECO2, 2004, Working Group 2.6 – WATECO, 2003).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ΔΕΥΑΜΒ. 1996. *Η Ύδρευση στην περιοχή του Βόλου: Ιστορικές αναφορές και σύγχρονη πραγματικότητα*. Βόλος, 1996.
- Παπαδημητρίου, Γ. 1990. *Μέθοδοι επεξεργασίας ερωτηματολογίων*. Θεσσαλονίκη.
- Παπαδημητρίου, Γ. 1994. *Μέθοδοι ανάλυσης δεδομένων*. Θεσσαλονίκη.
- Φαφούτης, Χ. 2008. *Ολοκληρωμένη προσέγγιση της διαχείρισης της ζήτησης του νερού στον οικιακό τομέα. Κοστολόγηση σύμφωνα με την πλήρη αξία του*. Διδακτορική διατριβή. Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.
- Adamowicz, W. L., Bhardwaj, V. and Macnab, B. 1993. *Experiments on the difference between willingness to pay and willingness to accept*. Land Economics, 69: 416–27.
- Aiew, W., Nayga Jr., R. M. and Woodward, R. T. 2004. *The treatment of income variable in willingness to pay studies*. Applied Economic Letters, 11: 581-585.

- Al-Ghuraiz, Y. and Enshassi, A. 2004. *Ability and willingness to pay for water supply service in the Gaza Strip*, Building and Environment, Elsevier, 40: 1093-1102.
- Arrow, K., Solow, R., Portney, P.R., Leamer, E.E., Radner, R. and Schuman, H. 1993. *Report of the NOAA Panel on contingent valuation*. Federal Register, January 15, 58(10): 4601-4614.
- Calkins, P., Larue, B. and Vezina, M. 2002. *Willingness to pay for drinking water in the Sahara: the case of Douentza in Mali*. Cahiers d'économie et sociologie rurales, n° 64, 2002.
- Cho, Y. 1996. *Willingness to pay for drinking water quality improvements: a contingent valuation study for Southwestern Minnesota*. University of Minnesota, Ph.D. Dissertation.
- Coursey, D., Hovis, J. and Schulze, W. 1987. *The disparity between willingness-to-accept and willingness-to-pay*. Quarterly Journal of Economics, 102: 679-690.
- Drafting Group ECO1. 2004. *Information Sheet on Assessment of the Recovery of Costs for Water Services for the 2004 River Basin Characterisation Report*. Common Implementation Strategy Working Group 2B: Drafting Group ECO1, February 2004.
- Drafting Group ECO2. 2004. *Assessment of Environmental and Resource Costs in the Water Framework Directive*. Information Sheet prepared by Drafting Group ECO2 Common Implementation Strategy Working Group 2B, November 2004.
- Directive 2000/60/EC. 2000. *Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy*. Official Journal of European Communities, 22.10.2000.
- Drafting Group ECO2. 2004. *Assessment of Environmental and Resource Costs in Water Framework Directive*. Information Sheet.
- Hanemann, W. M. 1984. *Welfare evaluations in contingent valuation experiments with discrete responses*. American Journal of Agricultural Economics, 66(3): 332-41.
- Jaysasundara, J., Kotagama, H.B. and Weerahewa, J. 1999. *Willingness to pay for drinking water*. Tropical Agricultural Research, (11): 301-307.
- Pouta, E., Rekola, M., Kuuluvainen, J., Li, C.Z. and Tahvonen, O. 2002. *Willingness to pay in different policy-planning methods: insights into respondents' decision making processes*. Ecological Economics, 40: 295-311.
- Working Group 2.6 – WATECO. 2003. *Economics and the Environment – The Implementation Challenge of the Water Framework Directive*. Guidance Document No 1.

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΚΛΙΜΑΤΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΩΝ ΣΤΙΣ ΑΝΑΓΚΕΣ ΣΕ ΝΕΡΟ ΤΩΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΑ ΤΟΥ ΑΡΔΕΥΤΙΚΟΥ ΝΕΡΟΥ

Π.Ε. Γεωργίου¹, Δ.Μ. Παπαμιχαήλ², Α.Γ. Λιάπης³

Τομέας Εγγείων Βελτιώσεων, Εδαφολογίας και Γεωργικής Μηχανικής
Γεωπονική Σχολή Α.Π.Θ., 54124 Θεσσαλονίκη
¹pantaz@agro.auth.gr, ²papamich@agro.auth.gr, ³aliapis@egnatia.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο αγροτικός τομέας αποτελεί τον κύριο καταναλωτή των διαθέσιμων υδατικών πόρων και το γεγονός αυτό επιβάλλει την ορθολογική διαχείριση του νερού στη γεωργία. Η τιμολόγηση του αρδευτικού νερού, η οποία μπορεί να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στον εξορθολογισμό της χρήσης του νερού στη γεωργία, προϋποθέτει την εκτίμηση της οικονομικής του αξίας. Στην εργασία αυτή γίνεται εκτίμηση της αξίας του αρδευτικού νερού με τη μέθοδο της συνάρτησης ζήτησης παραγωγού. Η καμπύλη ζήτησης εξάγεται με τη χρήση του θετικού μαθηματικού προγραμματισμού για διάφορα επίπεδα διαθεσιμότητας νερού. Στη συνέχεια γίνεται ανάλυση της επίδρασης των κλιματικών αλλαγών στις ανάγκες σε νερό των καλλιεργειών και στην οικονομική αξία του αρδευτικού νερού. Χρησιμοποιήθηκαν δύο σενάρια κλιματικών αλλαγών (SRES A2 και SRES B1), τα οποία πάρθηκαν από το μοντέλο γενικής κυκλοφορίας CGCM 3.1, ενώ ο υποβιβασμός κλίμακας στην περιοχή μελέτης έγινε με τη βοήθεια στατιστικών μεθόδων. Οι κλιματικές αλλαγές επηρεάζουν την εξαγόμενη, με τη χρήση της προαναφερθείσας μεθόδου, οικονομική αξία του αρδευτικού νερού, με τρόπο που εξαρτάται από το επίπεδο διαθεσιμότητας του νερού.

IMPACT OF THE CLIMATE CHANGE ON CROP WATER REQUIREMENTS AND THE ECONOMIC VALUE OF THE IRRIGATION WATER

P.E. Georgiou¹, D.M. Papamichail², A.G. Liapis

Department of Hydraulics, Soil Science and Agricultural Engineering
Faculty of Agriculture, A.U.Th., 54124 Thessaloniki
¹pantaz@agro.auth.gr, ²papamich@agro.auth.gr, ³aliapis@egnatia.gr

ABSTRACT

The agricultural sector is the main consumer of water resources and this requires rational management of water resources in agriculture. The pricing of the irrigation water, which can play an important role in the rationalization of water use in agriculture, requires the estimation of its economic value. In this paper the economic value of irrigation water is estimated by the producer's demand function method. The demand curve is extracted by using positive mathematical programming for various levels of water availability and the impact of climate change on crop water requirements and the economic value of the irrigation water is examined. We used two climate change scenarios (SRES A2 and SRES B1), which were taken from the Canadian General Circulation Model CGCM 3.1 and the downscaling was done by using statistical methods. The impact of the climate change in the estimated economic value of the irrigation water depends on the level of water availability.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η γεωργία είναι σήμερα ο πιο απαιτητικός σε νερό τομέας ανθρώπινης δραστηριότητας. Για αρδευτικούς σκοπούς χρησιμοποιούνται, σε παγκόσμιο επίπεδο, περίπου τα 2/3 της συνολικά καταναλισκόμενης ποσότητας νερού, όπου στην Ελλάδα η ποσότητα αυτή φθάνει περίπου το 80% (Παπαμιχαήλ και Γεωργίου, 2008). Από τα παραπάνω προκύπτει η δεσπόζουσα συμμετοχή του αγροτικού τομέα στην κατανάλωση των διαθέσιμων αποθεμάτων νερού, η οποία καθιστά τη διαχείριση του νερού άρδευσης εξαιρετικά σημαντική. Ορθολογική διαχείρισή του σημαίνει (α) Ελαχιστοποίηση ή και μηδενισμό της σπατάλης και (β) Μεγιστοποίηση της αποδοτικότητας χρήσης του νερού. Η μείωση της σπατάλης έχει να κάνει με τη χρησιμοποίηση της ποσότητας νερού άρδευσης που πραγματικά απαιτείται σε κάθε συγκεκριμένη περίπτωση και στην εφαρμογή της άρδευσης με αποδοτικές μεθόδους. Η μεγιστοποίηση της αποδοτικότητας χρήσης του νερού στον αγροτικό τομέα, προσεγγίζεται ως ένα θέμα οικονομικής υφής με τη θεώρησή του αρκετές φορές ως οικονομικού αγαθού.

Αποτέλεσμα όλων των παραπάνω διαπιστώσεων είναι η ενδυνάμωση της επιθυμίας για ορθότερη διαχείριση και προστασία των υδατικών πόρων, λαμβανομένων υπόψη και των επερχόμενων κλιματικών αλλαγών. Η τιμολόγηση του αρδευτικού νερού είναι ένα βασικό εργαλείο για την ορθολογική διαχείρισή του και την επίτευξη των επιδιωκόμενων στόχων της Οδηγίας 2000/60. Οι εφαρμοζόμενες πολιτικές τιμολόγησης πρέπει να παρέχουν κατάλληλα κίνητρα στους χρήστες ώστε να χρησιμοποιούν αποτελεσματικά τους υδατικούς πόρους, αποφεύγοντας τις σπατάλες και συμβάλλοντας έτσι στη ορθολογική διαχείρισή τους.

Απαραίτητη προϋπόθεση για την τιμολόγηση του νερού αποτελεί η αποτίμηση της οικονομικής του αξίας. Η διαφορά ανάμεσα σε αυτούς τους δύο όρους είναι η εξής: Η *τιμολόγηση (pricing)* έχει να κάνει με τον καθορισμό μίας τιμής ή μίας τιμολογιακής πολιτικής ενώ η *οικονομική αποτίμηση (economic valuation)* αφορά στην εκτίμηση της οικονομικής αξίας του νερού και σαν έννοια σχετίζεται με την *κοστολόγηση (cost accounting)* που γίνεται στα πλαίσια της παραγωγής οικονομικών αγαθών (Tsur et al., 2004; Young, 2005).

Η πολυπλοκότητα στην εκτίμηση της αξίας του νερού, λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του, αντικατοπτρίζεται στη μεγάλη ποικιλία μεθόδων που ερευνώνται και χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό. Όσον αφορά στις μεθόδους αυτές θα πρέπει να λεχθεί πως δε μπορούν να συγκριθούν εύκολα ως προς την εγκυρότητα. Η εγκυρότητα της καθεμιάς εξαρτάται από το πλαίσιο στο οποίο χρησιμοποιείται και τα οφέλη τα οποία μελετούνται, ενώ καθεμιά είναι κατάλληλη για διαφορετική περίπτωση (Agudelo, 2001; Young, 2005).

Στην εργασία αυτή για την αποτίμηση της αξίας του αρδευτικού νερού χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της συνάρτησης ζήτησης του παραγωγού (Taylor and Young, 1995; Agudelo, 2001; Tsur et al., 2004; Latinopoulos, 2005; Λιάπης, 2008; Λιάπης κ. άλ., 2009). Η εξαγωγή της καμπύλης ζήτησης μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση της συνάρτησης παραγωγής, με οικονομετρικές τεχνικές ή με χρήση μαθηματικού προγραμματισμού. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε ο μαθηματικός προγραμματισμός και συγκεκριμένα ο *θετικός μαθηματικός προγραμματισμός (positive mathematical programming)* (Howitt, 1995, 2005; Λιάπης, 2008) που αναπτύχθηκε από τα μέσα της δεκαετίας του 90 και μετά, με σκοπό την ανάπτυξη, ρύθμιση και επίλυση μοντέλων βελτιστοποίησης, χωρίς την ανάγκη χρήσης ασθενώς αιτιολογημένων περιορισμών. Η εξαγωγή της καμπύλης ζήτησης του αρδευτικού νερού, μέσω της μεθοδολογίας αυτής, επιτυγχάνεται με την επανάληψη, για διάφορα επίπεδα διαθεσιμότητας νερού, μιας διαδικασίας τριών σταδίων, στα πλαίσια των οποίων επιλύονται μοντέλα γραμμικού και τετραγωνικού προγραμματισμού.

Μεταξύ των δεδομένων που χρησιμοποιούνται στη μέθοδο αυτή για την αποτίμηση της αξίας του νερού είναι και οι ανάγκες σε νερό των καλλιεργειών, οι οποίες μεταξύ άλλων εξαρτώνται και από κλιματικούς παράγοντες. Έτσι λοιπόν, διερευνήθηκε η επίδραση σεναρίων κλιματικών αλλαγών (IPCC, 2007), τόσο στις ανάγκες σε νερό των καλλιεργειών όσο και στην οικονομική αξία του αρδευτικού νερού. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από το μοντέλο γενικής κυκλοφορίας CGCM 3.1, από το Canadian Center for Climate Modelling and Analysis, για τα σεναρία SRES A2 και SRES B1 για την περίοδο 2020-2100 (Flato and Boer, 2001; IPCC, 2001; Kim et al., 2002, 2003). Στη συνέχεια για τον υποβιβασμό της κλίμακας σε τοπικό επίπεδο χρησιμοποιήθηκαν στατιστικές μέθοδοι και ειδικότερα γεννήτριες καιρού (Richardson and Wright, 1984; Semenov and Barrow, 1997; Γεωργίου, 2004).

Περιοχή μελέτης αποτέλεσε μία καλλιεργούμενη έκταση 244.000 στρεμμάτων στο Νομό Χαλκιδικής για την οποία υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα κατανομής καλλιεργειών, τεχνικοοικονομικών στοιχείων και κλιματικών δεδομένων. Έγινε εκτίμηση των αναγκών σε νερό άρδευσης των καλλιεργειών τόσο για την ιστορική περίοδο όσο και για την περίοδο των κλιματικών αλλαγών. Με την εφαρμογή του θετικού μαθηματικού προγραμματισμού, έγινε εξαγωγή της καμπύλης ζήτησης της περιοχής μελέτης, για το αρδευτικό νερό και προσδιορίστηκε η οικονομική του αξία και για τις δύο περιόδους.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1. ΕΞΑΓΩΓΗ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΖΗΤΗΣΗΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΤΟΥ ΘΕΤΙΚΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ

Μία από τις μεθοδολογίες εκτίμησης της οικονομικής αξίας του νερού είναι και αυτή της συνάρτησης ζήτησης του παραγωγού που χρησιμοποιεί το νερό ως παραγωγικό συντελεστή (*Producer's Demand Function Method*). Η μέθοδος αυτή συνίσταται στην εξαγωγή της καμπύλης ζήτησης, μιας καμπύλης δηλαδή που σε κάθε τιμή διαθέσιμης ποσότητας νερού, αντιστοιχίζει το μέγιστο οικονομικό αντίτιμο που θα ήταν διατεθειμένος ο παραγωγός να καταβάλει, για την προμήθεια μιας επιπλέον μονάδας νερού.

Στην εργασία αυτή ο προσδιορισμός της καμπύλης ζήτησης του παραγωγού, για την εκτίμηση της οικονομικής αξίας του νερού άρδευσης γίνεται με τη μέθοδο του θετικού μαθηματικού προγραμματισμού. Η μεθοδολογία του θετικού μαθηματικού προγραμματισμού (Howitt, 1995, 2005; Λιάπης, 2008) έχει αναπτυχθεί ως εναλλακτική των οικονομετρικών μεθόδων προκειμένου να δώσει λύση στις περιπτώσεις κατά τις οποίες, υπάρχει έλλειψη διαθέσιμων στοιχείων ή απαγορευτικό κόστος για τη συλλογή τους (Agudelo, 2001). Η δυνατότητα εξαγωγής της καμπύλης ζήτησης με τη χρήση μαθηματικού προγραμματισμού, προκύπτει από το γεγονός πως το προαναφερθέν μέγιστο οικονομικό αντίτιμο που θα ήταν διατεθειμένος να πληρώσει ο παραγωγός για μια επιπλέον μονάδα νερού αντιπροσωπεύει, επί της ουσίας, την αύξηση του κέρδους του, λόγω της μοναδιαίας αύξησης του χρησιμοποιούμενου νερού και ταυτίζεται με την έννοια που στη θεωρία του μαθηματικού προγραμματισμού είναι γνωστή ως *σκιώδης ή δυϊκή τιμή λ* (shadow or dual price) (Παπαρίζος, 1999). Η έννοια της σκιώδους τιμής συναντάται σ' ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης με χρήση μαθηματικού προγραμματισμού στο οποίο υπάρχει μια αντικειμενική συνάρτηση π.χ. το ακαθάριστο κέρδος ενός καλλιεργητικού σχεδίου, του οποίου η μεγιστοποίηση επιδιώκεται, υπό κάποιους περιορισμούς διαθεσιμότητας για έναν πόρο π.χ. νερό. Κατά την επίλυση του προβλήματος αυτού και την εφαρμογή της έννοιας των *πολλαπλασιαστών Lagrange*

(Lagrange multipliers), δίνοντας στον υπό περιορισμό πόρο (νερό) διάφορες εφικτές τιμές και υπολογίζοντας, κάθε φορά στο άριστο, την αντίστοιχη σκιάδη τιμή, δηλαδή τον πολλαπλασιαστή Lagrange, μπορεί κανείς να κατασκευάσει την καμπύλη ζήτησης για τον πόρο αυτό.

Η μέθοδος του θετικού μαθηματικού προγραμματισμού, που είχε χρησιμοποιηθεί για περισσότερα από οκτώ χρόνια πριν τη δημοσίευσή της από τον Howitt το 1995, αξιοποιεί ελάχιστα δεδομένα και χωρίς ενσωμάτωση πρόσθετων περιορισμών ευελιξίας, δημιουργεί αυτορυθμιζόμενα μοντέλα αγροτικής παραγωγής και χρήσης πόρων, συμβατά με τις αρχές της μικροοικονομικής θεωρίας (Howitt, 1995). Συγκεκριμένα, χρησιμοποιεί την κατανομή των εκτάσεων μεταξύ των καλλιεργειών, την οποία και θεωρεί αποτέλεσμα της διάθεσης του γεωργού για μεγιστοποίηση του κέρδους του, καταλήγοντας σε μη γραμμικά (ως επί το πλείστον τετραγωνικού προγραμματισμού) μοντέλα βελτιστοποίησης. Η χρήση μη γραμμικών όρων έχει σκοπό να «ενσωματώσει» όλους τους πραγματικούς περιορισμούς που υφίστανται και ο ερευνητής δεν είναι σε θέση να εξακριβώσει. Τα μοντέλα αυτά είναι περισσότερο ευέλικτα και ρεαλιστικά ως προς την ανταπόκρισή τους σε αλλαγές πολιτικής και συνθηκών γενικότερα. Συγκρινόμενη με το γραμμικό προγραμματισμό με περιορισμούς, η μεθοδολογία του θετικού μαθηματικού προγραμματισμού έχει δύο σαφή πλεονεκτήματα ως προς την ανταπόκριση του μοντέλου (Heckelei, 2002):

- δεν υπαγορεύεται από ασθενώς αιτιολογημένους περιορισμούς
- είναι ομαλότερη (αποφεύγοντας καμπύλες με μορφή τεθλασμένης γραμμής)

Η διαδικασία του θετικού μαθηματικού προγραμματισμού αποτελείται από τρία στάδια: (α) Το πρώτο στάδιο συνίσταται στη διατύπωση του μοντέλου μαθηματικού προγραμματισμού, με την προσθήκη στην ομάδα των εμπειρικών περιορισμών των χρησιμοποιούμενων πόρων, μιας ομάδας περιορισμών ρύθμισης που περιορίζουν τις δραστηριότητες στα παρατηρούμενα επίπεδα της περιόδου αναφοράς. (β) Το δεύτερο στάδιο συνίσταται στη χρησιμοποίηση των δυϊκών τιμών που εξάχθηκαν από την επίλυση του προβλήματος του πρώτου σταδίου, για να ορίσουμε τις παραμέτρους μιας μη γραμμικής αντικειμενικής συνάρτησης. (γ) Στο τρίτο στάδιο της διαδικασίας καταλήγουμε σ' ένα μη γραμμικό πρόβλημα μαθηματικού προγραμματισμού που μοιάζει με το αρχικό, με εξαίρεση τους περιορισμούς ρύθμισης που στη φάση αυτή δεν υφίστανται.

Παρακάτω θα παρουσιαστεί, σύμφωνα με τα προαναφερόμενα, η διαδικασία εφαρμογής της μεθοδολογίας του θετικού μαθηματικού προγραμματισμού σε ένα πρακτικό πρόβλημα βελτιστοποίησης του αγροτικού τομέα που σχετίζεται με την αποτίμηση της αξίας του αρδευτικού νερού.

Έστω ότι σε μια περιοχή μπορεί να καλλιεργηθεί ένα πλήθος καλλιεργειών για καθεμία από τις οποίες η έκταση συμβολίζεται X_j , y_j είναι η παραγωγή ανά μονάδα έκτασης, c_j το μεταβλητό κόστος ανά μονάδα έκτασης, p_j η τιμή του προϊόντος και $j=1,2,\dots,n$, όπου n είναι ο συνολικός αριθμός των καλλιεργειών. Αν υποθεθεί πως η συνολικώς καλλιεργούμενη έκταση στην περιοχή αυτή δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερη από X_{total} και πως η χρησιμοποιούμενη ποσότητα ενός συντελεστή παραγωγής των καλλιεργειών (π.χ. του νερού) δε μπορεί να είναι μεγαλύτερη από A_{total} και A_j οι ανάγκες σε νερό της κάθε καλλιέργειας, τότε το πρόβλημα βελτιστοποίησης είναι το εξής:

$$\max \sum_{j=1}^n (p_j y_j - c_j) X_j \quad (2.1)$$

με περιορισμούς:

$$\sum_{j=1}^n X_j \leq X_{\text{total}} \quad (2.2)$$

$$\sum_{j=1}^n A_j X_j \leq A_{\text{total}} \quad (2.3)$$

$$X_j \geq 0 \quad (2.4)$$

Αν στην περιοχή αυτή καλλιεργήθηκαν n τέτοιες καλλιέργειες, σε έκταση X_{j_0} η καθεμιά, τότε κατά την εφαρμογή της διαδικασίας του θετικού μαθηματικού προγραμματισμού στο παραπάνω πρόβλημα βελτιστοποίησης, προστίθεται ο εξής περιορισμός:

$$X_j \leq X_{j_0} + \varepsilon \quad (2.5)$$

όπου ε είναι μικροί θετικοί αριθμοί για να εμποδιστεί η γραμμική εξάρτηση μεταξύ πραγματικού περιορισμού και περιορισμών ρύθμισης.

Έτσι εξάγονται, για κάθε καλλιέργεια, οι σκιάδεις τιμές λ_j που αφορούν στους περιορισμούς ρύθμισης. Στη δεύτερη φάση της διαδικασίας, με τη χρήση των προαναφερόμενων σκιαδών τιμών βρίσκονται οι συντελεστές της αντικειμενικής συνάρτησης του μαθηματικού μοντέλου που θα επιλυθεί στην τρίτη φάση της διαδικασίας. Συγκεκριμένα για κάθε λ_j εξάγονται οι συντελεστές:

$$\delta_j = \frac{\lambda_j}{p_j X_{j_0}} \quad (2.6)$$

$$\beta_j = y_j + \delta_j X_{j_0} \quad (2.7)$$

Στην τρίτη και τελευταία φάση της διαδικασίας λύνεται το παρακάτω ρυθμισμένο μοντέλο, του οποίου η αντικειμενική συνάρτηση είναι 2^{ου} βαθμού (τετραγωνικός μαθηματικός προγραμματισμός):

$$\max \sum_{j=1}^n [p_j (\beta_j - \delta_j X_j) - c_j] X_j \quad (2.8)$$

με περιορισμούς:

$$\sum_{j=1}^n X_j \leq X_{\text{total}} \quad (2.9)$$

$$\sum_{j=1}^n A_j X_j \leq A_{\text{total}} \quad (2.10)$$

$$X_j \geq 0 \quad (2.11)$$

Το παραπάνω πρόβλημα βελτιστοποίησης είναι πρόβλημα μη γραμμικού προγραμματισμού, που μπορεί να επιλυθεί με το πρόγραμμα Lingo (Lindo Systems, 2003) για διάφορες τιμές της συνολικά διαθέσιμης ποσότητας νερού A_{total} . Κατά την επίλυσή του, για κάθε τιμή περιορισμού του νερού A_{total} , προκύπτει μια σκιάδης τιμή λ που αντιπροσωπεύει τη μεταβολή της αντικειμενικής συνάρτησης (2.8) κατά την αύξηση της διαθέσιμης ποσότητας νερού κατά μια επιπλέον μονάδα, δηλαδή την

οικονομική αξία του νερού σε σχέση με το επίπεδο διαθεσιμότητάς του (A_{total}). Τα ζεύγη τιμών (λ , A_{total}) που προκύπτουν από τη διαδοχική επίλυση του προβλήματος για διάφορες τιμές A_{total} , δίνουν την καμπύλη ζήτησης του νερού άρδευσης.

2.2. ΣΕΝΑΡΙΑ ΚΛΙΜΑΤΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΩΝ

Οι κλιματικές αλλαγές αποτέλεσαν και αποτελούν αντικείμενο πολλών ερευνητών. Η ισχυρότερη ένδειξη κλιματικών αλλαγών είναι η μεταβολή της θερμοκρασίας του πλανήτη κατά τον 20^ο αιώνα, η οποία σύμφωνα με την έκθεση αξιολόγησης από τη Διακυβερνητική Επιτροπή για την Αλλαγή του Κλίματος (IPCC, 2007), η παγκόσμια θερμοκρασία της επιφάνειας του πλανήτη αυξήθηκε κατά 0.74 ± 0.18 °C, όταν υπολογίζεται με γραμμική τάση κατά τα τελευταία 100 χρόνια (1906-2005). Αιτίες για την αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη είναι οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και ειδικότερα διοξειδίου του άνθρακα CO₂. Για το λόγο αυτό, για τη μελέτη του κλίματος στο μέλλον κατασκευάστηκαν διάφορα σενάρια εκπομπών αερίων που είναι γνωστά ως SRES (Special Report on Emissions Scenarios) (IPCC, 2000) και βασίζονται σε διάφορες μελλοντικές υποθέσεις που αφορούν τον πληθυσμό, τη βιομηχανική παραγωγή, την τεχνολογία κ.λπ.. Τα σενάρια εκπομπών SRES τα οποία μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία είναι το A2 και το B1. Το σενάριο SRES A2 είναι ένα ενδιάμεσο σενάριο εκπομπών ενώ το SRES B1 είναι ένα χαμηλό σενάριο εκπομπών.

Τα σενάρια εκπομπών χρησιμοποιούνται σε διάφορα κλιματικά μοντέλα γνωστά και ως Μοντέλα Γενικής Κυκλοφορίας (General Circulation Models – GCMs) για να προσομοιώνουν τις κλιματικές μεταβολές στην ατμόσφαιρα και στους ωκεανούς. Ένα βασικό μειονέκτημα των μοντέλων γενικής κυκλοφορίας είναι ότι παρέχουν δεδομένα ανάλογα με τη διακριτική τους ικανότητα σε μεγάλες κλίμακες (μέχρι μερικές εκατοντάδες χιλιόμετρα) και επομένως δεν μπορούν να αποτυπώσουν κλιματικές επιδράσεις σε κλίμακες μικρότερες του κελιού. Παρόλα αυτά τα δεδομένα από τα GCM αποτελούν το σημείο αφετηρίας για οποιαδήποτε τεχνική χωρικής διακριτοποίησης, που αποβλέπει σε εκτίμηση των επιδράσεων των κλιματικών αλλαγών σε τοπικό επίπεδο. Για να επιτευχθεί αυτό αναπτύχθηκαν διάφορες μέθοδοι υποβιβασμού κλίμακας (downscaling methods), οι οποίες αποτελούν ουσιαστικά μία μετάβαση από τη μεγάλη κλίμακα των GCM σε μικρότερη τοπική κλίμακα (Hewitson and Crane, 1996). Οι μέθοδοι υποβιβασμού κλίμακας χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες (Τολικά, 2006): (α) Τις εμπειρικές - στατιστικές και (β) Των μοντέλων περιοχικής – τοπικής κλίμακας ή δυναμικού υποβιβασμού κλίμακας. Στην κατηγορία των εμπειρικών – στατιστικών μεθόδων ανήκουν οι εμπειρικές συναρτήσεις μετάβασης, η συνοπτική προσέγγιση και οι γεννήτριες καιρού (weather generators) (Richardson and Wright, 1984; Semenov and Barrow, 1997; Γεωργίου, 2004; Georgiou and Papamichail, 2008) που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία.

Οι γεννήτριες καιρού είναι στατιστικά μοντέλα, για την προσομοίωση και τη στοχαστική παραγωγή συνθετικών σειρών μετεωρολογικών μεταβλητών. Σύμφωνα με τη μέθοδο υποβιβασμού κλίμακας αυτής της κατηγορίας, από ένα μοντέλο γενικής κυκλοφορίας, παίρνονται δεδομένα για μία περίοδο βάσης (π.χ. 1960-2000) και για μια περίοδο κλιματικής αλλαγής (π.χ. 2070-2100). Για τις διάφορες κλιματικές παραμέτρους (θερμοκρασία, βροχόπτωση κ.λπ.) υπολογίζεται η μεταβολή που επέρχεται ανάμεσα στην περίοδο βάσης και την περίοδο της κλιματικής αλλαγής. Στη συνέχεια με βάση αυτή τη μεταβολή, διαταράσσεται η ιστορική σειρά των δεδομένων της περιοχής ενδιαφέροντός μας. Η διαταραγμένη πλέον ιστορική σειρά χρησιμοποιείται στις γεννήτριες καιρού για την παραγωγή συνθετικών σειρών

οποιασδήποτε διάρκειας, οι οποίες διατηρούν τα στατιστικά χαρακτηριστικά της ιστορικής σειράς και αποτυπώνουν την μελλοντική μεταβολή των διαφόρων κλιματικών παραμέτρων. Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι τα στοχαστικά μοντέλα δεν είναι εργαλεία πρόγνωσης καιρού αλλά διαδικασίες δημιουργίας συνθετικών σειρών κλιματικών παραμέτρων, οι οποίες διατηρούν τα στατιστικά χαρακτηριστικά των ιστορικών σειρών μετά τη διατάραξή τους και χρησιμοποιούνται ευρέως στην παραγωγή χρονικών σειρών κλιματικών παραμέτρων, για μελλοντικά σενάρια κλιματικών αλλαγών (Semenov and Barrow, 1997).

Οι απαραίτητες κλιματικές παράμετροι για τον υπολογισμό των αναγκών σε νερό των καλλιεργειών είναι η θερμοκρασία, η ηλιακή ακτινοβολία, η ταχύτητα ανέμου, η σχετική υγρασία και η βροχόπτωση. Οι τέσσερις πρώτες παράμετροι χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς που στην παρούσα εργασία έγινε με τη μέθοδο FAO Penman – Monteith (Allen et al., 1998). Η στοχαστική προσομοίωση και η παραγωγή συνθετικών σειρών ημερήσιας βροχόπτωσης, γίνεται σε δύο βήματα. Στο πρώτο βήμα, γίνεται προσομοίωση και παραγωγή της επισύμβασης της βροχόπτωσης, χρησιμοποιώντας μοντέλα διακριτής επισύμβασης, που βασίζονται στις αλυσίδες Markov. Η παραγωγή συνθετικών σειρών υγρών και ξηρών ημερών γίνεται με τη βοήθεια παραγωγής τυχαίων αριθμών ομοιόμορφης κατανομής και των πιθανοτήτων μετάβασης. Στο δεύτερο βήμα, γίνεται ο υπολογισμός του ύψους βροχόπτωσης των υγρών ημερών με τη βοήθεια της Γάμμα κατανομής, η οποία αναπαριστά την κατανομή συχνότητας των ημερήσιων υψών βροχής. Η συνθετική παραγωγή της θερμοκρασίας και της ακτινοβολίας γίνεται με ταυτόχρονη παραγωγή τους, αφού θεωρούνται αλληλοεξαρτώμενες στοχαστικές μεταβλητές, με ένα πρώτης τάξης μοντέλο αυτοσυσχέτισης. Τέλος, η συνθετική παραγωγή σχετικής υγρασίας και ταχύτητας ανέμου, γίνεται με την προσαρμογή της κατανομής Γάμμα και την παραγωγή τυχαίων αριθμών. Λεπτομέρειες για τις παραπάνω διαδικασίες μπορεί να βρει κανείς στις εργασίες Γεωργίου (2004) και Γεωργίου και Παπαμιχαήλ (2006).

Στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκαν ημερήσια δεδομένα από το μοντέλο γενικής κυκλοφορίας T63 CGCM 3.1, από το Canadian Center for Climate Modelling and Analysis, για τα σενάρια SRES A2 και SRES B1 (Flato and Boer, 2001; IPCC, 2001; Kim et al., 2002, 2003). Η χωρική διακριτότητα της έκδοσης T63 του CGCM 3.1, είναι 2.8° μήκος/πλάτος και έχει 31 επίπεδα στην ατμόσφαιρα. Ως περίοδος βάσης χρησιμοποιήθηκε η περίοδος 1961-2000, ενώ περίοδος κλιματικών αλλαγών η περίοδος 2020—2100. Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν αφορούσαν τη θερμοκρασία, την ηλιακή ακτινοβολία, την ταχύτητα ανέμου, τη σχετική υγρασία και τη βροχόπτωση.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Η περιοχή μελέτης περιλαμβάνει τις κτηματικές εκτάσεις των Δ.Δ. Αγίου Μάμα, Αγίου Παντελεήμονα, Διονυσίου, Ζωγράφου, Πορταριάς, Σημάντρων, Φλογητών και Ν. Μουδανιών του τέως καποδιστριακού Δήμου Μουδανιών, των Δ.Δ. Ν. Πλαγίων, Ν. Τενέδου και Ν. Τρίγλιας του τέως καποδιστριακού Δήμου Τρίγλιας και των Δ.Δ. Ολύμθου και Πολυγύρου του τέως καποδιστριακού Δήμου Πολυγύρου. Οι μέγιστες απολήψιμες ποσότητες επιφανειακών και υπόγειων νερών εκτιμώνται σε 35 εκ. m³.

Η συνολική καλλιεργούμενη έκταση της περιοχής μελέτης για το έτος 2004, βάσει στοιχείων απογραφής της Διεύθυνσης Γεωργίας Χαλκιδικής, είναι 244.030 στρέμματα και οι καλλιέργειες που κυριαρχούν είναι σιτάρι, ελιές, βερικοκιές, φυσιτικές κ. άλ. καλλιέργειες (Λιάπης, 2008). Ο συνολικός αριθμός των καλλιεργειών είναι 40 και οι καθαρές σε νερό άρδευσης ανάγκες υπολογίστηκαν με την εφαρμογή της

μεθόδου FAO Penman-Monteith (Allen et al., 1998) για την εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς με ημερήσια κλιματικά δεδομένα του σταθμού του Αγίου Μάμα, τη χρησιμοποίηση των αντίστοιχων φυτικών συντελεστών (Allen et al., 1998; Παπαζαφειρίου, 1999) μερικοί από τους οποίους είναι προσαρμοσμένοι στις ελληνικές συνθήκες και λαμβάνοντας υπόψη και την ωφέλιμη βροχόπτωση (Γεωργίου, 2004). Οι ολικές σε νερό άρδευσης ανάγκες υπολογίστηκαν με τη βοήθεια της αρδευτικής αποδοτικότητας, η οποία πάρθηκε ίση με 0.85.

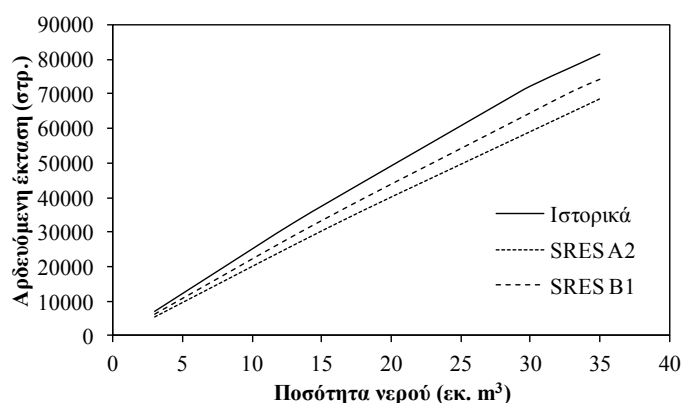
Οι καθαρές και ολικές σε νερό άρδευσης ανάγκες των καλλιεργειών υπολογίστηκαν τόσο για την ιστορική περίοδο για την οποία υπήρχαν κλιματικά δεδομένα όσο και για δύο σενάρια κλιματικών αλλαγών. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν ημερήσια στοιχεία από το μοντέλο γενικής κυκλοφορίας CGCM 3.1 σε σημείο (grid) που ήταν κοντύτερα προς την περιοχή μελέτης. Συγκεκριμένα ο σταθμός του Αγ. Μάμα έχει συντεταγμένες 40°15' N και 23°20' E ενώ οι συντεταγμένες από το CGCM είναι 40°28' N και 22°30' E. Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν αφορούσαν τη θερμοκρασία, την ηλιακή ακτινοβολία, την ταχύτητα ανέμου, τη σχετική υγρασία και τη βροχόπτωση και ως περίοδος βάσης πάρθηκε η περίοδος 1961-2000 και ως περίοδος κλιματικών αλλαγών η περίοδος 2020—2100. Τέλος, τα στοιχεία αφορούσαν δύο σενάρια κλιματικών αλλαγών: SRES A2 και SRES B1. Στη συνέχεια, έγινε υποβιβασμός κλίμακας των δεδομένων του μοντέλου γενικής κυκλοφορίας με τις διαδικασίες που περιγράφηκαν στην Παράγραφο 2.2. Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων προέκυψε ότι η θερμοκρασία σύμφωνα με το σενάριο SRES A2 θα αυξηθεί κατά 3.1 °C, ενώ σύμφωνα με το σενάριο SRES B1 θα αυξηθεί κατά 2.0 °C. Επίσης, η βροχόπτωση θα μειωθεί σε ετήσια βάση κατά 12.5% στο σενάριο SRES A2, ενώ στο σενάριο SRES B1 κατά 3%. Τέλος, η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς θα αυξηθεί κατά 13.5% στο σενάριο SRES A2 και 7.6% στο σενάριο SRES B1.

Για την επίλυση του προβλήματος απαιτείται η γνώση του μεταβλητού κόστους που περιλαμβάνει τις δαπάνες για σπόρους ή φυτάρια μεταφύτευσης, λιπάσματα, γεωργικά φάρμακα, ανθρώπινη εργασία, χρήση ξένων μηχανημάτων, έξοδα άρδευσης, έξοδα εμπορίας κ.λπ. Επίσης απαιτείται η γνώση της τιμής των προϊόντων όπως επίσης και η παραγωγή ανά μονάδα επιφάνειας για κάθε καλλιέργεια. Όλοι οι παραπάνω δείκτες πάρθηκαν από την Περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας και αφορούν την ευρύτερη περιοχή. Σε προσωπική επικοινωνία με γεωργούς της περιοχής μελέτης, διαπιστώθηκε ότι τα στοιχεία αυτά ανταποκρίνονται σε ικανοποιητικό βαθμό στις ιδιαίτερες συνθήκες της περιοχής αυτής και θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Να σημειωθεί ότι οι παραπάνω δείκτες θεωρήθηκαν οι ίδιοι τόσο για την ιστορική περίοδο, όσο και για την περίοδο των κλιματικών αλλαγών. Η κατασκευή του μοντέλου του θετικού μαθηματικού προγραμματισμού βασίστηκε στην παραδοχή της επιδίωξης του παραγωγού να μεγιστοποιήσει το κέρδος του, σε συνδυασμό με τους περιορισμούς και τις ιδιαίτερες συνθήκες που έχει να αντιμετωπίσει στην προσπάθειά του αυτή.

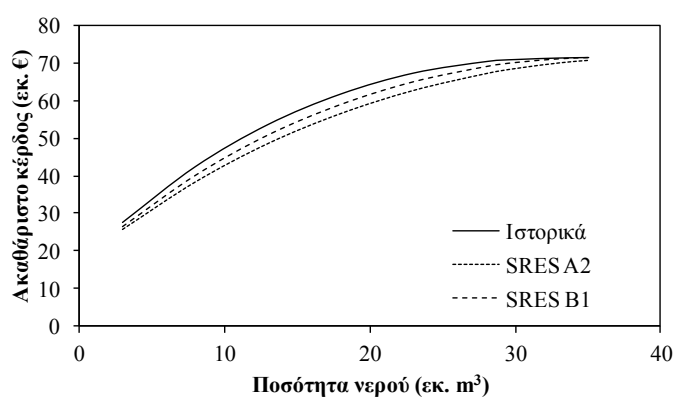
Με βάση τα στοιχεία αυτά και με την εφαρμογή της μεθόδου του θετικού μαθηματικού προγραμματισμού κατέστη δυνατή η εξαγωγή των καμπυλών ζήτησης του αρδευτικού νερού τόσο για την ιστορική περίοδο όσο και για τα δύο σενάρια των κλιματικών αλλαγών. Κατά τη διαδοχική επίλυση του προβλήματος μεγιστοποίησης του ακαθάριστου κέρδους της παραγωγικής δραστηριότητας για επίπεδα διαθεσιμότητας νερού που κυμαίνονταν από 3 ως 35 εκ. m³ νερού, πέραν του προσδιορισμού της καμπύλης ζήτησης του αρδευτικού νερού, προέκυψαν επιπλέον αποτελέσματα που κρίνεται σκόπιμο να παρουσιαστούν, συγκριτικά, για τις τρεις προαναφερθείσες περιπτώσεις.

Στο Σχήμα 1 φαίνεται η συνολική αρδευόμενη έκταση για τα διάφορα επίπεδα διαθεσιμότητας νερού, από όπου προκύπτει ότι για την ιστορική περίοδο είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τα δύο σενάρια κλιματικών αλλαγών. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι οι ανάγκες σε νερό των καλλιεργειών είναι μικρότερες για την ιστορική περίοδο, ενώ αντίθετα μεγαλύτερες κατά την περίοδο των κλιματικών αλλαγών. Επιπλέον, για το σενάριο SRES A2 προκύπτει η μικρότερη συνολική αρδευόμενη έκταση επειδή αντιστοιχεί σε μεγαλύτερες εκπομπές σε σχέση με το σενάριο SRES B1 και κατά συνέπεια διαμορφώνει μεγαλύτερες σε νερό ανάγκες των καλλιεργειών.

Στο Σχήμα 2 φαίνεται το συνολικό ακαθάριστο κέρδος τόσο για την ιστορική περίοδο όσο και τα δύο σενάρια (SRES A2, SRES B1) κλιματικών αλλαγών. Από το Σχήμα 2 προκύπτει ότι το συνολικό ακαθάριστο κέρδος είναι, σε κάθε επίπεδο διαθεσιμότητας νερού, μεγαλύτερο για την ιστορική περίοδο και μικρότερο για τα δύο σενάρια κλιματικών αλλαγών. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι οι αυξημένες ανάγκες σε νερό άρδευσης (SRES A2, SRES B1), οδηγούν σε μικρότερες αρδευόμενες εκτάσεις και επομένως μικρότερο ακαθάριστο κέρδος.



Σχήμα 1. Αρδευόμενη έκταση για διάφορα επίπεδα διαθεσιμότητας νερού στην περιοχή μελέτης, για την ιστορική περίοδο και τα δύο σενάρια (SRES A2, SRES B1) κλιματικών αλλαγών.

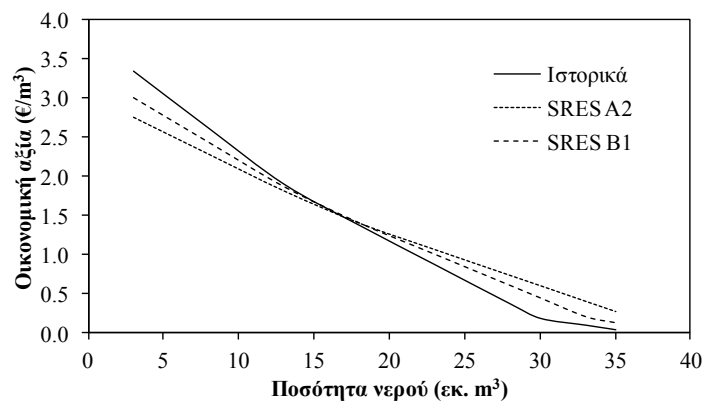


Σχήμα 2. Συνολικό ακαθάριστο κέρδος για την ιστορική περίοδο και τα δύο σενάρια (SRES A2, SRES B1) κλιματικών αλλαγών.

Επηρεάζοντας την έκταση των καλλιεργειών, τη σύνθεση του καλλιεργητικού σχεδίου και το παραγόμενο ακαθάριστο κέρδος, τα σενάρια κλιματικών αλλαγών οδηγούν και σε διαφορετικά αποτελέσματα ως προς την οικονομική αξία του νερού

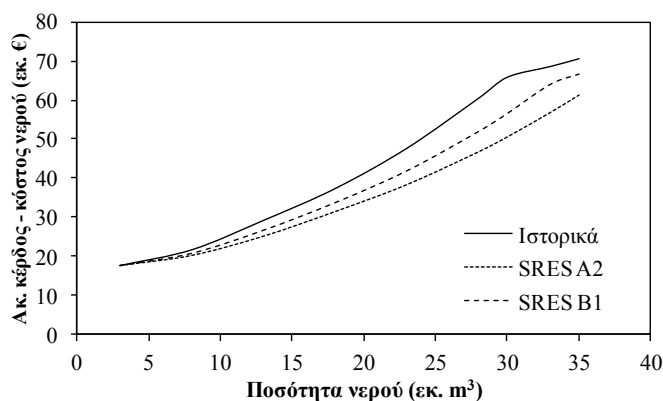
άρδευσης, όπως αυτή προκύπτει από την εξαγόμενη καμπύλη ζήτησης. Στο Σχήμα 3 φαίνεται η καμπύλη ζήτησης του νερού άρδευσης και για τρεις χρονικές περιόδους.

Όπως προκύπτει από το Σχήμα 3, η οικονομική αξία του νερού, για την ιστορική περίοδο, κυμαίνεται από 3.35 €/m³ για διαθεσιμότητα νερού 3 εκ. m³ μέχρι 0.03 €/m³ για διαθεσιμότητα νερού 35 εκ. m³. Επίσης, από το Σχήμα 3 προκύπτει ότι για την ιστορική σειρά η αξία του νερού είναι μεγαλύτερη σε σχέση με αυτή των δύο σεναρίων κλιματικών αλλαγών σε χαμηλές διαθεσιμότητες νερού (3-15 εκ. m³) ενώ αντίθετα σε υψηλές διαθεσιμότητες νερού (15-35 εκ. m³) η αξία είναι χαμηλότερη. Η ίδια συμπεριφορά ακολουθείται και στην περίπτωση του σεναρίου SRES B1 σε σχέση με το σενάριο SRES A2. Η ερμηνεία αυτών των αποτελεσμάτων συσχετισμών απαιτεί μια ανάλυση στη βάση των όσων προαναφέρθηκαν στην Παράγραφο 2.1. Πρέπει καταρχήν να τονισθεί ότι για κάθε επίπεδο διαθεσιμότητας νερού, η προκύπτουσα μέσω της καμπύλης ζήτησης, οικονομική του αξία είναι στην ουσία το ακαθάριστο κέρδος που θα μας έδινε η χρήση μιας επιπλέον μονάδας νερού. Κατά τη διαδοχική επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης, αυξανόμενης της διαθεσιμότητας νερού προστίθενται στο καλλιεργητικό σχέδιο νέες εκτάσεις καλλιεργειών με οικονομική αποδοτικότητα χρήσης του νερού (δηλαδή παραγόμενο ακαθάριστο κέρδος ανά μονάδα χρησιμοποιούμενου νερού) ίση ή μικρότερη των ήδη υπαρχουσών.



Σχήμα 3. Καμπύλη ζήτησης νερού άρδευσης στην περιοχή μελέτης για την ιστορική περίοδο και τα δύο σεναρία (SRES A2, SRES B1) κλιματικών αλλαγών.

Σε πολύ χαμηλά επίπεδα διαθεσιμότητας νερού (3-15 εκ. m³) οι συνολικά καλλιεργούμενες - αρδευόμενες εκτάσεις είναι πολύ λίγες και απαρτίζονται από τις καλλιέργειες με τη μεγαλύτερη δυνατή οικονομική αποδοτικότητα χρήσης του νερού οπότε είναι λογικό η προσδιοριζόμενη οικονομική αξία του νερού να είναι σε υψηλά επίπεδα. Στην περίπτωση βέβαια των κλιματικών σεναρίων, η οικονομική αξία του νερού είναι μικρότερη, επειδή για την ίδια καλλιέργεια απαιτείται μεγαλύτερη ποσότητα νερού για να επιτευχθεί το ίδιο ακαθάριστο κέρδος. Αντίθετα, αυξανόμενης της διαθεσιμότητας νερού (15-35 εκ. m³), οι καλλιεργούμενες εκτάσεις γίνονται ολοένα και περισσότερες και απαρτίζονται από μεγαλύτερη ποικιλία καλλιεργειών. Οι καλλιέργειες που εισάγονται στο καλλιεργητικό σχέδιο έχουν μικρότερη οικονομική αποδοτικότητα χρήσης του νερού, οπότε η προσδιοριζόμενη οικονομική αξία του νερού εμφανίζεται συνεχώς μειούμενη. Στην περίπτωση των κλιματικών σεναρίων, η οικονομική αξία του νερού είναι μεγαλύτερη της αντίστοιχης της ιστορικής περιόδου εξαιτίας του ότι στα σεναρία αυτά έχουμε μεγαλύτερες ανάγκες σε νερό και δεν έχουν εισαχθεί στον ίδιο βαθμό, επιπλέον καλλιέργειες, με σημαντικά μικρότερη οικονομική αποδοτικότητα χρήσης του νερού.



Σχήμα 4. Συνολικό ακαθάριστο κέρδος πλην κόστος νερού άρδευσης τόσο για την ιστορική περίοδο όσο και τα δύο σενάρια (SRES A2, SRES B1) κλιματικών αλλαγών.

Η προσδιοριζόμενη οικονομική αξία του νερού άρδευσης αποτελεί γνώμονα για την ορθολογική τιμολόγησή του. Για την ακρίβεια, η αξία αυτή θέτει το μέγιστο όριο μέχρι το οποίο θα μπορούσε να κυμαίνεται η τιμή του. Η τιμολόγηση του νερού άρδευσης συνεπάγεται, βέβαια, ένα κόστος χρήσης νερού που μειώνει το ακαθάριστο κέρδος της γεωργικής παραγωγής. Στο Σχήμα 4 φαίνεται, τόσο για την ιστορική περίοδο όσο και για τα δύο σενάρια (SRES A2, SRES B1) κλιματικών αλλαγών, το συνολικό κέρδος που προκύπτει αν από το ακαθάριστο κέρδος αφαιρεθεί το κόστος του νερού άρδευσης, εφόσον η τιμή του ισούται με την προσδιοριζόμενη αξία του. Από το Σχήμα 4 προκύπτει ότι το συνολικό αυτό κέρδος είναι μεγαλύτερο για την ιστορική περίοδο και μικρότερο για τα δύο σενάρια κλιματικών αλλαγών στα διάφορα επίπεδα διαθεσιμότητας νερού. Οι εμφανιζόμενες διαφορές μάλιστα είναι, σε γενικές γραμμές, μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες του ακαθάριστου κέρδους (Σχήμα 2) γεγονός που καταδεικνύει τη μεγάλη οικονομική σημασία που αποκτά, η επίδραση των κλιματικών αλλαγών στην οικονομική του αξία κατά την τιμολόγηση του νερού άρδευσης.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή για την οικονομική αποτίμηση της αξίας του αρδευτικού νερού χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της καμπύλης ζήτησης του παραγωγού. Η εξαγωγή της καμπύλης ζήτησης επιτεύχθηκε με τη χρήση της συνάρτησης παραγωγής και την εφαρμογή του θετικού μαθηματικού προγραμματισμού ενώ περιοχή μελέτης αποτέλεσε μια καλλιεργούμενη έκταση στους Δήμους Πολυγύρου, Μουδανιών και Τρίγλιας του Ν. Χαλκιδικής. Διερευνήθηκε, η επίδραση των κλιματικών αλλαγών στην οικονομική αξία του νερού άρδευσης. Από τα εξαγόμενα αποτελέσματα, προέκυψαν τα εξής: (α) Αυξανόμενων των διαθέσιμων υδατικών αποθεμάτων μειώνεται η οικονομική αξία του νερού άρδευσης, (β) Οι κλιματικές αλλαγές επιδρούν στην οικονομική αξία του νερού άρδευσης με τρόπο που εξαρτάται από το επίπεδο διαθεσιμότητάς του και (γ) Οι κλιματικές αλλαγές, αυξάνοντας τις ανάγκες σε νερό των καλλιεργειών, επιδρούν, σ' ένα περιβάλλον μειωμένης διαθεσιμότητας υδατικών πόρων, αρνητικά στα κέρδη της γεωργικής παραγωγής, ιδιαίτερα μάλιστα όταν εφαρμοστεί κάποια τιμολογιακή πολιτική βασισμένη στην προσδιοριζόμενη, βάσει της καμπύλης ζήτησης του παραγωγού, οικονομικής αξίας του νερού άρδευσης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Agudelo, J.I., 2001. *The economic valuation of water, principles and methods*. Value of Water Research Report Series No.5, IHE Delft.

- Flato, G.M. and Boer, G.J., 2001. *Warming asymmetry in climate change simulations*. Geophysical Research Letters, 28: 195-198.
- Georgiou, P.E. and Papamichail, D.M., 2008. *Optimization model of an irrigation reservoir for water allocation and crop planning under various weather conditions*. Irrigation Science, 26: 487-504.
- Heckelej, T., 2002. *Calibration and estimation of programming models for agricultural supply analysis*. Habilitationsschrift, Bonn.
- Hewitson, B.C. and Crane, R.G., 1996. *Climate downscaling: techniques and application*. Climate Research, 7: 85-95.
- Howitt, R.E., 1995. *Positive mathematical programming*. American Journal of Agricultural Economics, 77: 329-342.
- Howitt, R.E., 2005. *Paper prepared for presentation at the PMP, Extensions and Alternative Methods*. Organised Session of the XIth EAAE Congress, Denmark.
- IPCC, 2000. *Special Report on Emissions Scenarios*. Nebojsa Nakicenovic and Rob Swart (eds.), Cambridge University Press, 570 pp.
- IPCC, 2001. *Climate Change 2001: The scientific basis*. J.T. Houghton et al. (eds.), Cambridge University Press, 881 p.
- IPCC, 2007. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. M.L. Parry et al. (eds.), Cambridge University Press, 976pp.
- Kim, S.J., Flato, G.M. and Boer, G.J. 2003. *A coupled climate model simulation of the Last Glacial Maximum, Part 2: approach to equilibrium*. Climate Dynamics, 20: 635-661.
- Kim, S.J., Flato, G.M., Boer, G.J. and McFarlane, N.A., 2002. *A coupled climate model simulation of the Last Glacial Maximum, Part 1: transient multi-decadal response*. Climate Dynamics, 19: 515-537.
- Latinopoulos, D., 2005. *Derivation of irrigation water demand functions through linear and non-linear optimisation models: application to an intensively irrigated area in northern Greece*. Water Supply, 5(6): 75-84.
- Lindo Systems Inc., 2003. *LINGO : the modeling language and optimizer*.
- Richardson, C.W. and Wright, D.A., 1984. *WGEN: A model for generating daily weather variables*. USDA Agriculture Research Service.
- Semenov, M.A. and Barrow, E.M., 1997. *Use of a stochastic weather generator in the development of climate change scenarios*. Climatic Change, 35: 397-414.
- Taylor, R.G. and Young, R.A., 1995. *Rural-to-urban transfers: Measuring direct foregone benefits of irrigation water under uncertain water supplies*. Journal of Agricultural and Resource Economy, 20(2): 247-262.
- Tsur, Y., Roe, T., Doukkali, R. and Dinar, A., 2004. *Pricing irrigation water. Principles and cases from developing countries*. Res. for the future, Washington, DC, 319 p.
- Young, R.A. 2005. *Determining the economic value of water, Concepts and methods. Resources for the future*. Washington, DC, USA, 357 p.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith. M., 1998. *Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, FAO, Rome, 300 p.
- Γεωργίου, Π.Ε. και Παπαμιχαήλ, Δ.Μ., 2006. *Στοχαστική παραγωγή ημερήσιων κλιματικών παραμέτρων και καμπύλες συχνότητας εξατμισοδιαπνοής αναφοράς*. Υδροτεχνικά, 16: 5-20.
- Γεωργίου, Π.Ε., 2004. *Βελτιστοποίηση λειτουργίας ταμιευτήρων για αρδευτικούς σκοπούς*. Διδακτορική Διατριβή, Γεωπονική Σχολή Α.Π.Θ., 341 σελ.

- Λιάπης, Α.Γ., 2008. *Ορθολογική διαχείριση του αρδευτικού νερού και κοστολόγησή του με χρήση μαθηματικού προγραμματισμού*. Μεταπτυχιακή Διατριβή, Γεωπονική Α.Π.Θ., 307 σελ.
- Λιάπης, Α.Γ., Γεωργίου, Π.Ε. και Παπαμιχαήλ, Δ.Μ., 2009. *Κοστολόγηση αρδευτικού νερού με τη μέθοδο συνάρτησης ζήτησης και τη χρήση γραμμικού προγραμματισμού*. Πρακτικά 6^ο Εθνικού Συνεδρίου Γεωργικής Μηχανικής, Θεσσαλονίκη, 367-374.
- Παπαζαφειρίου, Ζ.Γ., 1999. *Οι ανάγκες σε νερό των καλλιεργειών*. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
- Παπαμιχαήλ, Δ.Μ. και Γεωργίου, Π.Ε., 2008. *Βέλτιστη χρήση νερού στη γεωργία*. Πρακτικά συνεδρίου «Προστασία, αποκατάσταση και βιώσιμη ανάπτυξη του φυσικού και πολιτιστικού περιβάλλοντος στην Ευρώπη», Δράση Jean Monnet, 387-410.
- Παπαρίζος, Κ., 1999. *Στοιχεία επιχειρησιακής έρευνας*. Πανεπιστημιακές Παραδόσεις, Πανεπιστήμιο Μακεδονίας, Θεσσαλονίκη.
- Τολίκα, Κ., 2006. *Εκτιμώμενες κλιματικές αλλαγές στον Ελληνικό χώρο κατά τη διάρκεια του 21^{ου} αιώνα με τη χρήση κλιματικών μοντέλων*. Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., 222 σελ.

**ΑΚΡΙΒΗΣ ΧΩΡΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΣΕ ΕΠΙΠΕΔΟ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΟΔΟΥ
ΤΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΝΕΡΟΥ ΣΤΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΔΙΚΤΥΩΝ ΥΔΡΕΥΣΗΣ**

Β. Κανακούδης, Κ. Γκονέλας

Εργαστήριο Υδρομηχανικής & Περιβαλλοντικής Τεχνικής, Τμήμα
Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Πεδίον Άρεως, Βόλος

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία παρατίθεται η σημασία της ορθής χωρικής και χρονικής κατανομής της κατανάλωσης στα μοντέλα προσομοίωσης της υδραυλικής λειτουργίας δικτύων ύδρευσης, όπως και οι απώλειες νερού σε αυτά ως ξεχωριστή ανοιγμένη κατανάλωση. Στη συνέχεια καταγράφεται μια νέα μέθοδος χωρικής κατανομής της κατανάλωσης σε επίπεδο αναφοράς οδού, με σημαντικά αποτελέσματα στη σχέση κόστους – οφέλους. Παρουσιάζεται η διαδικασία και τα προβλήματα που προέκυψαν κατά την υδραυλική προσομοίωση και επίλυση του δικτύου ύδρευσης της ΔΕΥΑΚΩ. Τέλος παρατίθεται η σύγκριση της νέας μεθόδου χωρικής κατανομής, με την αντίστοιχη των πολυγώνων Thiessen, και τα αποτελέσματα των μετρήσεων πεδίου που ακολούθησαν και επισημαίνονται τα συγκεντρωτικά συμπεράσματα.

**ACTUAL SPATIAL ALLOCATION AT ROAD LEVEL OF WATER
CONSUMPTION IN DEVELOPING WATER DISTRIBUTION
NETWORKS ACCURATE HYDRAULIC SIMULATION MODES**

V. Kanakoudis, K. Gonelas

Hydromechanics and Environmental Engineering Laboratory, Civil
Engineering Department, University of Thessaly, Pedion Areos, Volos

ABSTRACT

This paper underlines the importance of proper spatial and time distribution patterns of demand in water supply, and the network losses as a separate consumption. Following, a new method of spatial distribution of demand on a street reference level, with significant results in cost – benefit analysis is presented. Furthermore, the process and problems encountered in hydraulic modeling and solving of the water supply of the Water Utility of City of Kos are demonstrated. Finally, a comparison of the new spatial distribution method with the corresponding one of Thiessen polygons as well as with the results of the field measurements that followed is presented and the aggregate findings are highlighted.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μαθηματική μοντελοποίηση χρησιμοποιείται για περισσότερα από 60 χρόνια για να αναλυθούν οι ροές στη διανομή νερού στα συστήματα δικτύων. Η χρήση υπολογιστών για τη διεξαγωγή αναλύσεων των ροών στους αγωγούς των δικτύων δημιουργήθηκαν στις αρχές της δεκαετίας του 1960 και επεκτάθηκαν πολύ κατά τη διάρκεια της επακόλουθης δεκαετίας με την έλευση της αναβαθμισμένης λύσης των αλγορίθμων και την εφαρμογή των τεχνικών μοντελοποίησης για συσκευές όπως αντλίες και βαλβίδες. Η χωρική κατανομή των καταναλώσεων είναι μια αναγκαία εργασία για την λειτουργία του μοντέλου προσομοίωσης. Τα περισσότερα λογισμικά δικτύων ύδρευσης χρησιμοποιούν τις χωρικές ικανότητες ανάλυσης λογισμικού GIS και πηγές δεδομένων, όπως γεωγραφικά κωδικοποιημένα αρχεία μετρητών χρέωσης, στοιχεία παραγωγής νερού, στοιχεία πληθυσμιακών απογραφών, ζώνες χρήσεων γης και πληροφορίες πυκνότητας της ζήτησης.

Μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής του μοντέλου του δικτύου, ακολουθεί το καλιμπράρισμα του, συνήθως με την μέτρηση σε επιλεγμένους κόμβους των μεγθών της πίεσης και της παροχής σε κρίσιμους κόμβους. Απαιτούνται να είναι διαθέσιμα καλά καθορισμένα πρότυπα για να βοηθήσουν στον προσδιορισμό του βαθμού του αποδοτικού καλιμπραρίσματος. Τα πρότυπα αυτά διαφέρουν ανάλογα με τη ζητούμενη χρήση του μοντέλου (Walski et al., 2003). Για παράδειγμα, είναι γνωστό ότι ένα μοντέλο που χρησιμοποιείται για την εξαγωγή συμπερασμάτων για την ποιότητα του νερού απαιτεί ένα καλά βαθμονομημένο και λεπτομερές υδραυλικό μοντέλο για να εξάγει τα καλύτερα και πιο χρήσιμα αποτελέσματα, ενώ ένα μοντέλο που χρησιμοποιείται για τον αρχικό κεντρικό σχεδιασμό ενός δικτύου απαιτεί «σκελετοποιημένο» μοντέλο, με συνεπαγόμενο μικρότερο βαθμό υδραυλικής απομόνωσης (Ray et al., 2007). Η αναντιστοιχία στις μετρήσεις πεδίου και μοντέλου, γεφυρώνεται τροποποιώντας τον παράγοντα της εσωτερικής τραχύτητας των αγωγών. Η εσφαλμένη εκτίμηση των τιμών της τραχύτητας στους αγωγούς, οδηγεί σε εσφαλμένη εκτίμηση του βαθμού «γήρανσης» ή καλύτερα «μείωσης της παροχετευτικής ικανότητας» των αγωγών, που με την σειρά της οδηγεί σε εσφαλμένα συμπεράσματα σχετικά με την πρόγνωση της πιθανότητας αστοχίας του αγωγού.

Σε ότι αφορά την εφαρμογή όλων αυτών στα ελληνικά δίκτυα ύδρευσης υπάρχουν πολλοί περιορισμοί. Πολλές φορές οι χρήσεις γης δεν είναι καθορισμένες, το ίδιο το δίκτυο ύδρευσης είναι μερικώς καταγεγραμμένο και τα στοιχεία των λογαριασμών ύδρευσης των καταναλωτών ελλιπώς ενημερωμένα. Τίθεται λοιπόν ζήτημα για το ποιες διαδικασίες πρέπει να ακολουθηθούν για την μεγιστοποίηση της σχέσης κόστους-οφέλους κατά τη διάρκεια της εφαρμογής των βημάτων για την δημιουργία του υδραυλικού μοντέλου ενός δικτύου ύδρευσης. Πολλές φορές ακολουθούνται πρακτικές αναβάθμισης των λειτουργιών μιας αναπτυσσόμενης εταιρείας ύδρευσης, οι οποίες είναι κοστοβόρες και χρονοβόρες για δεδομένο αποτέλεσμα. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για τη δημιουργία του μοντέλου ύδρευσης και η επιλογή του καθένα έχει να κάνει με ζητήματα όπως ο βαθμός συλλογής δεδομένων, η ενημέρωση του προσωπικού, η αξιοπιστία των δεδομένων κλπ και κυρίως το κόστος.

Ο στόχος αυτής της εργασίας είναι διττός:

- Να αξιολογήσει και να συγκρίνει τα αποτελέσματα της κατανομής της ζήτησης στους κόμβους του υδραυλικού μοντέλου μεταξύ της γνωστής μεθόδου των πολυγώνων Thiessen και μιας καινοτόμου μεθόδου, της μεθόδου χωρικής κατανομής της κατανάλωσης σε επίπεδο αναφοράς οδού. Επίσης αναλύεται η εισαγωγή των απωλειών νερού ως ανοιγμένη ξεχωριστή κατανάλωση και η

σημασία της ορθής κατανομής της κατανάλωσης για την εκτίμηση της εσωτερικής τραχύτητας των αγωγών κατά τη διαδικασία του καλιμπραρίσματος του μοντέλου του δικτύου ύδρευσης.

- Να παρουσιάσει στο σύνολο της την διαδικασία και τα προβλήματα που προέκυψαν κατά την ψηφιοποίηση, την υδραυλική προσομοίωση και επίλυση του δικτύου ύδρευσης της ΔΕΥΑΚΩ και στη συνέχεια τα αποτελέσματα από το καλιμπράρισμα του μοντέλου του δικτύου ύδρευσης, και την επακόλουθη σύγκριση των δύο μεθόδων με τις μετρήσεις πεδίου.

2. Η ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΕΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΣΤΟΥΣ ΚΟΜΒΟΥΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ

Οι εξισώσεις μοντελοποίησης δικτύων ύδρευσης βασίζονται την απλουστευτική παραδοχή ότι το νερό εξάγεται από το σύστημα μέσω των κόμβων. Στην πραγματικότητα, ωστόσο, η κατανάλωση νερού λαμβάνει χώρα σε όλο το μήκος του αγωγού. Διάφορες εκφράσεις έχουν αναπτυχθεί (Muss, 1960 και Shamir και Hamberg, 1988) ώστε να εξισώνουν την ομοιόμορφη άντληση νερού κατά μήκος του αγωγού με τα πραγματικά σημεία κατανάλωσης του νερού. Η ομαδοποίηση πολλών καταναλώσεων νερού στους κόμβους αντί για τα πραγματικά σημεία, παράγει σχετικές διαφορές μεταξύ των υπολογισμών του μοντέλου και των πραγματικών μετρήσεων, οι οποίες είναι τόσο μεγαλύτερες όσο πιο λανθασμένη είναι η προσέγγιση της πραγματικότητας. Υπήρξαν πολλές αυτοματοποιημένες πρακτικές κατανομής της αρχικής ζήτησης στο μοντέλο, που χρησιμοποίησαν εργαλεία GIS και λειτούργησαν με ικανοποιητικά αποτελέσματα. Τέτοιες μέθοδοι είναι οι ομαδοποιήσεις των μετρητών, η κατανομή της παροχής και ο καθορισμός των σημείων ζήτησης. Μερικές φορές συνίστανται οι μέθοδοι κατανομής της ζήτησης ενώ σε άλλες όπως στον υπολογισμό του μη τιμολογούμενου νερού είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικές συνδυαστικές μέθοδοι (Walski et al.). Η πρακτική της ομαδοποίησης των μετρητών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον καθορισμό της πραγματικής κατανάλωσης, ενώ η αντίστοιχη της κατανομής για την προσομοίωση των απωλειών λόγω θραύσεων και διαρροών. Η χωρική κατανομή της ζήτησης που χρησιμοποιήθηκε στη συγκεκριμένη εργασία είναι μία μικτή πρακτική, αφού χρησιμοποιεί γραμμική αναλογική κατανομή σε συνδυασμό με γεωγραφική αποτύπωση των μετρητών σε επίπεδο οδού.

Η διαδικασία της κατανομής της ζήτησης δεν έχει να κάνει μόνο με τον χώρο αλλά και με τον χρόνο. Υπάρχει διακύμανση της κατανομής της κατανάλωσης κατά τη διάρκεια του 24ώρου, κατά τη διάρκεια των ημερών της εβδομάδας (άλλη η κατανάλωση του σαββατοκύριακου, άλλη τις καθημερινές) όπως και εποχική διαφορά μεταξύ των χειμερινών και θερινών μηνών. Η ύπαρξη διαφόρων ειδών καταναλωτών δυσχεραίνει την προσομοίωση των καταναλώσεων στους κόμβους του συστήματος. Παρόλο που είναι δυνατό να μελετηθούν μερικοί πελάτες λεπτομερώς και να επεκταθούν τα συμπεράσματα αυτής της μελέτης στο υπόλοιπο του συστήματος, αυτού του είδους η αναγωγή των δεδομένων εμπεριέχει ορισμένους εγγενείς κινδύνους. Η πιθανότητα επιλογής του "τέλειου" μέσου πελάτη είναι μικρή, και κάθε απόκλιση από την πραγματικότητα ή λάθος στην μέτρηση θα επιδεινωθούν όταν εφαρμοστεί σε μια ολόκληρη κοινότητα. Ως εκ τούτου, οι καταναλώσεις για τους μεγάλους χρήστες (βιομηχανίες, νοσοκομεία, ξενοδοχεία, και ούτω καθεξής), καθώς και ημερήσιες διακυμάνσεις τους πρέπει να καθορίζονται ξεχωριστά.

Σε ιδανικές περιπτώσεις, το άθροισμα των καταμετρούμενων ποσοτήτων όλων των πελατών, θα έπρεπε να ισούται με το ποσό του νερού που μετράται στην έξοδο από

την εγκατάσταση επεξεργασίας. Στην πράξη, ωστόσο, αυτό δεν συμβαίνει. Αν και η εισροή είναι πράγματι ίση με την εκροή, δεν καταμετριούνται όλες οι εκροές. Αυτές οι "χαμένες" εκροές αναφέρονται ως μη μετρούμενη κατανάλωση (unaccounted for water UFW). Οι συνηθέστεροι λόγοι για αυτήν την απόκλιση είναι οι απώλειες λόγω διαρροών και θραύσεων των αγωγών, τα σφάλματα μέτρησης, οι κλοπές καθώς και η δημοτική μετρούμενη αλλά μη τιμολογούμενη χρήση. Είναι αναγκαίο λοιπόν οι ποσότητες αυτές να εισαχθούν στο μοντέλο ως ξεχωριστή κατανάλωση. Ωστόσο, το πρόβλημα έγκειται στο ότι δεν είναι γνωστή η κατανομή αυτών των ποσοτήτων. Συνήθως, υπολογίζεται η συνολική ποσότητα της μη μετρούμενης κατανάλωσης και διαιρείται εξ ίσου μεταξύ όλων των κόμβων (Walski, *et al*). Επίσης εάν είναι γνωστό ότι ένα τμήμα του δικτύου έχει μεγαλύτερη πιθανότητα διαρροής λόγω της ηλικίας ή του υλικού των αγωγών, τότε επιμερίζεται μεγαλύτερο ποσοστό της συγκεκριμένης κατανάλωσης στο τμήμα αυτό.

3. Η ΝΕΑ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΧΩΡΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΤΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΚΑΙ Η ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

3.1. ΟΙ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΙΣ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ ΕΝΟΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Στα περισσότερα μαθηματικά μοντέλα, οι παράμετροι του μοντέλου χρειάζονται καλιμπράρισμα (βαθμονόμηση) πριν επιτύχουμε την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων από την προσομοίωση (Walski, 1983; Ormsbee, 1989). Είναι αναγκαία λοιπόν η διερεύνηση των πηγών σφαλμάτων στα δεδομένα εισόδου, καθώς και των αιτιών για τις αποκλίσεις μεταξύ πραγματικών συνθηκών και αποτελεσμάτων μοντελοποίησης. Ο Walski (1995) πρότεινε την αιτία δημιουργίας και χρήσης του μοντέλου ως έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες στον καθορισμό των χαρακτηριστικών του καλιμπραρίσματος του μοντέλου. Είπε ότι είναι αμφισβητήσιμο το κατά πόσο ένα μοντέλο καλιμπράρεται μοναδικά για όλους τους σκοπούς. Αναγνώρισε επτά πιθανούς σκοπούς χρήσης του μοντέλου, ξεκινώντας από τη διαστασιοποίηση αγωγών για σχεδιασμό νέων δικτύων, παρατεταμένες περιόδους προσομοίωσης για μελέτες σχεδιασμού, διαίρεση δικτύου σε υποτμήματα, μελέτες αποκατάστασης, μελέτες χρήσης ενέργειας, μοντέλα ποιότητας νερού και προγράμματα εξαέρωσης.

Όλα τα δεδομένα που έχουν αβεβαιότητα σωστής μέτρησης είναι υποψήφια για την προσαρμογή κατά τη διάρκεια του καλιμπραρίσματος. Πιθανά προβλήματα του συστήματος είναι οι μεγάλες διαρροές, λάθη στους μετρητές της κατανάλωσης, λάθη στα καταγεγραμμένα μεγέθη των αγωγών, κλειστές βαλβίδες και φθαρμένες πτερωτές αντλιών. Στην πράξη, το καλιμπράρισμα επιτυγχάνεται με την προσαρμογή της τραχύτητας των αγωγών ή των εκτιμήσεων των κομβικών καταναλώσεων μέχρι να επέλθει επίτευξη συμφωνίας μεταξύ πιέσεων και παροχών που καταγράφονται στο μοντέλο και στο πεδίο. Αυτό συμβαίνει γιατί σε αντίθεση με μεγέθη όπως μήκη αγωγών, διαμέτροι, και στάθμες δεξαμενών, τα οποία είναι άμεσα μετρήσιμα, οι τραχύτητες των αγωγών και οι εκτιμώμενες καταναλώσεις κόμβων έχουν περιθώρια προσαρμογής. Οι μετρήσεις πεδίου κοστίζουν ακριβά και συνήθως είναι διαθέσιμες πολύ λιγότερες από τις απαιτούμενες για το καλιμπράρισμα. Λόγω του μεγάλου αριθμού αγνώστων τιμών είναι αδύνατον να βαθμονομηθεί με απόλυτη ακρίβεια το μοντέλο ενός πραγματικού συστήματος (Walski, 2000). Για την μείωση του μεγάλου αριθμού αγνώστων χρησιμοποιείται ευρέως η ομαδοποίηση των αγωγών κατά τη βαθμονόμηση (Mallik KN. *et al*, 2002).

Η ακριβέστερη προσέγγιση της πραγματικής κατανάλωσης των κόμβων έχει ως αποτέλεσμα να τροποποιούμε σε μικρότερο βαθμό τις μεταβλητές των στοιχείων του δικτύου, κυρίως την τραχύτητα των αγωγών, ώστε να συγκλίνει το μοντέλο στην πραγματικότητα. Αν η προσέγγιση της ζήτησης δεν είναι ακριβής, τότε κατά τη διαδικασία του καλιμπραρίσματος του μοντέλου, οι επιλεγόμενες τιμές τραχύτητας των αγωγών αποκλίνουν σημαντικά από την πραγματικότητα. Η διάβρωση αποτελεί αιτία τόσο των εμφανών, όσο και των αφανών διαρροών που παρουσιάζονται στους αγωγούς του δικτύου (Κανακούδης 1998). Η εσφαλμένη εκτίμηση των τιμών της τραχύτητας οδηγεί σε εσφαλμένη εκτίμηση του βαθμού γήρανσης των αγωγών. Η λανθασμένη εκτίμηση της μείωσης της παροχευτικής ικανότητας των αγωγών οδηγεί με τη σειρά της σε εσφαλμένα συμπεράσματα σχετικά με την πρόγνωση της πιθανής αστοχίας του αγωγού. Επομένως λαμβάνει χώρα λανθασμένη ιεράρχηση των αναγκαίων επεμβάσεων στο δίκτυο που οδηγεί σε εσφαλμένη κατανομή επενδύσεων.

3.2. Η ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΧΩΡΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΤΗΣ ΖΗΤΗΣΗΣ ΜΕ ΕΠΙΠΕΔΟ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΤΗΝ ΟΔΟ

Η εκτίμηση της ζήτησης ξεκινά με την καταγραφή των διμηνιαίων μετρήσεων όλων των υδρομέτρων του δικτύου, καθώς και των παροχών εισόδου. Στη συνέχεια αίρονται αναντιστοιχίες, αντιφάσεις και εμφανή μετρητικά σφάλματα. Οι καταναλωτές χωρίζονται σε μεγάλους και μικρούς, με τους μεγάλους να τοποθετούνται σημειακά στο δίκτυο. Ο καταμερισμός του συνόλου των υδρομέτρων σε ομάδες γίνεται με βάση την διεύθυνση του υδρομέτρου στον λογαριασμό των καταναλωτών. Οι καταγραφές που εμφανίζονται είναι είτε με διεύθυνση και αριθμό, είτε μόνο με διεύθυνση, είτε απλά με ονομασία περιαστικής περιοχής. Αυτό παρατηρείται στις εταιρείες ύδρευσης των οποίων οι περιοχές ευθύνης είναι αστικές, προαστιακές και αγροτικές. Στη συνέχεια και αφού οι καταναλώσεις των υδρομέτρων εισαχθούν σε ξεχωριστά φύλλα επεξεργασίας MS Excel, πρέπει να προσδιοριστούν οι κόμβοι του μοντέλου, από τους οποίους εξάγεται η συγκεκριμένη κατανάλωση. Σε συνεργασία με τους τεχνικούς της εταιρείας καθορίζονται η αρχή και το πέρας των οδών, τα όρια των προαστιακών και αγροτικών περιοχών που αντιστοιχούν στην ονοματοδοσία των υδρομέτρων, και διασαφηνίζονται διάφορα προβλήματα επικαλύψεων.

Με το πέρας της παραπάνω διαδικασίας προκύπτουν τρεις κατηγορίες υδρομέτρων. Πρώτη κατηγορία είναι αυτά που βρίσκονται εντός του αστικού ιστού. Η κατανομή της πρώτης κατηγορίας γίνεται βάσει ισοδύναμου μήκους οδού. Δηλαδή ο κάθε κόμβος που υπάρχει πάνω στην οδό παίρνει την αναλογία της όλης ζήτησης της οδού βάσει της αναλογίας μήκους που του αντιστοιχεί από το σύνολο του μήκους. Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν τα υδρόμετρα των οποίων η οδός αναφοράς είναι εν μέρει μέσα στον αστικό ιστό και εν μέρει εκτός αυτού, όπως για παράδειγμα οι αρτηρίες που αποτελούν εξόδους της πόλης και η παροχή νερού στους καταναλωτές συνεχίζεται για χιλιόμετρα. Η κατανομή της ζήτησης γίνεται με συνδυαστικό τρόπο. Ακολουθείται η ίδια κατανομή ισοδύναμου μήκους οδού, με τη διαφορά ότι στους κόμβους εντός σχεδίου εφαρμόζονται αυξητικοί συντελεστές λόγω πυκνότητας. Τελευταία κατηγορία αποτελούν οι ομάδες που καταγράφουν την κατανάλωση αγροτικών περιοχών. Η κατανομή βασίζεται στην διαίρεση της ζήτησης της περιοχής δια τον αριθμό των κόμβων που εμπερικλείονται στο εδαφικό της σύνολο.

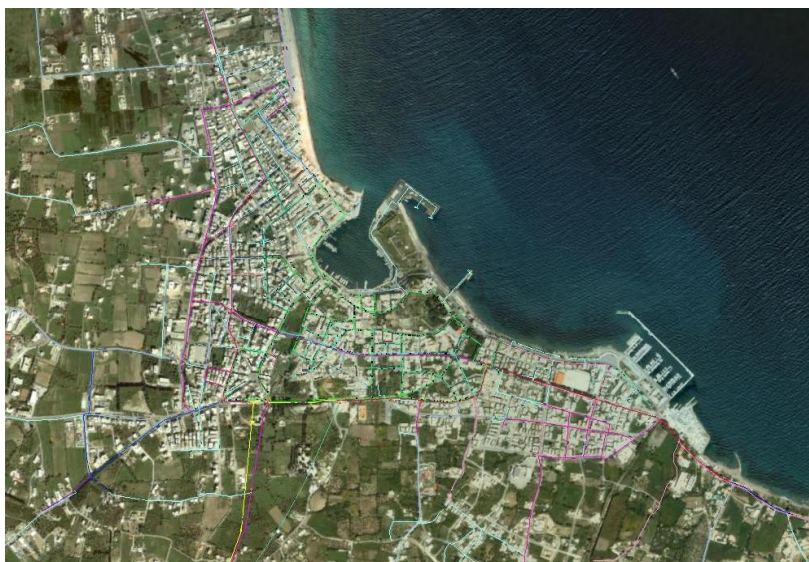
Η συγκεκριμένη μέθοδος κατανομής της κατανάλωσης δεν απαιτεί πολύ χρόνο για την εφαρμογή της εφόσον ακολουθηθεί η σωστή διαδικασία ομαδοποίησης των υδρομέτρων. Ο καθορισμός των ομάδων υδρομέτρων από κοινού με τους τεχνικούς της

εταιρείας συμβάλει στην εξοικείωση του μελετητή με το δίκτυο και το προσωπικό. Μέσω των αλληλοσυνδεμένων υπολογιστικών φύλλων του προγράμματος MS Excel, υπάρχει η δυνατότητα δυναμικής ενημέρωσης και διόρθωσης των δεδομένων εισαγωγής, όπως και η εξαγωγή της κατανομής της κατανάλωσης για κάθε επόμενη έκδοση λογαριασμών νερού.

4. Η ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΝΕΑΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΤΗΣ ΔΕΥΑ ΚΩ

4.1. ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ

Το δίκτυο ύδρευσης της Κω (εικόνα 1) καλύπτει την πόλη και τις οικιστικές επεκτάσεις προς ΝΔ μέχρι Λάμπη και ΒΑ μέχρι το Ψαλίδι. Εξυπηρετεί 20.000 μόνιμους και περισσότερους από 50.000 πρόσθετους εποχικούς καταναλωτές. Επίσης είναι συνδεδεμένα περισσότερα από 100 σημαντικά τουριστικά συγκροτήματα με σημειακές καταναλώσεις που φθάνουν τα 200 m³/24 h. Η συνολική τροφοδοτούμενη ποσότητα στο δίκτυο τους θερινούς μήνες αιχμής φθάνει τις 12.579 m³/24 h και τους χειμερινούς μήνες περιορίζεται σε 5.927 m³/24 h με σχέση μεταβολής 1/2 (τους θερινούς μήνες αρκετά τουριστικά συγκροτήματα υδρεύονται από ιδιωτικές γεωτρήσεις). Το δίκτυο είναι οργανωμένο σε μία εκτεταμένη χαμηλή ζώνη υψομέτρου 0 έως +30 μ. και σε μία υπερκείμενη προς νότια με υψόμετρα που κυμαίνονται από +25 μέχρι +50. Πρόσθετη ιδιαιτερότητα του δικτύου αποτελεί η εκτεταμένη γεωγραφική του ανάπτυξη.



Εικόνα 1: Το δίκτυο της ΔΕΥΑ ΚΩ σε δορυφορική αποτύπωση εδάφους (google earth)

Αρχικά η πόλη της Κω αποτελούσε ένα συνεκτικό πολεοδομικό συγκρότημα, διαμορφωμένο βάσει σχεδίου από την εποχή της Ιταλικής κατοχής. Η πόλη τότε εξυπηρετείτο από ένα καλοσχεδιασμένο δίκτυο ύδρευσης. Μεταπολεμικά, η τουριστική και γενικότερη ανάπτυξη του νησιού οδήγησε σε έντονη οικοδομική δραστηριότητα, κατά κανόνα χωρίς πρόβλεψη παράλληλου σχεδιασμού έργων υποδομής. Οι νέες περιοχές εξυπηρετήθηκαν με την ad hoc κατασκευή κεραιών ακτινικής μορφής, που είχαν σαν αφετηρία τον αρχικό πυρήνα του δικτύου ύδρευσης. Από τη δεκαετία του '80 με τη σύσταση της ΔΕΥΑ ΚΩ, υπήρξε συντονισμένη προσπάθεια διόρθωσης των αδυναμιών υδροδότησης μέσω κατασκευών, όπως κεντρικού ενισχυτικού βρόγχου, τροφοδοτικών αγωγών, επέκταση υφιστάμενης δεξαμενής και κατασκευή νέων, συστήματος αυτόματης διαχείρισης των γεωτρήσεων. Το δίκτυο ύδρευσης της πόλης

τροφοδοτείται από 22 γεωτρήσεις και επιπρόσθετα από μια πηγή μικρής παροχετευτικότητας. Από τις γεωτρήσεις το νερό οδηγείται σε 3 δεξαμενές, με χωρητικότητα 480, 1.717 και 2.495 κ.μ.. Έχουν διαμορφωθεί τρεις πιεζομετρικές ζώνες.

4.2. Η ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΚΑΙ Η ΧΡΗΣΗ ΦΟΡΗΤΟΥ ΔΕΚΤΗ GPS

Το δίκτυο της πόλης της Κω, όπως και η πλειοψηφία των δικτύων στην Ελλάδα, είχε αποσπασματικές και ελλιπείς χωρικές πληροφορίες. Υπήρχαν ορισμένα τμήματα του δικτύου σε ψηφιακή μορφή από προηγούμενη ανατεθείσα μελέτη (Αφτιάς, 1996), τα οποία αφορούσαν ορισμένες πυκνοκατοικημένες περιοχές του οικιστικού συγκροτήματος της Κω. Απαιτούνταν να γίνει ένωση των διαφόρων τμημάτων του δικτύου και συνολική παρουσία σε ψηφιοποιημένο υπόβαθρο, επικαιροποίηση του δικτύου με τις αλλαγές υλικών και διατομών αγωγών, ψηφιοποίηση των επεκτάσεων του δικτύου και ενσωμάτωση τους στο ήδη υπάρχον.

Η μεθοδολογία χαρτογράφησης που εφαρμόστηκε, αναπτύχθηκε στα εξής στάδια:

- Συγκέντρωση χαρτών ΓΥΣ (κλίμακα 1:5000).
- Προφορική ενημέρωση από τεχνικούς της ΔΕΥΑ ΚΩ.
- Αναγνώριση των κυρίως στοιχείων του δικτύου.
- Οδεύσεις κατά μήκος των αγωγών του δικτύου.
- Επαλήθευση υπάρχοντος αποσπασματικού ψηφιοποιημένου υποβάθρου.
- Επεξεργασία δορυφορικής απεικόνισης.
- Σχεδίαση του δικτύου σε λογισμικό AutoCad 2007.



Εικόνα 2: Ο φορητός δέκτης GPS για GIS της TOPCON με ακρίβεια μικρότερη του 1 μ. που χρησιμοποιήθηκε για την αποτύπωση στοιχείων του δικτύου της Κω.

Χρησιμοποιήθηκε φορητός δέκτης GPS (εικόνα 2) για το οριζοντιογραφικό στίγμα στοιχείων του δικτύου και κυρίως για την αποτύπωση των υδρομέτρων των καταναλωτών και κατά συνέπεια του μήκους των συνδέσεων του δικτύου. Το τελευταίο στόχευε στην ακριβή μέτρηση του συνόλου των μηκών των αγωγών συνδέσεων των παροχών του δικτύου, κάτι το οποίο χρησιμεύει στον υπολογισμό των αναπόφευκτων πραγματικών απωλειών ενός δικτύου ύδρευσης μέσω του εμπειρικού τύπου (4.1),

$$\text{Δείκτης Αναπόφευκτων Απωλειών} = (18 \cdot L_m + 0.8 \cdot N_c + 25 \cdot L_p)P \quad (4.1)$$

όπου L_m = το μήκος αγωγών διανομής σε χιλιόμετρα, N_c = ο αριθμός συνδέσεων παροχών, L_p = το μήκος αγωγών συνδέσεων παροχών σε χιλιόμετρα και P = η μέση

πίεση λειτουργίας του δικτύου. Μέσω του προγράμματος AutoCAD και με τη βοήθεια των στιγμάτων των υδρομέτρων που αποτυπώθηκαν, υπολογίστηκαν με κάθετες ευθείες στον αγωγό διανομής τα μήκη σύνδεσης.

Ένας δεύτερος εξίσου σημαντικός σκοπός που χρησίμευσε η αποτύπωση των υδρομέτρων είναι η περαιτέρω επεξεργασία και χωρική κατανομή αυτών στους κόμβους του μοντέλου. Ουσιαστικά πρόκειται για την πιστότερη κατανομή των καταναλώσεων, αφού συνδέεται η πραγματική κατανάλωση ενός υδρομέτρου με τον καταλληλότερο εικονικό κόμβο στο μοντέλο. Για την πραγματοποίηση της συγκεκριμένης μεθόδου χωρικής κατανομής με GPS σε ολόκληρο το δίκτυο απαιτούνταν πόροι (χρόνος και χρηματικοί πόροι) που δεν ήταν διαθέσιμοι την παρούσα χρονική στιγμή και έτσι έγινε μερική εφαρμογή. Συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκε σε 50 κόμβους του μοντέλου και χρησιμοποιήθηκε ως δεύτερη επαλήθευση της μεθόδου χωρικής κατανομής της κατανάλωσης σε επίπεδο αναφοράς οδού, με πολύ καλά αποτελέσματα. Η επεξεργασία όλων των κόμβων του δικτύου με τη συσκευή θα ακολουθήσει σε επόμενο ερευνητικό βήμα.

4.3. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΝΕΑΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

Αφετηρία εκτίμησης της ζήτησης απετέλεσαν τα στατιστικά στοιχεία καταμέτρησης της κατανάλωσης της ΔΕΥΑ ΚΩ, καθώς και τα στοιχεία άντλησης των γεωτρήσεων. Από τη ΔΕΥΑ ΚΩ ελήφθησαν πρωτογενή στοιχεία καταναλώσεων των δύο ετών 2007 και 2008. Ιδιαίτερη καταγραφή έγινε για τα υδρόμετρα (ξενοδοχείων) με κατανάλωση διμήνου αιχμής μεγαλύτερη από 400 μ³/δίμηνο. Τα πρωτογενή στοιχεία χρειάστηκε στη συνέχεια να υποβληθούν σε κατάλληλη επεξεργασία, ώστε να αρθούν αντιφάσεις, όπως αναντιστοιχία κλινών ξενοδοχείων και κατανάλωσης, αναντιστοιχία τιμών από έτος σε έτος κλπ., που διαπιστώθηκαν κατά την αξιολόγησή τους. Οι καταναλώσεις με βάση τα υδρόμετρα χωρίστηκαν σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Τις μεγάλες ξενοδοχειακές καταναλώσεις (κριτήριο ήταν τα 400 μ³/δίμηνο) και όλες τις υπόλοιπες που αποτελούσαν τις οικιακές. Το δεδομένα των μεγάλων πελατών αφαιρέθηκαν από το συνολικό σύστημα και τοποθετήθηκαν σημειακά ενώ το υπόλοιπο της κατανάλωσης κατανεμήθηκε στους κόμβους του συστήματος. Τα πρωτογενή στοιχεία αφορούσαν τις διμηνιαίες καταναλώσεις των 12.465 υδρομέτρων. Το σύνολο των υδρομέτρων χωρίστηκε σε 184 ομάδες με βάση την γεωγραφική τους αναφορά σε οδό ή σε προαστιακή περιοχή.

Στη συνέχεια οι 184 ομάδες υδρομέτρων εισήχθησαν σε διαφορετικά φύλλα εργασίας Excel. Μετά από έρευνα από κοινού με τους τεχνικούς της ΔΕΥΑ ΚΩ προσδιορίστηκαν γεωγραφικά πάνω σε δορυφορικές απεικονίσεις. Καθορίστηκαν τα όρια των προαστιακών περιοχών και η αρχή και το πέρας των οδών πάνω σε χάρτες του google earth. Προέκυψε ότι κάποιες περιοχές είχαν κοινή γεωγραφική αναφορά, οπότε κατόπιν περαιτέρω επεξεργασίας τροποποιήθηκαν, συγχωνευθήκαν και εν τέλει προέκυψαν 155 ομάδες υδρομέτρων που έπρεπε να κατανεμηθούν στους 644 κόμβους του μοντέλου. Υπήρξαν τρεις κατηγορίες ομάδων:

- οι οδοί (εντός σχεδίου πόλης Κω), που ήταν και η πλειοψηφία
- οι περιοχές έκτος σχεδίου, όπου τα υδρόμετρα είχαν γεωγραφική αναφορά περιοχής (π.χ. Αγ. Ελευθέριος)
- οι οδοί που ένα τμήμα τους ήταν εντός σχεδίου(με επακόλουθη υψηλή πυκνότητα πληθυσμού) και το υπόλοιπο εκτός σχεδίου(με χαμηλή πυκνότητα)

Η κατανομή της πρώτης κατηγορίας έγινε βάσει ισοδύναμου μήκους οδού. Δηλαδή ο κάθε κόμβος που υπήρχε πάνω στην οδό έλαβε την αναλογία της όλης

ζήτησης της οδού βάσει της αναλογίας μήκους που του αντιστοιχούσε στο σύνολο του μήκους. Η κατανομή της δεύτερης κατηγορίας βασίστηκε στην διαίρεση της ζήτησης της περιοχής δια τον αριθμό των κόμβων της. Η κατανομή της ζήτησης της τρίτης κατηγορίας έγινε με συνδυαστικό τρόπο. Ακολουθήθηκε η ίδια κατανομή ισοδύναμου μήκους οδού, με τη διαφορά ότι στους εντός σχεδίου κόμβους εφαρμόστηκαν αυξητικοί συντελεστές λόγω πυκνότητας. Στη συνέχεια αναλύθηκαν οι 107 μεγάλες καταναλώσεις και προέκυψαν 44 νέοι κόμβοι εισαγωγής της κατανάλωσης. Προέκυψε ένα δαιδαλώδες αλλά λειτουργικό και δυναμικό στην εφαρμογή σύστημα κατανομής στο MS Excel.

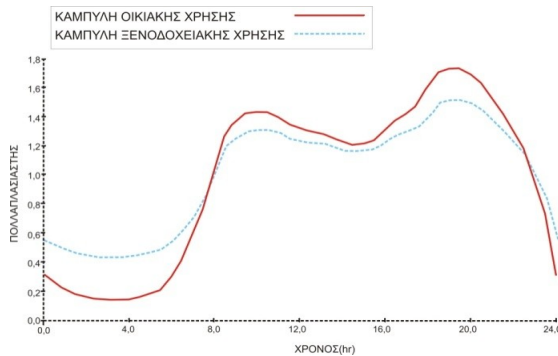
4.4. Η ΧΩΡΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΟΛΥΓΩΝΩΝ THIESSEN

Πρώτο βήμα για την εφαρμογή της μεθόδου των πολυγώνων Thiessen είναι η καταγραφή των κόμβων οι οποίοι θα συμμετέχουν στον διαμερισμό της εδαφικής αναφοράς του δικτύου ύδρευσης της ΚΩ. Επειδή ενδιαφέρουν οι οικιακές καταναλώσεις, αφαιρέθηκαν οι κόμβοι των ξενοδοχείων και οι κόμβοι που βρίσκονται πάνω στους πρωτεύοντες αγωγούς μεταφοράς νερού. Με την διαδικασία αυτή παρέμειναν 610 κόμβοι. Στη συνέχεια και αφού σχεδιάστηκαν σε περιβάλλον Autocad 610 πολύγωνα, καταγράφηκαν τα εμβαδά τους με το άθροισμα τους να ανέρχεται σε 12.873.447 τ.μ. Για την καλύτερη προσέγγιση της πραγματικότητας πρέπει να δίνονται διάφοροι βαρυτικοί συντελεστές στα πολύγωνα οι οποίοι έχουν να κάνουν με χρήσεις γης, πυκνότητα δόμησης, συντελεστές δόμησης κλπ. Στα εμβαδά των πολυγώνων του δικτύου της Κω δόθηκαν δύο συντελεστές βαρύτητας. Ο πρώτος συντελεστής αφορά την οικιστική κάλυψη του πολυγώνου, μετρήθηκε με απόλυτη ακρίβεια και κυμαίνεται μεταξύ 0,00 και 1,00. Ο δεύτερος βαρυτικός συντελεστής έχει σχέση με το ύψος των οικοδομών και πήρε την τιμή 1,00 στο κέντρο της πόλης της Κω και την τιμή 0,50 για τις περιφερειακές και τις εκτός σχεδίου περιοχές.

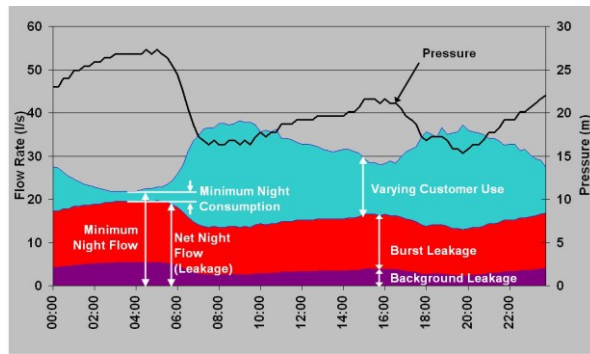
4.5. Η ΧΡΟΝΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΗΣ ΖΗΤΗΣΗΣ ΚΑΙ Η ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΣΤΟ ΥΔΡΑΥΛΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΗΣ ΔΕΥΑ ΚΩ

Η πόλη της Κω χαρακτηρίζεται από μεγάλες διαφορές στον εξυπηρετούμενο πληθυσμό από το δίκτυο ύδρευσης της. Δεδομένου της μεγάλης ποσοτικής διαφοράς μεταξύ χειμερινής και θερινής κατανάλωσης το δίκτυο επιλύθηκε ξεχωριστά για κάθε δίμηνο κατανάλωσης. Για την πιστότερη κατανομή της ζήτησης στην διάρκεια της ημέρας δημιουργήθηκαν καμπύλες κατανάλωσης στη διάρκεια του 24ωρου βασισμένες στη διεθνή βιβλιογραφία, και εισήχθησαν στα δεδομένα της επίλυσης. Οι καταναλωτές όπως προαναφέρθηκε χωρίστηκαν σε αυτούς με κατανάλωση μεγαλύτερη των 400 κ.μ./δίμηνο και σε όλους τους υπόλοιπους. Οι δύο διαφορετικές κατανομές της ημερήσιας κατανάλωσης εικονίζονται στο διάγραμμα 3.

Ο τρόπος κατανομής των απωλειών του δικτύου ύδρευσης στο δίκτυο της Κω βασίστηκε στην παραδοχή της αύξησης των διαρροών κατά την μείωση της κατανάλωσης των χρηστών. Ουσιαστικά πρόκειται για το διάγραμμα της διακύμανσης της πίεσης του δικτύου στη διάρκεια του 24ώρου (διάγραμμα 4), όπως επηρεάζεται όμως από τη συγκεκριμένη διακύμανση της κατανάλωσης των χρηστών του δικτύου της Κω. Οι ποσότητες της μη μετρούμενης κατανάλωσης υπολογίστηκαν σε προηγούμενο ερευνητικό πρόγραμμα της ΔΕΥΑ ΚΩ (Kanakoudis V. & Tsitsifli S., 2010) και εισήχθησαν στο μοντέλο.



Διάγραμμα 3: Χρονική κατανομή ημερήσιας κατανάλωσης οικιακών χρηστών / ξενοδοχείων

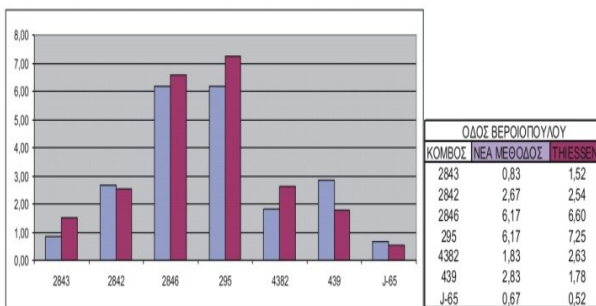


Διάγραμμα 4: Χρονική κατανομή της πίεσης του δικτύου στη διάρκεια του 24ωρου

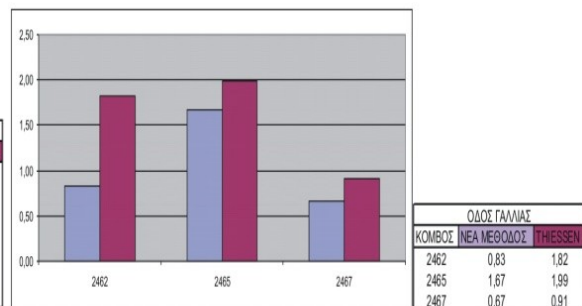
5. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΔΥΟ ΜΕΘΟΔΩΝ ΧΩΡΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΤΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΜΕ ΤΙΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΕΔΙΟΥ.

Για την σύγκριση των δύο μεθόδων χρειάστηκε η κατανάλωση του κάθε κόμβου να αναχθεί σε επί τοις χιλίοις αναλογία επί της συνολικής κατανάλωσης του δικτύου. Για την εξαγωγή ποιοτικών συμπερασμάτων απεικονίζονται παρακάτω περιπτώσεις ομάδων και από τις τρεις κατηγορίες ομάδων υδρομέτρων.

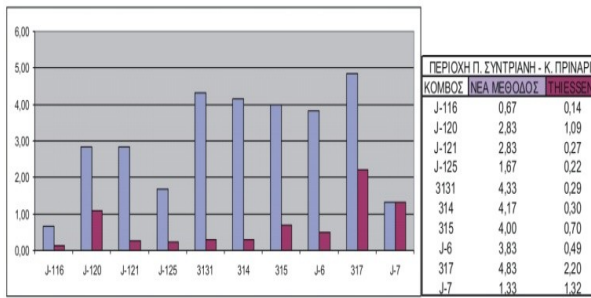
Η οδός Βεροιοπούλου ξεκινά από το κέντρο της πόλης και καταλήγει σε περιαστική περιοχή. Παρατηρείται ότι η αναλογία επί της συνολικής κατανάλωσης των δύο μεθόδων δεν διαφέρει σε μεγάλο βαθμό. Οι απόλυτες τιμές της πρώτης μεθόδου είναι μικρότερες στους πρώτους κόμβους και μεγαλύτερες στους δύο τελευταίους (Πίνακας 1). Η οδός Γαλλίας βρίσκεται το κέντρο της πόλης. Παρατηρείται και εδώ ότι οι τιμές με βάση την πρώτη μέθοδο είναι μικρότερες σε σχέση με τη μέθοδο Thiessen (Πίνακας 2). Ο τρίτος πίνακας αφορά την περιοχή Π. Συντριανή – Κ.Πρινάρι. Πρόκειται για καθαρά μη αστική περιοχή με κατοικίες που έχουν μεγάλους κήπους, και μεγάλη κατανάλωση νερού γενικότερα. Παρατηρείται ότι η αναλογία των καταναλώσεων των κόμβων σύμφωνα με τη νέα μέθοδο είναι πολύ μεγαλύτερη. (Πίνακας 3). Η οδός Χάλκωνος βρίσκεται στο κέντρο της πόλης. Όπως και στην οδό Γαλλίας παρατηρείται ότι η μέθοδος Thiessen οδηγεί σε σχετικά μεγαλύτερες τιμές από την πρώτη μέθοδο. (Πίνακας 4).



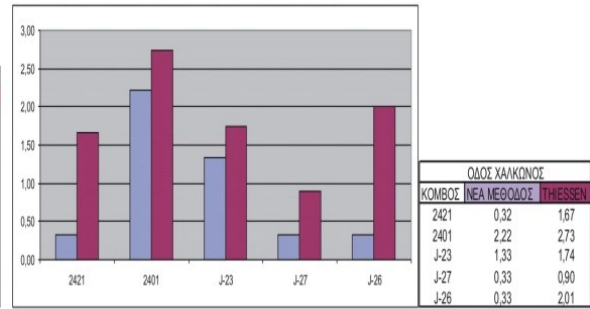
Πίνακας 1: Η αναλογία κατανάλωσης των κόμβων της οδού Βεροιοπούλου.



Πίνακας 2: Η αναλογία κατανάλωσης των κόμβων της οδού Γαλλίας.

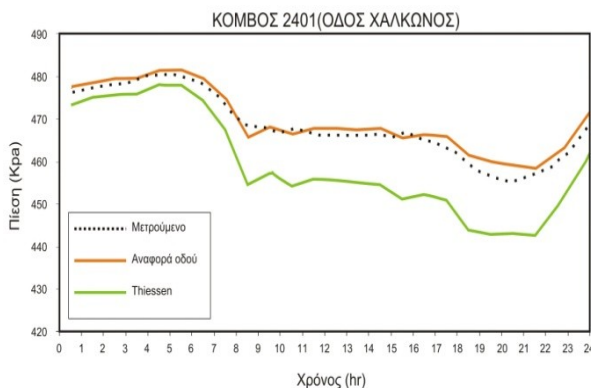


Πίνακας 3: Αναλογία κατανάλωσης των κόμβων της περιοχής Π. Συντριάνη - Κ. Πρινάρι.

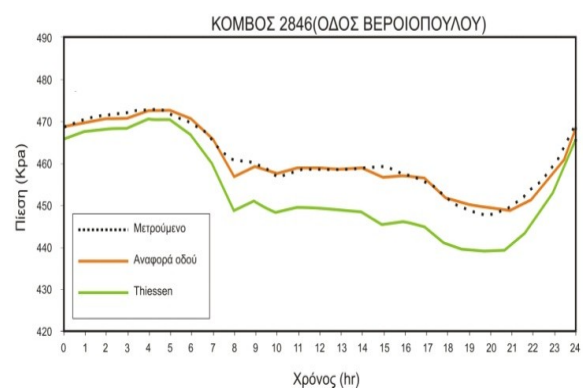


Πίνακας 4: Αναλογία κατανάλωσης των κόμβων της οδού Χάλκωνος.

Κατά την περίοδο του καλοκαιριού που παρουσιάζεται και η αιχμή της ζήτησης, εγκαταστάθηκαν καταγραφικά και πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις παροχής και πίεσης σε 26 επιλεγμένα σημεία του δικτύου. Παρακάτω παρουσιάζονται οι διακυμάνσεις της πίεσης σε 2 κόμβους από τις παραπάνω περιοχές.



Διάγραμμα 5: Σύγκριση της διακύμανσης της πίεσης στον κόμβο 2401



Διάγραμμα 6: Σύγκριση της διακύμανσης της πίεσης στον κόμβο 2846.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία έγινε ανάλυση των βημάτων που απαιτούνται για την ψηφιοποίηση και κυρίως την υδραυλική προσομοίωση ενός δικτύου ύδρευσης. Είναι μια εργώδης και πολύπλοκη διαδικασία που απαιτεί τη συνεργασία αρκετών ανθρώπων. Όσο λιγότερο ανεπτυγμένη είναι μια ΔΕΥΑ τόσο μεγαλύτερη προσπάθεια απαιτείται για να έρθει το εφικτό αποτέλεσμα. Από τα κυριότερα εργαλεία μιας ΔΕΥΑ είναι η ακριβής αποτύπωση του δικτύου της. Αναλύεται με ακρίβεια ο βηματισμός που ακολουθήθηκε στην περίπτωση του δικτύου ύδρευσης της ΔΕΥΑΚΩ, μιας εταιρείας με χαρακτηριστικά και προβλήματα παρόμοια με αυτά των περισσότερων ΔΕΥΑ της περιφέρειας. Το πιο σημαντικό στοιχείο της προσπάθειας αυτής είναι η ορθή χωρική κατανομή των καταναλώσεων στους κόμβους του μοντέλου. Είναι πολύ σημαντικό να παράγεται έργο με εξοικονόμηση χρημάτων, χρόνου εργασίας και υπολογιστικού χρόνου. Για το λόγο αυτό και λόγω έλλειψης δεδομένων και πόρων, η χωρική κατανομή της κατανάλωσης στους κόμβους του μοντέλου έγινε με δύο διαφορετικές μεθόδους, αυτήν των πολυγώνων Thiessen με βαρυτικούς συντελεστές και μια προτεινόμενη μέθοδο, την κατανομή σε επίπεδο αναφοράς οδού.

Από την σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων συμπεραίνεται ότι, η μέθοδος των πολυγώνων Thiessen με βαρυτικούς συντελεστές οδηγεί σε εκτιμήσεις που αποκλίνουν πολύ από την πραγματικότητα. Υπερεκτιμάται η συμβολή των αστικών κόμβων του δικτύου στην ζήτηση και υποεκτιμάται η αντίστοιχη συμβολή των εξωαστικών κόμβων. Συμπεραίνεται ότι για να προσεγγίσει η μέθοδος των πολυγώνων την πραγματικότητα θα πρέπει να εφαρμόζονται και άλλοι ειδικοί συντελεστές στους καταναλωτές (π.χ. είδος και μέγεθος της κατοικίας, χαρακτηριστικά καταναλωτή κτλ). Κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης του μοντέλου προέκυψαν σημαντικές διαφορές στις πιέσεις του δικτύου. Με την νέα μέθοδο γεφυρώνεται η διαφορά μεταξύ μοντέλου και πραγματικού δικτύου σε πολύ μεγάλο ποσοστό. Αναφέρεται τέλος και η χρήση φορητού δέκτη GPS, που πραγματοποιήθηκε για την αποτύπωση των υδρομέτρων και κατά συνέπεια του μήκους αγωγών συνδέσεων. Η μερική εφαρμογή της μεθόδου χωρικής κατανομής της κατανάλωσης με βάση το οριζοντιογραφικό στίγμα των υδρομέτρων έδειξε πολύ καλά αποτελέσματα και θα ακολουθήσει ολική εφαρμογή με μετρήσιμα αποτελέσματα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Αυτιάς, Μ. & συνεργάτες, 1996. *Μελέτη λειτουργίας και εκσυγχρονισμού δικτύου ύδρευσης Κω*.
- Κανακούδης Β., 1998. *Ο ρόλος των έκτακτων περιστατικών στη διαμόρφωση κριτηρίων προληπτικής συντήρησης και αντικατάστασης των αγωγών στα δίκτυα ύδρευσης*. Διδακτορική Διατριβή Α.Π.Θ.
- Kanakoudis V. and Tsitsifli S., 2010. *Evaluating the performance level of a water distribution network under unbalanced operating conditions-the case of Kos town (GR)*. 6th Int. Symp. on Environmental Hydraulics, Athens, 23-25 June.
- Mallick KN, Ahmed I, Tickle KS, Lansey KE, 2002. *Determining pipe groupings for water distribution networks*. J Water Resour. Plan Manage, ASCE 2002; 128(2):130–139.
- Muss, D. L., 1960. *Friction Losses in Lines with Service Connections*. Journal Hydraulics Division, ASCE, 86(4), 35-47.
- Ormsbee L. E., 1989. *Implicit network calibration*. Journal of Water Resources Planning and Management 115 (2), 243–257.
- Ray, R., Walski, T., Gangemi, T., Gennone, M. and Juergens, B., 2007. *Lessons Learned in Calibrating an IDSE Model*, World Environmental and Water Resources Congress 2007: Restoring Our Natural Habitat, Tampa, Florida, US (CD Proceedings).
- Shamir, U., and Hamberg, D., 1988. *Schematic Models for Distribution System Design. I: Combination Concept*. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, 114(2), 129-140.
- Walski T. M. et al, *Advanced water distribution modelling and management*, Bentley Institute Press)
- Walski T., 1983. *A technique for calibrating network models*. Journal of Water Resources Planning and Management 109 (4), 360–372.
- Walski T. M., 1995. *Standards for model calibration*. In: American Water Works Association Computer Conference. Norfolk.
- Walski TM. *Model calibration data: the good, the bad, and the useless*. J AWWA 2000, 92(1):94–99.
- Walski, T., D.V. Chase, D.A. Savic, W.M. Grayman, S. Beckwith and E. Koelle, 2003. *Advanced Water Distribution Modeling and Management*, Haestad Methods Press, Waterbury, Connecticut, USA.

Η ΧΩΡΟΤΑΞΙΑ ΤΩΝ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ – ΜΙΑ ΑΠΟΤΥΧΗΜΕΝΗ ΠΡΟΣΠΑΘΕΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ; Ε.Κ. Οικονόμου

Τομέας Συγκοινωνιακών & Υδραυλικών Έργων
Τμήμα Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών Α.Π.Θ.
Πανεπιστημιούπολη, Θεσσαλονίκη 54124
τηλ.: 2310 994360 e-mail: eoikonom@topo.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι παράκτιες ζώνες, συνήθως οικολογικά ευαίσθητες περιοχές, αποτελούν κύριες εστίες οικιστικής, οικονομικής, βιομηχανικής και τουριστικής ανάπτυξης, εξαιτίας των φυσικών χαρακτηριστικών τους και της υψηλής αισθητικής αξίας του τοπίου. Αποτέλεσμα των παραπάνω είναι η ρύπανση του παράκτιου χώρου με μεγάλες ποσότητες οργανικών φορτίων, λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων, αστικών λυμάτων και βιομηχανικών υγρών αποβλήτων που καταλήγουν τελικά στη θάλασσα, μέσω των υδάτινων αποδεκτών. Στην εργασία εξετάζεται η παράκτια ζώνη του Στρυμονικού Κόλπου, στην οποία προτείνονται εναλλακτικές μέθοδοι διαχείρισης. Η επιλογή της επικρατέστερης εναλλακτικής πρότασης γίνεται μέσω της διαδικασίας της πολυκριτηριακής ανάλυσης. Πιο συγκεκριμένα, εφαρμόζεται η Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία, προκειμένου οι εναλλακτικές λύσεις που προτείνονται να αξιολογηθούν και να ταξινομηθούν με τη χρήση οικονομικών, οικολογικών και κοινωνικών κριτηρίων, έτσι ώστε να επιτύχουμε μία ολοκληρωμένη διαχείριση της παράκτιας ζώνης.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: πολυκριτηριακή ανάλυση, ΑHP, παράκτια ζώνη, Στρυμονικός Κόλπος

HYDRAULIC WORKS PLANNING – AN UNSUCCESSFUL EFFORT OF WATER RESOURCES MANAGEMENT? E. K. Oikonomou

Department of Transportation and Hydraulic Engineering
Faculty of Rural & Surveying Engineering, AUTH
AUTH Campus, Thessaloniki 54124
tel.: 2310 994360 e-mail: eoikonom@topo.auth.gr

ABSTRACT

The coastal zones, as ecologically sensitive areas, are considered as the main location of residential, financial, industrial and touristic development, due to their natural characteristics and the highly aesthetic value of the landscape. However, they are vulnerable to pollution by large quantities of organic matter, fertilizers and pesticides, urban and industrial wastewater, which eventually end up in the sea, through the aquatic recipients. In this paper, the examined area is the coastal zone of the Strymonikos Gulf, where alternative management tools are presented. The selection of the prevailing alternative proposal is made through the process of the multi-criteria analysis. More specifically, the method of Analytical Hierarchical Process is applied so that the suggested alternative solutions can be estimated and classified by using economic, ecological and social criteria, in order to achieve coastal zone integrated management.

KEYWORDS: multicriteria analysis, AHP, coastal zone management, Strymonikos Gulf

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ακούγεται συχνά ότι στη χώρα μας δεν υπάρχει χωροταξία και σχεδιασμός, και ότι η απουσία τους αυτή αποτελεί μία από τις σημαντικές παραμέτρους για την απουσία επενδύσεων στη χώρα μας. Όμως, αυτό δεν είναι σωστό: στην Ελλάδα ισχύει από το έτος 2002 το Γενικό Πλαίσιο Χωροταξικού Σχεδιασμού και Αειφόρου Ανάπτυξης, όπως τροποποιήθηκε το έτος 2008 (ΦΕΚ 128Α'/3-7-2008), τα Περιφερειακά Πλαίσια Χωροταξικού Σχεδιασμού και Αειφόρου Ανάπτυξης, καθώς και τα Ειδικά Πλαίσια Χωροταξικού Σχεδιασμού και Αειφόρου Ανάπτυξης για τον Τουρισμό (ΦΕΚ 1138Β'/11-6-2009), τη Βιομηχανία (ΦΕΚ 151ΑΑΠ/13-4-2009), τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΦΕΚ 1787Β'/8-12-2008), ενώ έχει ολοκληρωθεί η διαβούλευση για τις Ιχθυοκαλλιέργειες και ήταν υπό ψήφιση για τις Παράκτιες Ζώνες και το Θαλάσσιο Χώρο το έτος 2009. Επίσης, από το έτος 1997, και στα πλαίσια του Ν.2508/1997 «Βιώσιμη οικιστική ανάπτυξη των πόλεων και οικισμών της χώρας και άλλες διατάξεις» (ΦΕΚ 124Α'/13-5-1997), εκπονούνται Γενικά Πολεοδομικά Σχέδια (Γ.Π.Σ.) για τους «Καποδιστριακούς» Δήμους. Αυτά αποτελούν χωροταξικές μελέτες, βασικά αναπτυξιακά εργαλεία για την ανάπτυξη κάθε Δήμου, περιλαμβάνοντας: τις οικιστικές περιοχές, υφιστάμενες και προτεινόμενες και τις ζώνες χρήσεων γης σε όλη την εδαφική επικράτεια του Δήμου, έτσι ώστε να ορίζονται οι κατάλληλες περιοχές π.χ. για τουριστική ανάπτυξη, για βιομηχανικές και βιοτεχνικές δραστηριότητες, για δραστηριότητες του πρωτογενούς τομέα παραγωγής, καθώς και οι περιοχές που χρήζουν προστασίας, ανάδειξης και αξιοποίησης π.χ. δασικές εκτάσεις, οικολογικά ευαίσθητες περιοχές, αρχαιολογικοί χώροι και ευρύτερες ζώνες τους κ.α.

Ειδικά, ο Ν.2508/1997 υπήρξε σημαντικός, θέτοντας νέα δεδομένα για το χωροταξικό σχεδιασμό, για τους εξής λόγους: πρώτον, αναγνωρίζει την ανάγκη εκπόνησης Ρυθμιστικών Σχεδίων σε μεγάλα αστικά κέντρα της Ελλάδας με μητροπολιτικό χαρακτήρα δεύτερον, καθιστά τα χωροταξικά σχέδια υποχρεωτικά για όλους τους Δήμους της χώρας, συνεπώς, αναμένεται να παραχθούν χάρτες χρήσεων γης για ολόκληρη την Ελληνική επικράτεια τρίτον, καθιστά αποκεντρωμένη τη λήψη απόφασης από τις αρμόδιες δημόσιες υπηρεσίες τέταρτον, λαμβάνεται υπόψη το εργαλείο της ιδιωτικής πολεοδόμησης ως μία πιθανή δυνατότητα ενταγμένη όμως στον υπερκείμενο χωροταξικό σχεδιασμό πέμπτον, προτείνει τη λύση εφαρμογής σχεδίων και έργων αναζωογόνησης και αναμόρφωσης υποβαθμισμένων αστικών περιοχών και τέλος, υπογραμμίζει την αναγκαιότητα εφαρμογής των χωροταξικών σχεδίων από τον πολεοδομικό σχεδιασμό, που αποτελεί τμήμα της συνολικής διαδικασίας του σχεδιασμού. Σημαντικός, εξάλλου, είναι και ο Ν.2742/1999 «Χωροταξικός σχεδιασμός και αειφόρος ανάπτυξη και άλλες διατάξεις» (ΦΕΚ 207Α'/7-10-1999), ο οποίος θεσπίζει τις θεμελιώδεις αρχές, θεσμοθετεί τα σύγχρονα όργανα, τις διαδικασίες και τα μέσα άσκησης χωροταξικού σχεδιασμού που προωθούν τη βιώσιμη, ισόρροπη ανάπτυξη, κατοχυρώνοντας την παραγωγική και κοινωνική συνοχή, διασφαλίζοντας την προστασία του περιβάλλοντος στο σύνολο του εθνικού χώρου και ενισχύει τη θέση της χώρας στο διεθνές και Ευρωπαϊκό πλαίσιο. Περιγράφοντας τους επιμέρους στόχους του χωροταξικού σχεδιασμού στο άρθρο 2, γίνεται αναφορά στην ορθολογική αξιοποίηση και στην ολοκληρωμένη διαχείριση των υδάτινων πόρων.

2. ΧΩΡΟΤΑΞΙΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

Είναι γενικά αποδεκτό ότι υπάρχει στενή σχέση ανάμεσα στο χωροταξικό σχεδιασμό, τη βιώσιμη ανάπτυξη και τη διαχείριση περιβάλλοντος. Στις περισσότερες ανεπτυγμένες χώρες ο σχεδιασμός αντιμετωπίζεται ως βασικό εργαλείο για την επίτευξη του στόχου της βιώσιμης ανάπτυξης: πρώτον, τα χωροταξικά σχέδια είναι δυνατόν να περιλαμβάνουν συγκεκριμένα «πράσινα» μέτρα π.χ. προτάσεις για την εξοικονόμηση ενέργειας ή τη

διατήρηση των οικολογικά ευαίσθητων περιοχών δεύτερον, τα περιβαλλοντικά ζητήματα είναι δυνατόν να ληφθούν υπόψη από την έναρξη της διαμόρφωσης των χωροταξικών σχεδιασμών, επηρεάζοντας κατ' αυτόν τον τρόπο τις στρατηγικές επιλογές τους σε άλλους τομείς με σημαντικές επιπτώσεις στο περιβάλλον π.χ. ζώνες χρήσεων γης ή μορφές οικονομικής ανάπτυξης και τρίτον, τα χωροταξικά σχέδια είναι δυνατόν να χρησιμοποιήσουν κριτήρια αειφορίας, σε όλες τις προτεινόμενες αναπτυξιακές πολιτικές τους (Selman, 1996). Όμως, τα χωροταξικά σχέδια προϋποθέτουν ένα συμμετοχικό δημοκρατικό πολιτικό σύστημα, έτσι ώστε να θεωρηθούν αποτελεσματικά εργαλεία για τον έλεγχο της ρύπανσης, της διατήρηση των φυσικών πόρων και τελικά, για την προώθηση της βιώσιμης ανάπτυξης (Blowers, 1992). Τα χωροταξικά σχέδια επηρεάζουν την ανάπτυξη μέσω τεσσάρων βασικών παραμέτρων: προσφέρουν έμπνευση, δέσμευση, καθοδήγηση και έλεγχο (Davidson, 1996).

Η σχέση ανάμεσα στο χωροταξικό σχεδιασμό και στη διαχείριση περιβάλλοντος τεκμηριώνεται και από την Ελληνική νομοθεσία και συγκεκριμένα από το Ν.2742/1999, όπου υπογραμμίζεται ότι ο χωροταξικός σχεδιασμός έχει ως στόχο να συμβάλει: στην προστασία και αποκατάσταση του περιβάλλοντος, στη διατήρηση των οικολογικών και πολιτισμικών αποθεμάτων και στην προβολή και ανάδειξη των συγκριτικών γεωγραφικών, φυσικών, παραγωγικών και πολιτιστικών πλεονεκτημάτων της χώρας στην ενίσχυση της διαρκούς και ισόρροπης οικονομικής και κοινωνικής ανάπτυξης της χώρας και της ανταγωνιστικής παρουσίας της στον ευρύτερο Ευρωπαϊκό, μεσογειακό και βαλκανικό χώρο και τέλος, στη στήριξη της οικονομικής και κοινωνικής συνοχής στο σύνολο του εθνικού χώρου και ιδίως στις περιοχές που παρουσιάζουν προβλήματα αναπτυξιακής υστέρησης, έντονων κοινωνικών διαφοροποιήσεων και περιβαλλοντικής υποβάθμισης, καθώς και στις περιφερειακές και απομονωμένες περιοχές ή σε άλλες περιοχές που παρουσιάζουν μειονεκτικά χαρακτηριστικά λόγω της γεωγραφικής τους θέσης.

Για την εκπλήρωση αυτών των στόχων, τα χωροταξικά σχέδια είναι απαραίτητο να λαμβάνουν υπόψη τους τις ακόλουθες αρχές: την εξασφάλιση ισάξιων όρων διαβίωσης και ευκαιριών παραγωγικής απασχόλησης των πολιτών σε όλες τις Περιφέρειες της χώρας, σε συνάρτηση με την ισόρροπη πληθυσμιακή διάταξη και τη δημογραφική ανανέωσή τους την αναβάθμιση της ποιότητας ζωής των πολιτών και τη βελτίωση των υποδομών στο σύνολο το εθνικού χώρου και ιδιαίτερα στις περιοχές που παρουσιάζουν προβλήματα αναπτυξιακής υστέρησης και περιβαλλοντικής υποβάθμισης τη διατήρηση, ενίσχυση και ανάδειξη της οικιστικής και παραγωγικής πολυμορφίας, καθώς και της φυσικής ποικιλότητας στις αστικές και περιαστικές περιοχές, αλλά και στην ύπαιθρο και ιδιαίτερα στις παράκτιες, νησιωτικές και ορεινές περιοχές, καθώς και στις περιοχές που παρουσιάζουν αυξημένη βιομηχανική και τουριστική ανάπτυξη την εξασφάλιση μίας ισόρροπης σχέσης μεταξύ του αστικού, περιαστικού και αγροτικού χώρου και την ενίσχυση της εταιρικής σχέσης μεταξύ των μητροπολιτικών περιοχών, των αστικών κέντρων και των δήμων και οικισμών της υπαίθρου την κοινωνική, οικονομική, περιβαλλοντική και πολιτισμική αναζωογόνηση των μητροπολιτικών κέντρων, των πόλεων και των ευρύτερων περιαστικών περιοχών τους και ιδίως αυτών που παρουσιάζουν προβλήματα κοινωνικής συνοχής, παραγωγικής ή δημογραφικής εγκατάλειψης, περιβαλλοντικής υποβάθμισης και ποιότητας ζωής την ολοκληρωμένη ανάπτυξη, ανάδειξη και προστασία των νησιών, των ορεινών και των παραμεθόριων περιοχών της χώρας και ιδιαίτερα την ενίσχυση του δημογραφικού και πληθυσμιακού τους ισοζυγίου, τη διατήρηση και ενθάρρυνση των παραδοσιακών παραγωγικών κλάδων τους και της παραγωγικής πολυμορφίας τους, τη βελτίωση της πρόσβασής τους σε βασικές τεχνικές και κοινωνικές υποδομές, καθώς και την προστασία των φυσικών και των πολιτιστικών τους πόρων τη συστηματική προστασία, αποκατάσταση, διατήρηση και ανάδειξη των περιοχών, οικισμών, τοπίων, που διαθέτουν στοιχεία φυσικής, πολιτιστικής και αρχιτεκτονικής κληρονομιάς τη συντήρηση, αποκατάσταση και ολοκληρωμένη διαχείριση των δασών, των αναδασωτέων περιοχών και των αγροτικών

εκτάσεων την ορθολογική αξιοποίηση και την ολοκληρωμένη διαχείριση των υδάτινων πόρων το συντονισμός των δημόσιων προγραμμάτων και των έργων που έχουν χωροταξικές επιπτώσεις και τέλος, τη συστηματική πληροφόρηση, τον αποτελεσματικό διάλογο και την προώθηση στρατηγικών συμμαχιών μεταξύ όλων των παραγωγικών και κοινωνικών συντελεστών που επηρεάζουν άμεσα ή έμμεσα τη διαμόρφωση των επιλογών χωρικής ανάπτυξης (άρθρο 2 Ν.2742/1999).

Από τα παραπάνω προκύπτει ξεκάθαρα ότι τόσο σε διεθνές επιστημονικό επίπεδο, όσο και σε νομοθετικό επίπεδο στην Ελλάδα, υπάρχει συμφωνία ότι ο χωροταξικός σχεδιασμός και ειδικότερα, το επίπεδο σχεδιασμού που αφορά στους Δήμους, δηλαδή, τα Γενικά Πολεοδομικά Σχέδια, συνδέεται με το θέμα της διαχείρισης περιβάλλοντος, τμήμα της οποίας αποτελεί και η διαχείριση των υδατικών πόρων, για την οποία γίνεται ιδιαίτερη μνεία στο παρόν άρθρο.

3. ΤΑ ΕΠΙΠΕΔΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ – ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΠΙΣΗΜΑΝΣΕΙΣ

Πρώτα από όλα, το Γενικό Πλαίσιο Χωροταξικού Σχεδιασμού και Αειφόρου Ανάπτυξης (ΦΕΚ 128Α/3-7-2008) καταγράφει και αξιολογεί τους παράγοντες που επηρεάζουν τη χωρική ανάπτυξη και διάρθρωση του εθνικού χώρου, αποτιμά τις χωρικές επιπτώσεις των διεθνών, Ευρωπαϊκών και εθνικών πολιτικών και προσδιορίζει τις βασικές προτεραιότητες και στρατηγικές κατευθύνσεις για την ολοκληρωμένη χωρική ανάπτυξη και τη βιώσιμη οργάνωση του εθνικού χώρου. Ειδικότερα, παρέχει τις κατευθύνσεις για: τη χωρική οργάνωση των κύριων εθνικών πόλων και αξόνων ανάπτυξης, καθώς και των διεθνών και διαπεριφερειακών εισόδων-πυλών και συνδέσεων της χώρας τη χωρική διάρθρωση των στρατηγικής σημασίας δικτύων υποδομών και μεταφορών, καθώς και των κόμβων διευρωπαϊκής ακτινοβολίας τη χωρική διάρθρωση, εξειδίκευση και παραγωγικότητα των παραγωγικών τομέων το ρόλο των μητροπολιτικών και λοιπών σημαντικών αστικών κέντρων και τη σχέση με την ενδοχώρα τους, τη χωρική διάρθρωση του αστικού δικτύου, καθώς και τη χωρική οργάνωση και ανάπτυξη του ορεινού, αγροτικού, παράκτιου και νησιωτικού χώρου, και άλλων κρίσιμων περιοχών του εθνικού χώρου τη διατήρηση και ανάδειξη της ποικιλομορφίας της υπαίθρου, τη συνετή διαχείριση των φυσικών πόρων, καθώς και τη διατήρηση, ανάδειξη και προστασία της εθνικής φυσικής και πολιτιστικής κληρονομιάς και τέλος, τη γεωγραφική ανασυγκρότηση της χώρας, με σκοπό τη δημιουργία βιώσιμων διοικητικών και αναπτυξιακών ενοτήτων σε διαπεριφερειακό επίπεδο (άρθρο 6 Ν.2742/1999).

Τα Ειδικά Πλαίσια Χωροταξικού Σχεδιασμού και Αειφόρου Ανάπτυξης (Ε.Π.Χ.Σ.Α.Α.) εξειδικεύουν ή συμπληρώνουν τις κατευθύνσεις του Γενικού Πλαισίου Χωροταξικού Σχεδιασμού και Αειφόρου Ανάπτυξης, οι οποίες αφορούν στη χωρική διάρθρωση ορισμένων τομέων ή κλάδων παραγωγικών δραστηριοτήτων εθνικής σημασίας, στη χωρική διάρθρωση δικτύων και υπηρεσιών τεχνικής, κοινωνικής και διοικητικής υποδομής, και σε ορισμένες ειδικές περιοχές του εθνικού χώρου, και ιδίως τις παράκτιες και νησιωτικές περιοχές, τις ορεινές και προβληματικές ζώνες, τις περιοχές που υπάγονται σε διεθνείς ή Ευρωπαϊκές συμβάσεις για την προστασία του περιβάλλοντος, καθώς και σε άλλες ενότητες του εθνικού χώρου που παρουσιάζουν κρίσιμα περιβαλλοντικά, αναπτυξιακά και κοινωνικά προβλήματα (άρθρο 7 Ν.2742/1999). Σήμερα, στην Ελλάδα ισχύουν τα παρακάτω Ειδικά Χωροταξικά Σχέδια.

- Το Σχέδιο για τον Τουρισμό δίνει κατευθύνσεις, και ορίζει κανόνες και κριτήρια για τη χωρική διάρθρωση, οργάνωση και ανάπτυξη του τουρισμού στον Ελληνικό χώρο και τη συσχετίζει με τις απαραίτητες υποδομές. Στόχος του είναι η προστασία και ανάδειξη του φυσικού και πολιτιστικού περιβάλλοντος, ενώ παράλληλα επιδιώκεται η βελτίωση της ανταγωνιστικότητας του τουριστικού προϊόντος, η εξασφάλιση της προστασίας και

της βιωσιμότητας των πόρων που ενδιαφέρουν τον τουρισμό, η ενίσχυση των πολιτικών περιφερειακής ανάπτυξης και η διαμόρφωση πλαισίου κατευθύνσεων για τον υποκείμενο σχεδιασμό (ΦΕΚ 1138Β'/11-6-2009).

- Το Σχέδιο για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (Α.Π.Ε.) καθορίζει τις βασικές κατευθύνσεις και τους γενικούς κανόνες για τη χωροθέτηση έργων Α.Π.Ε. στο σύνολο του εθνικού χώρου, παρέχοντας κατάλληλες κατευθύνσεις για το χωροταξικό σχεδιασμό. Ειδικότερα, υπογραμμίζεται ότι οι μελέτες Γ.Π.Σ./Σ.Χ.Ο.Ο.Α.Π. δεν είναι δυνατόν να εισάγουν περιοριστικές ρυθμίσεις για την ανάπτυξη έργων Α.Π.Ε. πέραν των όσων ορίζονται από το Ειδικό Σχέδιο. Έτσι, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι κανόνες για την χωροθέτηση και οι περιοχές αποκλεισμού τους για τα μικρά υδροηλεκτρικά έργα και τις λοιπές εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας, όπως π.χ. εγκαταστάσεις εκμετάλλευσης ηλιακής ενέργειας, ενέργειας από βιομάζα ή βιοαέριο, γεωθερμικής ενέργειας και νέων μορφών Α.Π.Ε. (ΦΕΚ 1787Β'/8-12-2008).
- Το Σχέδιο για τη Βιομηχανία θέτει ως σκοπό το μετασχηματισμό της χωρικής διάρθρωσης του τομέα της βιομηχανίας προς την κατεύθυνση της βιώσιμης ανάπτυξης και συγκεκριμένα, την προστασία του περιβάλλοντος, την κοινωνική ισότητα και την οικονομική ευημερία. Έτσι, το εν λόγω Σχέδιο περιλαμβάνει κατευθύνσεις που αφορούν στη μακροχωρική οργάνωση της βιομηχανίας και τη χωροθέτησή της σε τοπικό επίπεδο σε σχέση με τις άλλες χρήσεις γης (ΦΕΚ 151ΑΑΠ/13-4-2009).

Τα Περιφερειακά Πλαίσια Χωροταξικού Σχεδιασμού και Αειφόρου Ανάπτυξης (Π.Π.Χ.Σ.Α.Α.) καταγράφουν και αξιολογούν τη θέση κάθε Περιφέρειας στο διεθνή και Ευρωπαϊκό χώρο, το ρόλο της σε εθνικό επίπεδο και σε σύγκριση με άλλες Περιφέρειες, καθώς και τις λειτουργίες διαπεριφερειακού χαρακτήρα που έχει ή είναι δυνατόν να αναπτύξει καταγράφουν και αξιολογούν τους παράγοντες που επηρεάζουν τη μακροπρόθεσμη ανάπτυξη και διάρθρωση του χώρου στο επίπεδο της Περιφέρειας αποτιμούν τις χωρικές επιπτώσεις των Ευρωπαϊκών, εθνικών και περιφερειακών πολιτικών και προγραμμάτων στο επίπεδο κάθε Περιφέρειας και τέλος, προσδιορίζουν τις βασικές προτεραιότητες και τις στρατηγικές επιλογές για την ολοκληρωμένη και βιώσιμη ανάπτυξη του χώρου στο επίπεδο κάθε Περιφέρειας, η οποία θα προωθεί την ισότιμη ένταξή της στο διεθνή, Ευρωπαϊκό και εθνικό χώρο. Ειδικότερα, τα Π.Π.Χ.Σ.Α.Α. υποδεικνύουν τις κατευθύνσεις για τη χωρική διάρθρωση των βασικών δικτύων και υπηρεσιών διοικητικής, κοινωνικής και τεχνικής υποδομής περιφερειακού ενδιαφέροντος, καθώς και τις κατευθύνσεις για τη διοικητική και οικονομική ανασυγκρότηση του περιφερειακού χώρου και ιδίως αυτές που αφορούν στη δημιουργία βιώσιμων διοικητικών και αναπτυξιακών ενοτήτων σε ενδοπεριφερειακό επίπεδο. Επίσης, περιλαμβάνουν τις κατευθύνσεις και τα προγραμματικά πλαίσια για τη χωροθέτηση των βασικών παραγωγικών δραστηριοτήτων του πρωτογενούς, δευτερογενούς και τριτογενούς τομέα, καθώς και τις βασικές κατευθύνσεις για την ισόρροπη και βιώσιμη διάρθρωση του περιφερειακού οικιστικού δικτύου, αλλά και τις βασικές προτεραιότητες για την προστασία, διατήρηση και ανάδειξη της φυσικής και πολιτιστικής κληρονομιάς κάθε Περιφέρειας (άρθρο 8 Ν.2742/1999).

Τα Γενικά Πολεοδομικά Σχέδια, περιλαμβάνοντας ως γεωγραφικό αντικείμενο το σύνολο της εδαφικής επικράτειας ενός Δήμου, καθορίζουν: τις περιοχές επέκτασης του σχεδίου πόλης κάθε οικισμού του Δήμου, χωροθετώντας τις απαραίτητες κοινόχρηστες και κοινωφελείς εκτάσεις για κάθε Πολεοδομική Ενότητα προτείνουν την κυκλοφοριακή οργάνωση του Δήμου με τη σαφή ιεράρχηση του οδικού δικτύου ορίζουν ζώνες χρήσεων γης στον εξωαστικό χώρο του, παρέχοντας κατευθύνσεις για την ανάπτυξη της περιοχής και προστατεύοντας τις δασικές εκτάσεις, τις οικολογικά ευαίσθητες περιοχές, τους αρχαιολογικούς χώρους, τα μνημεία κ.α. και τέλος, προτείνουν και κοστολογούν τα βασικά έργα τεχνικών υποδομών και περιβαλλοντικής προστασίας που κρίνεται ότι είναι ανάγκη να

υλοποιηθούν, έτσι ώστε να πλαισιώσουν το προτεινόμενο αναπτυξιακό μοντέλο για κάθε Δήμο.

Σύμφωνα με τις τεχνικές προδιαγραφές εκπόνησης των Γ.Π.Σ. και Σ.Χ.Ο.Ο.Α.Π. (απόφαση Υ.Π.Ε.Χ.Ω.Δ.Ε. 9572/1845/2000 – ΦΕΚ 209Δ’/7-4-2000), στο Α’ Στάδιο που αφορά στην ανάλυση, διάγνωση και στις προοπτικές ενός Δήμου, περιλαμβάνεται αναφορά εκτός των άλλων στο φυσικό περιβάλλον, στο πολιτιστικό – αρχιτεκτονικό – ιστορικό περιβάλλον, στις υφιστάμενες χρήσεις γης και στη γεωλογική διερεύνηση της περιοχής μελέτης. Στο Β’ Στάδιο, που περιλαμβάνει τις αναλυτικές προτάσεις του χωροταξικού σχεδίου, πραγματοποιείται αναφορά εκτός των άλλων στις χρήσεις γης και στην προστασία του περιβάλλοντος, με σκοπό: την προστασία του περιβάλλοντος και τη βιώσιμη χρήση των φυσικών πόρων την ισόρροπη και αλληλοστηριζόμενη ανάπτυξη του αστικού, περιαστικού και αγροτικού χώρου τη λειτουργικότητα της χωρικής συσχέτισης παραγωγικών ζωνών και ζωνών κατοικίας με βάση και τις ανάγκες της καθημερινής μετακίνησης εργασίας – κατοικίας τη διατήρηση και ανάδειξη της πολιτιστικής, αρχιτεκτονικής και ιστορικής κληρονομιάς και τέλος, τη βελτίωση της ποιότητας ζωής στις πόλεις και στην ύπαιθρο. Ειδικότερα και με βάση τα παραπάνω, τα Γ.Π.Σ. χρειάζεται να καταγράψουν, εκτός των άλλων, τα φυσικά συστήματα, να μελετήσουν τα αξιόλογα οικοσυστήματα, τις ήδη προστατευόμενες περιοχές και τα φυσικά τοπία, να κάνουν αναφορά στην υφιστάμενη κατάσταση του περιβάλλοντος, αλλά και στις υφιστάμενες επιπτώσεις της οικιστικής ανάπτυξης και των οικονομικών δραστηριοτήτων (ρύπανση, κορεσμός, κατανάλωση γης, υδατικό ισοζύγιο), ενώ απαραίτητη είναι και η παρουσίαση των κρίσιμων περιβαλλοντικά παραμέτρων για το σχεδιασμό της μελλοντικής ανάπτυξης του Δήμου. Τέλος, στα πλαίσια της πρότασης του χωροταξικού σχεδίου, είναι απαραίτητο, εκτός των άλλων, η αναφορά σε βασικά δίκτυα υποδομής της περιοχής, τα οποία αφορούν σε μεταφορικό δίκτυο, ενέργεια, τηλεπικοινωνίες, ύδρευση, αποχέτευση, διαχείριση υγρών και στερεών αποβλήτων κ.α.

Συνεπώς, προκύπτει ξεκάθαρα ότι η οργανωμένη οικιστική ανάπτυξη προϋποθέτει και είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τα τεχνικά δίκτυα υποδομών και ως αναπτυξιακό εργαλείο, ένα Γ.Π.Σ. θα πρέπει να προτείνει βιώσιμες λύσεις π.χ. στη διαχείριση υγρών και στερεών αποβλήτων, στη διαχείριση των υδατικών πόρων του Δήμου, αφού είναι προφανές ότι η οικιστική ανάπτυξη θα προκαλέσει πιέσεις στους φυσικούς πόρους, οπότε χρειάζεται η διαχείριση του ελέγχου της περιβαλλοντικής ρύπανσης. Αυτές οι διαχειριστικές προτάσεις, εξάλλου, προβλέπονται και από τις τεχνικές προδιαγραφές εκπόνησης μελετών Γ.Π.Σ., όπως διαπιστώσαμε παραπάνω. Συμπερασματικά, όπως τα χωροταξικά σχέδια των Δήμων (Γ.Π.Σ.) συμβάλλουν έμμεσα, θετικά ή αρνητικά στη διαχείριση των παράκτιων ζωνών, όταν οι Δήμοι εντοπίζονται σε παραλιακές περιοχές (Οικονόμου και Καλκοπούλου, 2009), αντίστοιχα οι προτάσεις τους επηρεάζουν έμμεσα και τη διαχείριση των υδατικών πόρων και των υδραυλικών έργων.

4. ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΓΕΝΙΚΑ ΠΟΛΕΟΔΟΜΙΚΑ ΣΧΕΔΙΑ

Μετά από όλα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, έχει ενδιαφέρον να εξετάσουμε ορισμένα εγκεκριμένα Γενικά Πολεοδομικά Σχέδια, για να διαπιστώσουμε αν επιβεβαιώνεται στην πράξη η στενή σχέση της χωροταξίας με το περιβάλλον και τη διαχείριση φυσικών πόρων. Παραθέτουμε και σχολιάζουμε, λοιπόν, τα ακόλουθα παραδείγματα εγκεκριμένων Γενικών Πολεοδομικών Σχεδίων διαφόρων Δήμων της χώρας με ποικίλα χαρακτηριστικά, όπως προκύπτουν από τα ΦΕΚ θεσμοθέτησής τους, αφού μόνο όσα αναφέρονται σε αυτό είναι πιθανό να υλοποιηθούν στο μέλλον (πολλές φορές στα κείμενα των χωροταξικών μελετών αναφέρονται διάφορες προτάσεις π.χ. για τη διαχείριση των φυσικών πόρων ενός Δήμου, αλλά όταν αυτές δεν ενσωματώνονται στο κείμενο του ΦΕΚ, παραμένουν απλά προτάσεις με ελάχιστες πιθανότητες υλοποίησης στην πράξη):

4.1. ΓΕΝΙΚΟ ΠΟΛΕΟΔΟΜΙΚΟ ΣΧΕΔΙΟ ΔΗΜΟΥ ΚΑΤΕΡΙΝΗΣ

Σύμφωνα με τα στοιχεία που παρουσιάζονται για το εγκεκριμένο Γ.Π.Σ. Κατερίνης (Απ. Γ.Γ.Π. 5461/2010, ΦΕΚ 414ΑΑΠ/4-10-2010), προτείνεται προγραμματικός πληθυσμός για όλους τους οικισμούς του Δήμου ίσος με 82.235 κατοίκους με χρονικό ορίζοντα δεκαπενταετίας (56.434 κάτοικοι, Ε.Σ.Υ.Ε., 2001), ενώ προβλέπονται 5.319 στρέμματα επεκτάσεων σχεδίου πόλης (3.999 στρέμματα στην πόλη της Κατερίνης και τα υπόλοιπα σε γειτονικούς οικισμούς), καθώς και 1.146 στρέμματα για παραθεριστική κατοικία και τουρισμό στον παραλιακό οικισμό «Ολυμπιακή Ακτή». Επίσης, υπογραμμίζεται ότι συνολικά για πολεοδόμηση περιλαμβάνονται 8.175 στρέμματα, καθώς εκτός από τις ως άνω περιοχές των επεκτάσεων, υπάρχουν και οριοθετημένες εντός οικισμών περιοχές που δεν διαθέτουν ρυμοτομικό σχέδιο και χαρακτηρίζονται από αραιή δόμηση και συνήθως, υποτυπώδη δίκτυα υποδομών. Αν εξαιρέσουμε την αναφορά στην οργάνωση του κύριου οδικού δικτύου στο Δήμο Κατερίνης, για τα λοιπά δίκτυα υποδομών και ειδικά για αυτά που έχουν άμεση σχέση με τη διαχείριση υδατικών πόρων, πραγματοποιούνται μόνο οι ακόλουθες περιληπτικές επισημάνσεις (στις 39 σελίδες του κειμένου του ΦΕΚ):

- Στον τομέα της ύδρευσης η σημερινή κατάσταση του δικτύου ύδρευσης του Δήμου κρίνεται ικανοποιητική. Προτείνεται ενιαίος και συνολικός τρόπος διαχείρισης του δικτύου σε ολόκληρο το Δήμο, καθώς και σταδιακή αντικατάσταση στο μέλλον του παλαιού τμήματος του δικτύου.
- Ως προς το δίκτυο αποχέτευσης προβλέπεται από το Γ.Π.Σ. η επέκταση του υπάρχοντος δικτύου και η ολοκλήρωσή του μέσα στην πόλη της Κατερίνης, κάτι που ήδη έχει ξεκινήσει να υλοποιεί η δημοτική αρχή. Ο βιολογικός καθαρισμός του Δήμου μπορεί να εξυπηρετήσει την ευρύτερη περιοχή αφού ήδη έχει κατασκευαστεί κεντρικός αγωγός προς την Ολυμπιακή Ακτή και το Νέο Κεραμίδι μέχρι το νοσοκομείο. Έτσι, προτείνεται η σταδιακή κατασκευή δικτύου αποχέτευσης για τους υπόλοιπους επτά οικισμούς του Δήμου, καθώς και η επέκταση του κεντρικού αγωγού προς Σβορώνο – Νεοκαισάρεια και Γανόχωρα – Άνω Άγιο Ιωάννη.
- Προτείνεται επίσης η επέκταση του δικτύου άρδευσης σε όλα τα αγροκτήματα, καθώς στο Δήμο Κατερίνης οι αρδευόμενες εκτάσεις αποτελούν το μεγαλύτερο ποσοστό των καλλιεργούμενων εκτάσεων σε όλα τα αγροκτήματα, καθώς και η μελλοντική σταδιακή αντικατάσταση του παλαιού δικτύου.
- Στον τομέα της διαχείρισης απορριμμάτων ο Δήμος Κατερίνης διαθέτει ΧΥΤΑ, ο οποίος λειτουργεί επιτυχώς και πρόσφατα επεκτάθηκε. Επίσης, περιβαλλοντικά προβλήματα υπάρχουν σε δύο Χώρους Ανεξέλεγκτης Διάθεσης Απορριμμάτων (ΧΑΔΑ), που βρίσκονται νότια της πόλης της Κατερίνης προς την Νέα Έφεσο, η λειτουργία των οποίων έχει διακοπεί, ενώ συγχρόνως έχει πραγματοποιηθεί η δημοπράτηση της μελέτης για την πλήρη αποκατάσταση της περιοχής.

4.2. ΓΕΝΙΚΟ ΠΟΛΕΟΔΟΜΙΚΟ ΣΧΕΔΙΟ ΔΗΜΟΥ ΛΑΡΙΣΑΙΩΝ

Σύμφωνα με τα στοιχεία που παρουσιάζονται για το εγκεκριμένο Γ.Π.Σ. Δήμου Λαρισαίων (Απ. Γ.Γ.Π. 5625/59708/2009, ΦΕΚ 523ΑΑΠ/9-10-2009), προτείνονται νέες επεκτάσεις σχεδίου πόλης εμβαδού 11.078 στρεμμάτων για την κάλυψη στο μέλλον τόσο των οικιστικών αναγκών, όσο και των αναγκών σε χρήσεις και δραστηριότητες χονδρεμπορίου, ενώ το προγραμματικό πληθυσμιακό μέγεθος ανέρχεται σε 169.223 κατοίκους (146.195 κάτοικοι, Ε.Σ.Υ.Ε. 2011). Μετά τις σχετικά πιο αναλυτικές αναφορές σε προτάσεις για συγκοινωνιακά ζητήματα και θέματα μεταφορών (περιμετρική οδός Λάρισας, υπερτοπικοί οδικοί άξονες, σιδηρόδρομος, αεροδρόμιο, σταθμοί υπεραστικών λεωφορείων, τραμ, δίκτυο

πεζόδρομων-ποδηλατόδρομων, στάθμευση), οι μοναδικές προτάσεις που έχουν σχέση με τη διαχείριση υδατικών πόρων παρατίθενται ως ακολούθως (εντός των 12 σελίδων του κειμένου του ΦΕΚ):

- Οι περιοχές των προτεινόμενων επεκτάσεων θα πρέπει να συμπεριληφθούν στον προγραμματισμό της ΔΕΥΑΛ. Κατά προτεραιότητα θα πρέπει να αντιμετωπισθούν οι ανάγκες αποχέτευσης της περιοχής χονδρεμπορίου στην Ε.Ο. Ιωαννίνων, εφόσον η έκταση είναι όμορη της ζώνης προστασίας του Πηνειού.
- Για τον υφιστάμενο βιολογικό καθαρισμό ισχύουν όσα καθορίζονται στην παράγραφο Π.1-Π.2. Επιπλέον, επιβάλλεται να προγραμματιστεί η χωροθέτηση νέου (ή νέων), κατόπιν μελέτης, σε θέση που θα εξυπηρετεί και την ευρύτερη περιοχή ενόψει και της διεύρυνσης και των ορίων του Δήμου κατά την επικείμενη διοικητική αναδιάρθρωση. Σε κάθε περίπτωση σκόπιμο είναι να επιδιώκεται η απομάκρυνση του υφιστάμενου.

4.3. ΓΕΝΙΚΟ ΠΟΛΕΔΟΜΙΚΟ ΣΧΕΔΙΟ ΔΗΜΟΥ ΜΟΥΔΑΝΙΩΝ

Σύμφωνα με τα στοιχεία που παρουσιάζονται για το εγκεκριμένο Γ.Π.Σ. Δήμου Μουδανίων (Απ. Γ.Γ.Π. 10545/2008, ΦΕΚ 118ΑΑΠ/3-4-2008), προτείνονται νέες επεκτάσεις σχεδίου πόλης εμβαδού 4.559 στρεμμάτων για την κάλυψη στο μέλλον τόσο των οικιστικών αναγκών μόνιμου και εποχικού πληθυσμού, ενώ το προγραμματικό πληθυσμιακό μέγεθος ανέρχεται σε 26.319 κατοίκους (17.032 κάτοικοι, Ε.Σ.Υ.Ε. 2001). Όσον αφορά στα τεχνικά δίκτυα υποδομών που έχουν σχέση με τη διαχείριση των υδατικών πόρων, προτείνονται τα παρακάτω (στις 59 σελίδες του κειμένου του ΦΕΚ):

- Η διερεύνηση εναλλακτικών τρόπων υδροδότησης των αστικών και γεωργικών χρήσεων του ΟΤΑ κατόπιν ειδικής μελέτης.
- Η κατασκευή σύγχρονου εξωαστικού δικτύου και εγκαταστάσεων ύδρευσης των οικισμών και άρδευσης των καλλιεργειών, κατόπιν ειδικής μελέτης.
- Μέτρα ορθολογικής χρήσης του νερού και σχεδιασμός δικτύων και εγκαταστάσεων με στόχο τη βιωσιμότητα των υδατικών αποθεμάτων.
- Ολοκλήρωση και αναβάθμιση εξωαστικού δικτύου αποχέτευσης οικισμών και παραγωγικών ζωνών, και σύνδεσης με Μονάδες Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων.
- Αναβάθμιση υφιστάμενων Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων (Ε.Ε.Λ.) Ν.Μουδανίων, Ν.Ποτίδαιας με δυνατότητα αποδοχής και λυμάτων παραθεριστικών περιοχών.
- Νέες μονάδες Ε.Ε.Λ. των λοιπών οικισμών των ΟΤΑ.
- Διαχείριση απορριμμάτων ΟΤΑ σύμφωνα με ολοκληρωμένο σχέδιο διαχείρισης απορριμμάτων για το Νομό Χαλκιδικής, κατόπιν ειδικής μελέτης.
- Χωροθέτηση χώρου απόθεσης αδρανών υλικών, κατόπιν ειδικής μελέτης.

4.4. ΓΕΝΙΚΟ ΠΟΛΕΔΟΜΙΚΟ ΣΧΕΔΙΟ ΔΗΜΟΥ ΜΥΤΙΛΗΝΗΣ

Σύμφωνα με τα στοιχεία που παρουσιάζονται για το εγκεκριμένο Γ.Π.Σ. Δήμου Μυτιλήνης (Απ. Γ.Γ.Π. 26178/507/Α.Φ.5.6.1/2007, ΦΕΚ 328ΑΑΠ/30-7-2007), προτείνονται νέες επεκτάσεις σχεδίου πόλης εμβαδού 4.092 στρεμμάτων για την κάλυψη στο μέλλον τόσο των οικιστικών αναγκών το προγραμματικού πληθυσμιακού μεγέθους των περίπου 41.000 κατοίκων (27.247 κάτοικοι, Ε.Σ.Υ.Ε. 2001). Καταρχήν, επισημαίνεται ότι στο ΦΕΚ έγκρισης του Γ.Π.Σ. δεν υπάρχουν οι πίνακες με τα προτεινόμενα έργα υποδομών, τα οποία προτείνονται να κατασκευαστούν για να υποστηρίξουν την οικιστική ανάπτυξη. Όσον αφορά στα τεχνικά δίκτυα υποδομών που έχουν σχέση με τη διαχείριση των υδατικών πόρων, προτείνονται τα παρακάτω (στις 16 σελίδες του κειμένου του ΦΕΚ):

- Απαιτείται η ολοκλήρωση της αντικατάστασης του πεπαλαιωμένου δικτύου ύδρευσης της πόλης της Μυτιλήνης.
- Για την κάλυψη των αναγκών ύδρευσης του πολεοδομικού συγκροτήματος Μυτιλήνης προβλέπεται η κατασκευή εξωχειμάρριας λιμνοδεξαμενής στην περιοχή Αγριλιάς Κρατήγου.
- Απαιτείται η κατασκευή νέας μονάδας επεξεργασίας λυμάτων και δίκτυο αποχέτευσης για την κάλυψη των αναγκών της νότιας περιοχής του πολεοδομικού συγκροτήματος Μυτιλήνης.
- Απαιτείται η ολοκλήρωση του αποχετευτικού δικτύου της πόλης και της σύνδεσης των βορίων οικισμών του Δήμου με την υφιστάμενη μονάδα επεξεργασίας λυμάτων στη θέση «Καρά Τεπέ».

4.5. ΓΕΝΙΚΟ ΠΟΛΕΟΔΟΜΙΚΟ ΣΧΕΔΙΟ ΔΗΜΟΥ ΑΡΝΑΙΑΣ

Σύμφωνα με τα στοιχεία που παρουσιάζονται για το εγκεκριμένο Γ.Π.Σ. Δήμου Αρναίας (Απ. Γ.Γ.Π. 12217/2010, ΦΕΚ 534ΑΑΠ/14-12-2010), προτείνονται νέες επεκτάσεις σχεδίου πόλης εμβαδού 1.975 στρεμμάτων για την κάλυψη στο μέλλον τόσο των οικιστικών αναγκών μόνιμου και εποχικού πληθυσμού, ενώ το προγραμματικό πληθυσμιακό μέγεθος ανέρχεται σε 7.110 κατοίκους και 1.173 εποχικούς κατοίκους (6.183 κάτοικοι, Ε.Σ.Υ.Ε. 2001). Όσον αφορά στα τεχνικά δίκτυα υποδομών που έχουν σχέση με τη διαχείριση των υδατικών πόρων, προτείνονται τα παρακάτω (στις 25 σελίδες του κειμένου του ΦΕΚ):

- Προτείνεται η ολοκληρωμένη κάλυψη των οικισμών και των επεκτάσεών τους με δίκτυο ύδρευσης, καθώς και η κατασκευή ολοκληρωμένου δικτύου αποχέτευσης και όμβριων υδάτων, το οποίο θα καλύπτει τους οικισμούς και τις επεκτάσεις. Βραχυπρόθεσμα προβλέπεται να δημιουργηθεί μονάδα επεξεργασίας λυμάτων (βιολογικός καθαρισμός) στην περιοχή του Δ.Δ. Βαρβάρας (με φυσικό σύστημα επεξεργασίας και διάθεσης λυμάτων), ενώ υπό μελέτη βρίσκεται η διαδικασία δημιουργίας κεντρικών εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων στο Δ.Δ. Παλαιοχωρίου, για την εξυπηρέτηση των οικισμών Αρναία, Παλαιοχώρι και Νεοχώρι. Αμφότερες οι θέσεις των Ε.Ε.Λ. αποτυπώνονται ενδεικτικά στο Χάρτη Π.2.
- Για όλες τις οικιστικές περιοχές Α΄ και Β΄ κατοικίας προτείνεται η κάλυψή τους από τα δίκτυα ύδρευσης και αποχέτευσης, μαζί με τις προτεινόμενες περιοχές επεκτάσεων, και η συνακόλουθη επέκταση του ενεργειακού και τηλεπικοινωνιακού δικτύου στις περιοχές των νέων εντασσόμενων οικιστικών περιοχών. Το ίδιο ισχύει και για το δίκτυο όμβριων υδάτων. Απαραίτητη θεωρείται η κατασκευή κεντρικής μονάδας επεξεργασίας των αστικών λυμάτων (βιολογικός καθαρισμός) σε επίπεδο Δήμου, που βρίσκεται στο στάδιο της μελέτης σε θέση του Δ.Δ. Παλαιοχωρίου. Υπό μελέτη είναι και οι εγκαταστάσεις ΧΥΤΑ του Δήμου Αρναίας που προβλέπεται να δημιουργηθούν σε θέση βόρεια του οικισμού Αρναίας (ή σε αντίθετη περίπτωση σύμφωνα με τα οριζόμενα στις Γενικές Διατάξεις) που θα λύσουν το πρόβλημα της ανεξέλεγκτης απόθεσης απορριμμάτων.
- Επιπλέον, στα πλαίσια της εκπόνησης των μελετών πολεοδόμησης των επεκτάσεων θα πρέπει να συνταχθούν παράλληλα μελέτες υδρογεωλογικές-οριοθέτησης των ρεμάτων και γεωτεχνικές μελέτες, που θα προτείνουν τους όρους και απαγορεύσεις δόμησης σε συγκεκριμένες αποστάσεις από το ρέμα του Χαβρία και τα μικρότερα ρέματα, και θα ελέγχουν την αντοχή και παραμορφωσιμότητα των εδαφών (ΕΑΚ 2000 και 2004) των προς πολεοδόμηση περιοχών.

4.6. ΓΕΝΙΚΟ ΠΟΛΕΟΔΟΜΙΚΟ ΣΧΕΔΙΟ ΔΗΜΟΥ ΝΑΟΥΣΑΣ

Σύμφωνα με τα στοιχεία που παρουσιάζονται για το εγκεκριμένο Γ.Π.Σ. Δήμου Νάουσας (Απ. Γ.Γ.Π. 5982/2010, ΦΕΚ 289ΑΑΠ/23-7-2010), προτείνονται νέες επεκτάσεις σχεδίου πόλης εμβαδού 1.975 στρεμμάτων για την κάλυψη στο μέλλον των οικιστικών αναγκών, ενώ το προγραμματικό πληθυσμιακό μέγεθος ανέρχεται σε 28.000 κατοίκους (20.176 κάτοικοι, Ε.Σ.Υ.Ε. 2001). Όσον αφορά στα τεχνικά δίκτυα υποδομών που έχουν σχέση με τη διαχείριση των υδατικών πόρων, προτείνονται τα παρακάτω (στις 36 σελίδες του κειμένου του ΦΕΚ):

- Ύδρευση. Όλοι οι οικισμοί έχουν δίκτυο ύδρευσης με ικανοποιητική επάρκεια. Ο Δήμος χαρακτηρίζεται πλεονασματικός αναφορικά με τη διαθεσιμότητα νερού. Απαιτείται έλεγχος και πιθανή αντικατάσταση παλαιών τμημάτων των δικτύων.
- Αποχέτευση ακαθάρτων. Σύνδεση του δικτύου αποχέτευσης της πόλης της Νάουσας στο σύνολό του, με τη μονάδα βιολογικού καθαρισμού.
- Σύνταξη μελετών για την κατασκευή δικτύων αποχέτευσης ακαθάρτων στους υπόλοιπους οικισμούς όπως και μονάδων επεξεργασίας ακαθάρτων.
- Δημιουργία δικτύου ακαθάρτων και επεξεργασίας λυμάτων στην Ζώνη Παραγωγικών Δραστηριοτήτων.
- Κατασκευή δικτύου ομβρίων στις επεκτάσεις της Στενημάχου και του Αγίου Παύλου καθώς και στις βασικές οδούς των οικισμών που δεν έχουν δίκτυο, όπως επίσης και στη Β.Ε.Π.Ε.
- Εκπόνηση μελετών οριοθέτησης για την προστασία των ρεμάτων σε εντός σχεδίου περιοχές.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Στο πρόσφατο παρελθόν μελετήθηκε η σχέση ανάμεσα στο χωροταξικό σχεδιασμό και στη διαχείριση παράκτιων ζωνών, όπως τεκμηριώνεται από τα Γενικά Πολεοδομικά Σχέδια Δήμων, οι οποίοι είναι ενταγμένοι εξολοκλήρου ή στο μεγαλύτερο τμήμα τους σε παράκτιες περιοχές (Οικονόμου και Καλκοπούλου, 2009). Σύμφωνα με τα όσα παρουσιάζονται στις προηγούμενες παραγράφους, τα ως άνω χωροταξικά σχέδια των Δήμων επηρεάζουν άμεσα τη διαχείριση των υδατικών πόρων, μέσω των χωροταξικών προτάσεών τους. Όμως, σύμφωνα με τη διεθνή επιστημονική βιβλιογραφία, αλλά και την Ελληνική νομοθεσία ως προς τις προδιαγραφές των Γ.Π.Σ. και γενικότερα, ως προς τη σχέση των χωροταξικού σχεδιασμού και της διαχείρισης περιβάλλοντος, θα έπρεπε τα ως άνω Γ.Π.Σ. να περιλαμβάνουν γενικές προτάσεις και για τη διαχείριση των υδατικών πόρων. Ενδεικτικά αναφέρονται ως παραδείγματα τα ακόλουθα θέματα: η ανάγκη εκπόνησης ειδικών μελετών για τη διαχείριση των υδατικών πόρων, η κοστολόγηση και η δυνατότητα υλοποίησης των επεκτάσεων των δικτύων ύδρευσης και αποχέτευσης, η ενδεικτική έστω χωροθέτηση νέων γεωτρήσεων και η λήψη μέτρων για την προστασία τους από γειτονικές χρήσεις γης και δραστηριότητες, η ανάγκη καλύτερης λειτουργίας ή επέκτασης μίας υφιστάμενης Εγκατάστασης Επεξεργασίας Λυμάτων και το σχετικό κόστος, η βέλτιστη διαχείριση του αρδευτικού νερού κ.α.

Όμως, στα Γ.Π.Σ. που μελετήθηκαν στην παράγραφο 4, δεν υπάρχουν παρόμοιες προτάσεις, αλλά αντίθετα, η αναφορά σε δίκτυα υποδομών, αν εξαιρέσουμε τον τομέα των μεταφορών, είναι ιδιαίτερα σύντομη και περιληπτική, και οι προτάσεις τους πολύ γενικόλογες, όπως αναφέρεται ενδεικτικά παρακάτω: δεν πραγματοποιείται αναφορά στην προτεραιότητα αντικατάστασης παλαιών τμημάτων του δικτύου ύδρευσης, ούτε στο κόστος της προτείνεται κάλυψη όλων των αγροκτημάτων ενός Δήμου με δίκτυα άρδευσης, αλλά δεν διευκρινίζονται οι πηγές προέλευσης του αρδευτικού νερού, ούτε η πιθανή ανάγκη καταπολέμησης της σπατάλης του στην κατανάλωσή του, μέσω π.χ. αλλαγής ορισμένων καλλιεργειών ή μεθόδων άρδευσης προτείνεται η μεταφορά της

Ε.Ε.Α. Λάρισα, χωρίς να παρουσιάζονται επιχειρήματα για ένα τόσο δαπανηρό έργο απουσιάζει έστω και ένας στοιχειώδης υπολογισμός των μελλοντικών παροχών που θα απαιτηθούν για κάθε οικισμό, προκειμένου να καλυφθούν οι μελλοντικές υδρευτικές του ανάγκες, έτσι ώστε να διαπιστώνεται η ανάγκη νέων γεωτρήσεων και να επισημαίνονται οι πιθανές περιοχές ανόρυξης τους και τα μέτρα προστασίας τους και τέλος, πραγματοποιείται γενική αναφορά στην ανάγκη λήψης μέτρων για την ορθολογική χρήση του νερού, αγνοώντας ότι η ρύθμιση των χρήσεων γης αποτελεί εργαλείο πρόληψης για το εν λόγω θέμα π.χ. με μέτρα περιορισμού της εκτός σχεδίου δόμησης κ.α. Επίσης, δεν προκύπτει αν το κόστος και η δυνατότητα κατασκευής των απαραίτητων μελλοντικών έργων υποδομών αποτελούν κριτήρια που συμβάλλουν στη χωροθέτηση των νέων οικιστικών περιοχών, με την ένταξή τους σε σχέδιο πόλης δεν συσχετίζεται η επιφάνεια των νέων προτεινόμενων οικιστικών περιοχών με το κόστος υλοποίησης των απαιτούμενων έργων υποδομών και ιδιαίτερα των έργων ύδρευσης-αποχέτευσης-επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, γεγονός που ενδεχομένως σε κάποιες περιπτώσεις να αποδείκνυε ότι η επιφάνεια των επεκτάσεων σχεδίου πόλης είναι υπερβολικά μεγάλη δεν αναφέρονται συγκεκριμένες προτάσεις, οι οποίες θα καθιστούσαν στην πράξη ένα Γ.Π.Σ. ως αναπτυξιακό εργαλείο για ένα Δήμο, καθώς και ως εργαλείο μέγιστης συμβολής στην προστασία του περιβάλλοντος π.χ. δεν καλύπτονται ζητήματα καλύτερης διαχείρισης των στερεών αποβλήτων, θέματα βέλτιστης λειτουργίας μίας Εγκατάστασης Επεξεργασίας Λυμάτων με την επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων λυμάτων για άρδευση ή συναφείς σκοπούς και τη διαχείριση της βιολογικής ιλύος, η οποία σήμερα καταλήγει σε πολλές περιπτώσεις σε Χώρους Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων ή συσσωρεύονται στα γήπεδα των Ε.Ε.Α. κ.α.

Με την απουσία, λοιπόν, προτάσεων για τη διαχείριση των φυσικών πόρων και την προστασία του περιβάλλοντος μέσω βέλτιστης διαχείρισης εγκαταστάσεων αντιρρύπανσης, τα Γ.Π.Σ. καταλήγουν να εκφυλλίζονται σε αμιγώς χωροταξικά σχέδια, χωρίς προεκτάσεις διαχείρισης περιβάλλοντος και κατ' αυτόν τον τρόπο, δεν συμβάλλουν στην προσπάθεια κατάκτησης των στόχων της βιώσιμης ανάπτυξης. Η διερεύνηση των αιτιών για την απουσία προτάσεων διαχείρισης περιβάλλοντος, σχετικές με τις αναγκαίες τεχνικές υποδομές, στις μελέτες Γ.Π.Σ. δεν αποτελεί στόχο αυτού του άρθρου. Όμως, επί αυτού του θέματος αξίζει να αναφερθεί ότι οι μελέτες αυτές εκπονούνται από πολεοδόμους-χωροτάκτες και στις ομάδες μελέτης δεν είναι υποχρεωτική η συμμετοχή άλλων ειδικοτήτων. Αντίθετα, ως σύμβουλοι σε μελέτες Γ.Π.Σ. έχουν ζητηθεί να συμμετέχουν κυρίως συγκοινωνιολόγοι, αρχαιολόγοι, κοινωνιολόγοι και περιβαλλοντολόγοι στις ομάδες μελέτης, χωρίς όμως να προβλέπονται ιδιαίτερες αμοιβές σε αυτούς, με ό,τι αυτό συνεπάγεται για την αποτελεσματική τελικά συμμετοχή τους.

Τέλος, υπογραμμίζεται ότι για τα ως άνω Γ.Π.Σ. δεν υπήρξε περιβαλλοντική αξιολόγησή τους, μέσω της διαδικασίας της Στρατηγικής Περιβαλλοντικής Εκτίμησης, η οποία θεσμοθετήθηκε στην Ελλάδα μόλις το Σεπτέμβριο του 2006 και εξαίρεσε από την υποχρεωτική εκπόνηση Στρατηγικής Μελέτης Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων τα υπό εκπόνηση Γ.Π.Σ. Ακόμη και αν τα συγκεκριμένα Γ.Π.Σ. που εξετάσαμε υπήρχε η δυνατότητα να υπαχθούν σε διαδικασία Σ.Π.Ε., είναι και πάλι αμφίβολο κατά πόσο η Σ.Μ.Π.Ε. θα συνέβαλε θετικά στην ενσωμάτωση περισσότερων περιβαλλοντικών παραμέτρων στα προτεινόμενα σχέδια (Oikonomou et.al., 2011). Ταυτόχρονα, το ζήτημα γίνεται ακόμα πιο σύνθετο, αν ληφθεί υπόψη ότι η χώρα μας ακόμα δεν διαθέτει διαχειριστικά σχέδια για τους υδατικούς πόρους, αλλά και το γεγονός ότι πληροφορίες που σχετίζονται με τους υδατικούς πόρους π.χ. ακριβής θέση γεωτρήσεων, παροχή, γεωμετρικά και υδραυλικά χαρακτηριστικά δικτύων κ.λπ. δεν είναι διαθέσιμα ή είναι αναξιόπιστα, καθώς δεν έχουν τηρηθεί βάσεις δεδομένων από τους Δήμους, ιδιαίτερα αυτούς με σχετικά μικρό πληθυσμιακό μέγεθος. Ως μία άμεση λύση του ζητήματος, κρίνεται σκόπιμη η συμμετοχή υδραυλικών μηχανικών σε μελέτες Γ.Π.Σ., με διακριτό όμως ρόλο και μελετητικό αντικείμενο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Απόφαση Γενικού Γραμματέα Περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας 5461/2010. *Έγκριση Γενικού Πολεοδομικού Σχεδίου του Δήμου Κατερίνης Ν.Πιερίας*. ΦΕΚ 414ΑΑΠ/4-10-2010.
- Απόφαση Γενικού Γραμματέα Περιφέρειας Θεσσαλίας 5625/59708/2009. *Έγκριση Αναθεώρησης και Επέκτασης Γενικού Πολεοδομικού Σχεδίου Δήμου Λαρισαίων*. ΦΕΚ 523ΑΑΠ/9-10-2009.
- Απόφαση Γενικού Γραμματέα Περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας 10545/2008. *Έγκριση του Γενικού Πολεοδομικού Σχεδίου του Δήμου Μουδανίων Ν.Χαλκιδικής*. ΦΕΚ 118ΑΑΠ/3-4-2008.
- Απόφαση Γενικού Γραμματέα Περιφέρειας Βορείου Αιγαίου 26178/507/Α.Φ.5.6.1/2008. *Έγκριση Αναθεώρησης – Επέκτασης Γενικού Πολεοδομικού Σχεδίου Δήμου Μυτιλήνης Ν.Λέσβου*. ΦΕΚ 328ΑΑΠ/30-7-2007.
- Απόφαση Γενικού Γραμματέα Περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας 12217/2010. *Έγκριση του Γενικού Πολεοδομικού Σχεδίου του Δήμου Αρναίας Ν.Χαλκιδικής*. ΦΕΚ 534ΑΑΠ/14-12-2010.
- Απόφαση Γενικού Γραμματέα Περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας 5982/2010. *Έγκριση του Γενικού Πολεοδομικού Σχεδίου του Δήμου Νάουσας Ν.Ημαθίας*. ΦΕΚ 289ΑΑΠ/23-7-2010.
- Blowers, A. 1992. *Sustainable Urban Development: the Political Prospects*. Sustainable Development and Urban Form (ed M.J. Breheny). Pion Limited, London.
- Davidson, F. 1996. *Planning for performance: requirements for sustainable development*. Habitat INTL, 20 (3), 445-462.
- Νόμος 2508/1997. *Βιώσιμη οικιστική ανάπτυξη των πόλεων και οικισμών της χώρας και άλλες διατάξεις*. ΦΕΚ 124Α'/13-5-1997.
- Νόμος 2742/1999 *Χωροταξικός σχεδιασμός και αειφόρος ανάπτυξη και άλλες διατάξεις*. ΦΕΚ 207Α'/7-10-1999.
- Οικονόμου, Ε. και Καλκοπούλου Κ. 2009. *Η συμβολή του χωροταξικού σχεδιασμού μέσω των Γενικών Πολεοδομικών Σχεδίων στη Διαχείριση Παράκτιων Ζωνών*. Κοινό Συνέδριο 11^ο της Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης (ΕΥΕ) και 7^ο της Ελληνικής Επιτροπής Διαχείρισης Υδατικών Πόρων.
- Οικονομου, Ε.Κ., Yiannakopoulou, E. and Guitonas A. 2011. *Assessment and evaluation of strategic impacts of the Development Plan of Amfipolis Municipality, Region of Central Macedonia*. e-Proc. 3rd Int. Conf. on Environmental Management, Engineering, Planning and Economics & SECOTOX Conf.
- Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε. 2008. *Γενικό Πλαίσιο Χωροταξικού Σχεδιασμού και Αειφόρου Ανάπτυξης*. ΦΕΚ 128Α'/3-7-2008.
- Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε. 2009. *Ειδικό Πλαίσιο Χωροταξικού Σχεδιασμού και Αειφόρου Ανάπτυξης για τον Τουρισμό*. ΦΕΚ 1138Β'/11-6-2009.
- Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε. 2008. *Ειδικό Πλαίσιο Χωροταξικού Σχεδιασμού και Αειφόρου Ανάπτυξης για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας*. ΦΕΚ 1787Β'/8-12-2008.
- Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε. 2009. *Ειδικό Πλαίσιο Χωροταξικού Σχεδιασμού και Αειφόρου Ανάπτυξης για τη Βιομηχανία*. ΦΕΚ 151ΑΑΠ/13-4-2009.
- Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε. 2000. *Τεχνικές προδιαγραφές μελετών Γενικών Πολεοδομικών Σχεδίων (Γ.Π.Σ.) και Σχεδίων Οικιστικής Οργάνωσης Ανοικτής Πόλης (Σ.Χ.Ο.Ο.Α.Π.) και αμοιβές μηχανικών για την εκπόνηση μελετών*. Απόφαση 9572/1845/2000 – ΦΕΚ 209Δ'/7-4-2000.
- Selman, P. 1996. *Local Sustainability: managing and planning ecologically sound places*. Paul Chapman Publishing Ltd, London, 175 pp.

Δ

**ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΛΕΚΑΝΩΝ
ΛΗΨΗ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ**

**ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ ΑΝΘΡΩΠΟΓΕΝΩΝ
ΠΑΡΕΜΒΑΣΕΩΝ ΣΤΗ ΣΤΑΘΜΗ ΤΗΣ Λ. ΔΟΪΡΑΝΗΣ ΚΑΙ ΣΥΝΤΑΞΗ
ΠΙΛΟΤΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΑΝΑΠΛΗΡΩΣΗ ΤΗΣ
Λ. Μυρωνίδης**

Λέκτορας

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, - Σχολή Δασολογίας και Διαχείρισης
Φυσικού Περιβάλλοντος, Τ. Θ. 268, 54124 Θεσσαλονίκη,
myronid@gmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Μεταξύ 1984-2002 η Λ. Δοϊράνη κινδύνευσε να αποξηρανθεί μιας και έπεσε η στάθμη της κατά 4,83m, συρρικνώθηκε σε έκταση κατά 22% και ο όγκος της μειώθηκε περίπου κατά $110 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ εξαιτίας ανθρωπογενών παρεμβάσεων και των δυσμενών κλιματικών συνθηκών. Στην παρούσα εργασία μελετάται η επίδραση των ανθρωπογενών επεμβάσεων στη στάθμη της λίμνης ενώ προτείνεται ένα πλάνο για την επαναπλήρωσή της. Η ανάλυση κατέδειξε τους κακούς χειρισμούς από πλευράς πολιτείας ενώ αποκαλύφθηκε ο καθοριστικός ρόλος των έργων μεταφοράς ύδατος στην αύξηση της στάθμης της λίμνης καθώς και η ανάγκη εκπόνησης σχεδίων διαχείρισης για την διασυνοριακή λεκάνη απορροής της Λ. Δοϊράνης. Τέλος, περιγράφηκαν οι έξι βασικοί πυλώνες που θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει ένα ολοκληρωμένο σχέδιο διαχείρισης των υδατικών πόρων για την επαναπλήρωση της λίμνης.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Λ. Δοϊράνη, ανθρωπογενείς επεμβάσεις, έργα μεταφοράς ύδατος, μείωση υδατοκατανάλωσης

**AN EVALUATION OF ANTHROPOGENIC INTERVENTIONS EFFECT
IN THE WATER LEVEL OF LAKE DOIRAN AND PILOT LAKE
REFILLING PROJECT ELABORATION
D. Myronidis**

Lecturer

Aristotle University of Thessaloniki - School of Forestry and Natural Environment
University Campus 54124, Po Box 268, Thessaloniki,
myronid@gmail.com

ABSTRACT

During the period 1984-2002, Lake Doiran had been endangered to be completely drained since the water level was dropped by 4.8m, its size was shrunk by 22% and its volume was reduced by $110 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ due to man made interventions and unfavourable climatic conditions. In this paper, the influence of anthropogenic interventions in the water level of Lake Doiran was studied and a pilot plan so as to be refilled was introduced. The study results highlighted the inefficient transboundary water abstraction agreements, the crucial role of technical water transfer projects in the lake level increase and the necessity for the development of integrated water management plans covering the transboundary basin of Lake Doiran, were revealed. Finally, the six pillars were described, which should be included in an integrated water resources management plan aiming to the replenishment of the lake.

KEY WORDS: Lake Doiran, anthropogenic interventions, technical water transfer project, water consumption reduction

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην λεκάνη της Μεσογείου το σύνολο των κρατών αντιμετωπίζουν σημαντικά προβλήματα στο τομέα των υδατικών πόρων οι οποίοι θεωρούνται ότι είναι περιορισμένοι και απειλούμενοι (DG Environment E.C., 2007). Παρόλο που η Ελλάδα σε σχέση με άλλες Μεσογειακές χώρες παρουσιάζεται σε πλεονεκτική θέση εξαιτίας της διαθεσιμότητας των υδατικών πόρων, ωστόσο οι ποσότητες των υδατικών πόρων δεν κατανέμονται ομοιόμορφα στο χρόνο και στο χώρο (Sofios et al., 2007). Επιπρόσθετα, πρόσφατες αναλύσεις δεδομένων βροχής για μεγάλο αριθμό σταθμών στην Ελλάδα έδειξαν ότι οι βροχοπτώσεις στον Ελληνικό χώρο εμφανίζουν τάση μείωσης, που σε ορισμένες περιοχές είναι στατιστικά σημαντική (Feidas et al., 2007, Mavromatis and Stathis, 2009). Δεδομένου ότι η διαθεσιμότητα των υδατικών πόρων εξαρτάται άμεσα από τις κλιματικές συνθήκες ενδεχόμενη κλιματική αλλαγή θα μείωνε περαιτέρω την διαθεσιμότητα των υδατικών πόρων ενώ ταυτόχρονα θα προκαλούσε αύξηση της απόληψης υδάτινων πόρων για την άρδευση των καλλιεργειών. Αν και η επίδραση του κλίματος στους υδατικούς πόρους είναι μια αργή διαδικασία οι ανθρωπογενείς επεμβάσεις (Σαπουντζής κ.ά., 2007) μπορούν να οδηγήσουν σε ταχύτατη εξάντληση του υδατικού δυναμικού.

Η λίμνη Δοϊράνη βρίσκεται στο νομό Κιλκίς, στα σύνορα μεταξύ Ελλάδας και ΠΓΔΜ. Η συνολική έκταση της λίμνης Δοϊράνης ανέρχεται στα 42km², εκ των οποίων τα 3/5 ανήκουν στην ΠΓΔΜ και τα υπόλοιπα 2/5 στην Ελλάδα (Σχ. 1). Η τροφοδοσία της λίμνης πραγματοποιείται από μικρά χειμαρρικά ρέματα, τα σημαντικότερα των οποίων προέρχονται από τον ορεινό όγκο του Μπέλλες (Μάρης, 2000). Τη δεκαετία του 1960 το μεγαλύτερο πρόβλημα που αντιμετώπισε η λίμνη αποτελούσε η απομάκρυνση των υπερχειλιζόντων υδάτων της λίμνης. Για το σκοπό αυτό κατασκευάστηκε τάφος με αποτέλεσμα να διατηρηθεί το υψόμετρο της λίμνης στα 146m. Ωστόσο τις τελευταίες δεκαετίες η έκταση της λίμνης παρουσίασε μια δραματική μεταβολή, εξαιτίας της πτώσης της στάθμης κατά 4,83m (Λαγαράς κ.ά., 2007), από τα 42,5 Km² το 1974 σε περίπου 30,8 Km² το 2002. Η πτώση της στάθμης των υδάτων της λίμνης είναι ιδιαίτερα εμφανής στο ελληνικό τμήμα όπου τα νερά έχουν υποχωρήσει σε απόσταση περίπου 600m από την αρχική τους έκταση ενώ η συνολική μείωση του όγκου της λίμνης ανέρχεται σε 110·10⁶ m³ (EKBY, 2001).

Η σημασία της λίμνης Δοϊράνης ως πολύτιμο φυσικό πόρο έχει αναγνωρισθεί από τις κυβερνήσεις των δυο χωρών μιας και αποτελεί μέρος του δικτύου Natura 2000 τόσο για την Ελλάδα όσο και για την ΠΓΔΜ αλλά και από τους κατοίκους των παραλίμνιων περιοχών. Παρόλο που οι δυο χώρες έχουν εδώ και αρκετά χρόνια αναγνωρίσει τη σοβαρότητα του προβλήματος, μόλις στις αρχές του 21ου αιώνα πραγματοποιήθηκε η πρώτη διακρατική συνάντηση εργασίας για τη λίμνη Δοϊράνη (EKBY, 2001). Η καθυστέρηση αυτή οφείλεται κατά ένα μεγάλο ποσοστό στο κακό πολιτικό κλίμα μεταξύ Ελλάδας και ΠΓΔΜ σχετικά με το θέμα του ονόματος της ΠΓΔΜ. Ωστόσο την τελευταία δεκαετία και τα δυο κράτη μεμονωμένα λαμβάνουν μέτρα και σχεδιάζουν δράσεις για την περιβαλλοντική αποκατάσταση της λίμνης Δοϊράνης. Σήμερα ως αποτέλεσμα αυτών των δράσεων η στάθμη είναι μόλις 0,80m χαμηλότερη από την ελάχιστη κατώτατη συμφωνηθείσα στάθμη μεταξύ των δυο χωρών. Επιπρόσθετα, κατά το χρονικό διάστημα 2002-2010 καταγράφηκε μέση ετήσια αύξηση της στάθμης της λίμνης ίση με 0,5m.

Σκοπός της προτεινόμενης εργασίας είναι να αξιολογήσει την επίδραση των ανθρωπογενών παρεμβάσεων στην στάθμη της λίμνης Δοϊράνης. Πρέπει να τονιστεί ότι ως σήμερα δεν υπάρχει καμία ολοκληρωμένη έρευνα η οποία να διερευνά και να τεκμηριώνει τα αίτια της πτώσης στάθμης της λίμνης Δοϊράνης και να προτείνει τα κατάλληλα έργα και επεμβάσεις. Μεμονωμένοι ερευνητές έχουν πραγματοποιήσει έρευνες σχετικά με τη διερεύνηση των αιτίων της πτώσης της στάθμης (Hatzigiannakis, 1993, Popovska and Bonacci, 2006) ενώ σε επίπεδο κράτους οι κυριότερες έρευνες αφορούν την βυθομετρική

αποτύπωση της λίμνης (Durnev and Lazarevski, 2001) και την αναγνωριστική μελέτη έργων υδρομάστευσης, αποθήκευσης και μεταφοράς νερού (Λαγαράς κ.άλ., 2007).

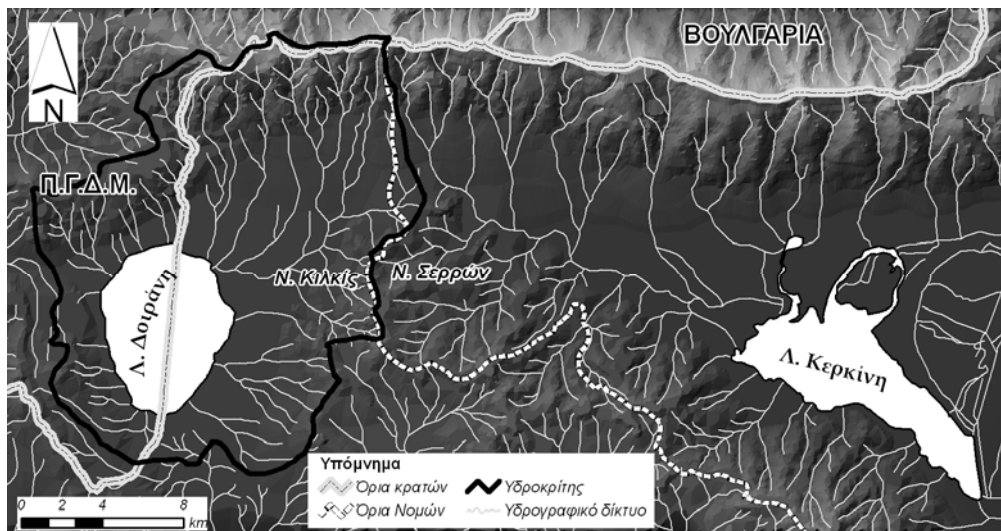
2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΑΣ ΚΑΙ ΔΙΑΘΕΣΙΜΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Η λεκάνη απορροής της Λ. Δοϊράνης έχει εμβαδό 246,70 km² από τα οποία περίπου τα 3/4 ανήκουν στην Ελλάδα, ενώ η έκταση που καταλάμβανε η λίμνη το 1970 ήταν 39,9 km² από τα οποία το 40% ανήκει στην Ελλάδα. Πρόκειται για μια ρηχή λίμνη με μέγιστο βάθος μόλις 8m και μέγιστο πλάτος και μήκος που ανέρχονται σε 7km και 8,9km αντίστοιχα (Durnev and Lazarevski, 2001). Περίπου η μισή λεκάνης απορροής ανήκει στον λοφώδη χώρο, ενώ μόλις το 18% της έκτασης της είναι σε υψόμετρο μεγαλύτερο των 500m.

Η λεκάνη της Δοϊράνης ανήκει γεωτεκτονικά στο όριο της Σερβομακεδονικής μάζας με την Περιδοπική (Παντζαρτζής, 2007). Στην περιοχή της λίμνης Δοϊράνης και κυρίως στο νότιο τμήμα της κυριαρχούν τα κρυσταλλοσχιστώδη πετρώματα της Σερβομακεδονικής μάζας τα οποία χαρακτηρίζονται από φυλλώδη δομή, και αυξημένο πορώδες. Η δυτική ενότητα απαρτίζεται από εναλλαγές διμαρμαρυγιακών γνευσίων με διμαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους, ενώ η ανατολική ενότητα αποτελείται κυρίως από αμφιβολίτες. Στην περιοχή έρευνας επικρατούν τα δάση (43%) και οι γεωργικές καλλιέργειες (36%). Στη λεκάνη απορροής της Λ. Δοϊράνης καλλιεργούνται συνολικά περί τα 91,5 km² από τα οποία τα 76,4 km² ανήκουν στην Ελληνική επικράτεια η πλειονότητα των οποίων αρδεύεται συστηματικά (Μυρωνίδης, 2010).

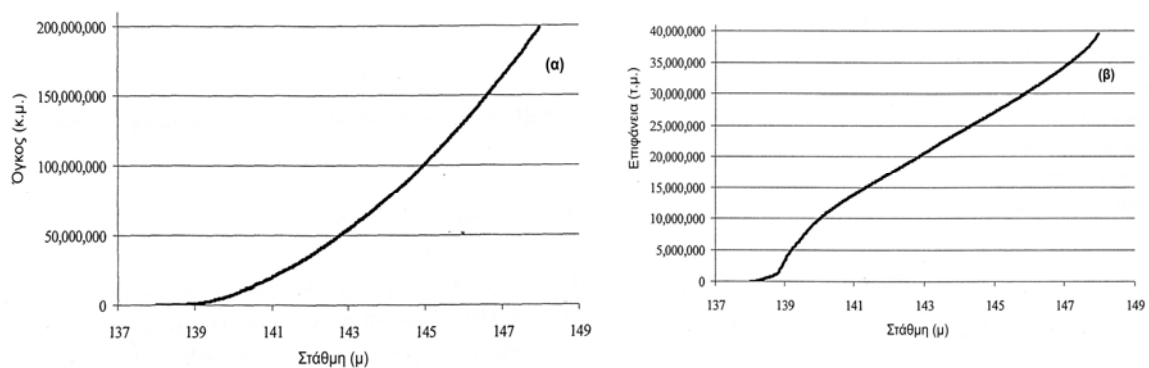
Το κλίμα της περιοχής είναι τυπικό μεσογειακό με θερμό και ξηρό καλοκαίρι και ήπιους χειμώνες. Η μέση ετήσια βροχόπτωση στην λεκάνη απορροής είναι 629.5 mm από τα οποία το 58% της βροχόπτωσης συμβαίνει στο χρονικό διάστημα από Οκτώβριο ως Απρίλιο (Porovska and Bonacci, 2006). Η μέση ετήσια θερμοκρασία ανέρχεται στους 14.3°C ενώ σπάνια εμφανίζονται θερμοκρασίες μικρότερες από 3,7°C.

Στην λίμνη υπάρχουν εγκατεστημένα ένα σταθμήμετρο στην Ελληνική πλευρά και ένα στην Σκοπιανή πλευρά. Οι μετρήσεις της στάθμης αφορούν μηνιαίες τιμές οι οποίες καλύπτουν το χρονικό διάστημα 1961 μέχρι 2010 και πραγματοποιήθηκαν από τις πρώην Υ.ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ και Ν.Α. Κιλκίς. Με βάση την συμφωνία του 1956 μεταξύ των κυβερνήσεων Ελλάδας και πρώην Γιουγκοσλαβίας αποφασίστηκε ο καθορισμός της ανώτατης στάθμης της λίμνης στα 146m και της κατώτατης στα 144,8m Την εποχή της συμφωνίας η στάθμη στη λίμνη ήταν 146,56m με αποτέλεσμα να προκαλούνται κατακλύσεις στην Σκοπιανή πλευρά. Μεταξύ 1984-2002 η λίμνη βίωσε μια δραματική πτώση της στάθμης από το υψόμετρο των 146,22m στο χαμηλό των 141,4m το οποίο παρατηρήθηκε το Σεπτέμβριο του 2002 (Μυρωνίδης, 2010) με αποτέλεσμα να μειωθεί η έκταση της κατά 22% και ο όγκος της λίμνης κατά 110·10⁶ m³ (EKBY, 2001). Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια παρατηρήθηκε μια μεταστροφή του φαινομένου με αποτέλεσμα να αυξάνεται η στάθμη της λίμνης κατά μέσο όρο 0,5m για να φτάσει τον Δεκέμβριο του 2010 στα 144,03m.



Σχήμα 1: Η διακρατική υδρολογική λεκάνη απορροής της Λ. Δοϊράνης

Τέλος, ο συσχετισμός μεταξύ απόλυτου υψόμετρου της στάθμης της λίμνης και του αντίστοιχου αποθηκευμένου όγκου και επιφάνειας της λίμνης παρουσιάζονται στο σχήμα 2 (ΕΚΒΥ, 2001). Ακολουθώντας, οι πληροφορίες των διαγραμμάτων χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των μεταβολών του όγκου της λίμνης εξαιτίας των ανθρωπογενών παρεμβάσεων.



Σχήμα 2: Διάγραμμα στάθμης-όγκου λίμνης (α) και στάθμης-επιφάνειας λίμνης(β)

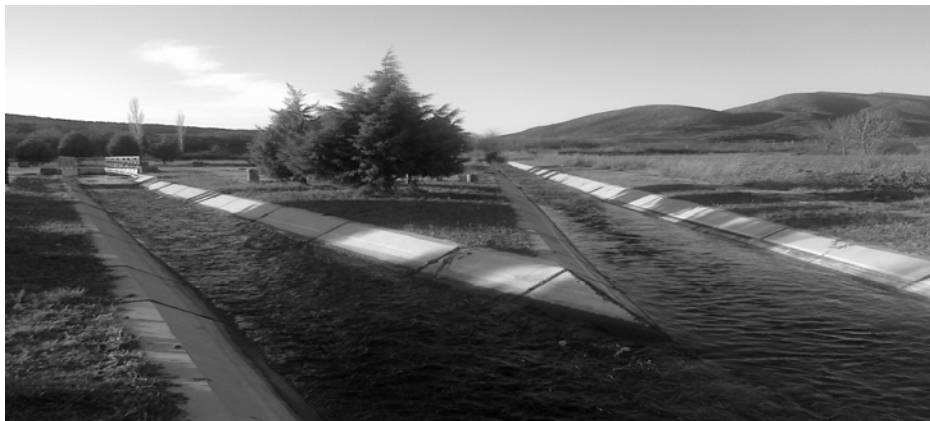
3. ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΑΝΘΡΩΠΟΓΕΝΩΝ ΕΠΕΜΒΑΣΕΩΝ

Μεταξύ Ελλάδας και πρώην Γιουγκοσλαβίας συνάφτηκαν δυο συμφωνίες βάσει των οποίων έγινε απόληψη σημαντικών ποσοτήτων ύδατος από την Ελληνική πλευρά. Η πρώτη συμφωνία του 1974 πραγματοποιήθηκε εξαιτίας του αυξημένου πλημμυρικού κινδύνου, που αντιμετώπιζαν οι οικισμοί της πρώην Γιουγκοσλαβίας και η δεύτερη συμφωνία αφορούσε την κάλυψη αρδευτικών αναγκών των Ελληνικών καλλιεργειών εξαιτίας της παρατεταμένης ανομβρίας. Τον Μάιο του 1974 η στάθμη της λίμνης έφτασε το ανώτερο όριο των 146m αλλά για να αποφευχθούν οι ζημιές στις καλλιέργειες τα θυροφράγματα ανοίχτηκαν τον Ιανουάριο του 1975, έμειναν ανοιχτά καθόλη την διάρκεια του μήνα και η στάθμη κατήλθε στα 145,55m Τον Ιούλιο του 1988 η στάθμη βρισκόταν στα 144,65m, 16 cm χαμηλότερα του κατώτατου συμφωνηθέντος ορίου των 144,80m. Μετά από συμφωνία με τη Γιουγκοσλαβική πλευρά, έγινε απόληψη νερού από την Ελληνική πλευρά για κάλυψη επειγουσών αρδευτικών αναγκών εξαιτίας της παρατεταμένης ξηρασίας. Όταν έκλεισαν τα θυροφράγματα (29 Αυγούστου 1988) η στάθμη είχε κατέλθει στο επίπεδο των 144,23m.

Στους πρώην Δήμους Δοϊράνης & Μουριών του Ν. Κιλκίς, οι ανάγκες σε αρδευτικό νερό καλύπτονται κυρίως από γεωτρήσεις και δευτερευόντως από μικρούς ταμιευτήρες, που

έχουν κατασκευασθεί στις παρυφές του Όρους Μπέλλες. Σύμφωνα με στοιχεία της πρώην Ν.Α. Κιλκίς, οι γεωτρήσεις, που έχουν διανοιχτεί στην πεδινή περιοχή ανατολικά και νότια της λίμνης ανέρχονται σε 450 περίπου, από τις οποίες ελάχιστες εξυπηρετούν υδρευτικούς σκοπούς. Οι περισσότερες από τις γεωτρήσεις αυτές, οι οποίες βρίσκονται κυρίως στην πεδινή περιοχή, έχουν βάθος διάνοιξης περί τα 45m και παροχές που κυμαίνονται από 40 έως 100m³/hr (Παντζαρτζής, 2007). Αντίθετα, οι γεωτρήσεις που βρίσκονται στην περίμετρο της πεδιάδας έχουν μικρότερο βάθος διάνοιξης και παροχές έως 20 m³/hr.

Η πιο σημαντική ενέργεια για την επαναπλήρωση της λίμνης πραγματοποιήθηκε από την ΠΓΔΜ και αφορά στη διάνοιξη δέκα γεωτρήσεων στην περιοχή του Gjavato (ανατολική όχθη Αξιού) το έτος 2003. Με βάση τις πληροφορίες από το δήμο Nov Dojran της ΠΓΔΜ οι γεωτρήσεις του Gjavato μεταφέρουν ποσότητες ύδατος με παροχή 0,4 m³/sec με άντληση και μεταφορά μέσω αγωγού μήκους 19,3km εμπλουτίζοντας την λίμνη τα τελευταία επτά έτη (Σχ. 3). Η διαφορά υψομετρικής στάθμης μεταξύ όχθης Αξιού (60m) και λίμνης Δοϊράνη (141m), είναι της τάξης των 90m με αποτέλεσμα να απαιτείται η τροφοδότηση με ηλεκτρικό ρεύμα ισχύος περίπου 2.500 HP. Το κόστος του ηλεκτρικού ρεύματος για την μεταφορά της συγκεκριμένης παροχής ανέρχεται σε περίπου 65.000€/μήνα, ποσό το οποίο πληρώνει η κυβέρνηση της Π.Γ.Δ.Μ. Η μέγιστη δυνατότητα παροχής του τεχνικού έργου ανέρχεται σε 1,2 m³/sec αλλά σε αυτήν την περίπτωση το ετήσιο λειτουργικό κόστος ανέρχεται σε 1.600.000€.



Σχήμα 3: Μεταφορά νερού στην Λ. Δοϊράνη από τις Γεωτρήσεις στο Gjavato

Με βάση την ΚΥΑ 282435/661/19.07.2006 στα πλαίσια των Γεωργοπεριβαλλοντικών μέτρων εγκρίθηκε πρόγραμμα για την «Προστασία της λίμνης Δοϊράνης» με δράσεις που στοχεύουν στη μείωση της κατανάλωσης αρδευτικού νερού για τον εμπλουτισμό των υπόγειων υδροφορέων και την αποκατάσταση του υδάτινου όγκου της λίμνης. Το Μέτρο εφαρμόζεται σε παραλίμνιες εκτάσεις 2.000 ha των Δήμων Δοϊράνης και Μουριών που καλλιεργούνται με αραβόσιτο, βαμβάκι, μηδική και τριφύλλια. Οι δικαιούχοι του Μέτρου αναλαμβάνουν για χρονικό διάστημα πέντε ετών να μειώσουν ετησίως κατά 30% τουλάχιστον την κατανάλωση αρδευτικού νερού επιλέγοντας είτε να αφήσουν σε αγρανάπωση το 3% και να εφαρμόσουν αμεινισπορά με ξηρική καλλιέργεια σε έκταση που αντιστοιχεί στο 27% είτε να θέσουν σε αγρανάπωση έκταση ίση με το 30% της επιλέξιμης έκτασης της εκμετάλλευσης λαμβάνοντας στρεμματική ενίσχυση η οποία κυμαίνεται από 43,1 – 57,5€.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΤΩΝ ΑΝΘΡΩΠΟΓΕΝΩΝ ΕΠΕΜΒΑΣΕΩΝ

Οι δυο συμφωνίες μεταξύ Ελλάδας και ΠΓΔΜ οι οποίες συνάφθηκαν για την απόληψη ύδατος από την Ελληνική πλευρά είχαν ως αποτέλεσμα να μειωθεί η στάθμη της λίμνης συνολικά κατά 0,8 m. Η συμφωνία του 1974 παρόλο που προκάλεσε πτώση της στάθμης της λίμνης κατά 0,45m και μείωση του όγκου κατά περίπου $12,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ έδρασε επ' ωφελεία και των δυο κρατών μιας και απέτρεψε τον πλημμυρικό κίνδυνο που αντιμετώπιζαν οι παραλίμνιες περιοχές εξαιτίας της διαρκούς ανόδου των υδάτων. Αντίθετα, η απόληψη νερού τον Ιούλιο του 1988 για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών των καλλιεργειών εξαιτίας της παρατεταμένης περιόδου ανομβρίας προκάλεσε μείωση της στάθμης κατά 0,41m και του όγκου κατά $10 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ με αποτέλεσμα η στάθμη της λίμνης τον Αύγουστο του ίδιου έτους να κατέλθει 57cm χαμηλότερα από το ελάχιστο συμφωνηθέν κατώτερο υψόμετρο της στάθμης της λίμνης. Διαπιστώνουμε ότι αν και η λίμνη ήταν σε κρίσιμη κατάσταση, οι πολιτικοί των δυο χωρών συμφώνησαν να διαθέσουν ποσότητες ύδατος προς όφελος των Ελλήνων καλλιεργητών και εις βάρος της αειφορίας της λίμνης.

Σχετικά με την ακριβή επίδραση των γεωτρήσεων στην μείωση της στάθμης της λίμνης είναι δύσκολο να αποφανθεί κανείς μιας και δεν υπάρχει καμία ολοκληρωμένη υδρογεωλογική μελέτη η οποία να αποσαφηνίζει αυτή την σχέση. Ωστόσο, ο συγγραφέας θεωρεί ότι υπερεκμετάλλευση του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα από τις πολυάριθμες νόμιμες και παράνομες γεωτρήσεις είχε ως συνέπεια να υποβιβαστεί ο υπόγειος υδροφόρος ορίζοντας, ο οποίος τροφοδοτούσε με νερό την λίμνη. Σύμφωνα με μαρτυρίες των αγροτών της περιοχής στις αρχές της δεκαετίας του 1980 ο υπόγειος υδροφόρος ορίζοντας ήταν στο επίπεδο της λίμνης, σήμερα όλες οι γεωτρήσεις είναι σε βάθος 20m και άνω, πολύ πιο κάτω δηλαδή από τα 8m που είναι το βαθύτερο σημείο της λίμνης, με αποτέλεσμα να σταματήσει η τροφοδοσία της λίμνης από τον υδροφόρο ορίζοντα και να υποβιβαστεί η στάθμη της.

Μεταξύ 2003 και 2010 η στάθμη της λίμνης ανέβηκε από το υψόμετρο των 140,2m στο υψόμετρο των 144,0m με αποτέλεσμα να αυξηθεί ο όγκος της λίμνης κατά $68 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Στο ίδιο χρονικό διάστημα το έργο της παροχέτευσης ποσοτήτων ύδατος μέσω των γεωτρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στο Gjavato στην λεκάνη του Αξιού και μεταφοράς στην Λ. Δοϊράνη, με βάση την τιμή της παροχής των $0,4 \text{ m}^3/\text{sec}$, συνείσφερε ετησίως με ποσότητες περίπου $12,6 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ και συνολικά στην διάρκεια των επτά ετών λειτουργίας του έργου περί τα $88,3 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Συνεπώς οι εισροές στην λίμνη αποτέλεσαν τον καθοριστικό παράγοντα στην αύξηση της στάθμης της λίμνης αν και δεν έχουμε τα αναλυτικά δεδομένα των παροχών από την εταιρία Hydrosystem Dojransko Ezero η οποία διαχειρίζεται το έργο.

Ωστόσο, ακόμα και πριν την ανεξαρτητοποίηση της ΠΓΔΜ συνεχώς εγείρονται απαιτήσεις από το γειτονικό κράτος για την καταβολή αποζημιώσεων ή για να αναλάβει η Ελληνική πολιτεία να χρηματοδοτήσει το λειτουργικό κόστος του έργου απόληψης και μεταφοράς νερού ύψους 1,6 εκ. ευρώ ετησίως μιας και θεωρούν ότι το Ελληνικό κράτος ευθύνεται για την ταπείνωση της στάθμης της λίμνης. Με βάση την οδηγία πλαίσιο για τα ύδατα απαιτούνται να προηγηθούν σχέδια διαχείρισης υδάτων και διαδικασία διαβουλεύσεως ακόμα και για διασυνοριακούς ποταμούς, προκειμένου στην συνέχεια να είναι δυνατή η μεταφορά νερού από μια υδρολογική λεκάνη απορροής σε άλλη λεκάνη απορροής (ΕΕ, 2000). Με βάση τα παραπάνω η απόληψη ύδατος και μεταφορά νερού από μια λεκάνη απορροής σε μια άλλη χωρίς να έχει προηγηθεί η εκπόνηση των σχεδίων διαχείρισης στις δυο λεκάνες απορροής αντίκειται στην οδηγία 2000/60/ΕΚ.

Σχετικά με το πρόγραμμα μείωσης της υδατοκατανάλωσης που εφαρμόστηκε για τις παραλίμνιες εκτάσεις των πρώην Δήμων Δοϊράνης και Μουριών το 2006 έγιναν αιτήσεις για ένταξη στο πρόγραμμα περίπου 4.500 στρεμμάτων από τα οποία σήμερα ενεργά στο πρόγραμμα είναι περίπου 3.100 στρέμματα. Δεδομένου ότι η ετήσια υδατοκατανάλωση των ενταγμένων καλλιεργειών ανέρχεται σε $1.350 \text{ m}^3/\text{στρέμμα}$ (Markou and Papadavid, 2007,

Fotakis and Sidiropoulos, 2012) συνεπάγεται ότι η ετήσια εξοικονόμηση ύδατος από την εφαρμογή του προγράμματος ανέρχεται περίπου σε $1,2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Σημειώνεται ότι για την περιοχή της Λ. Δοϊράνης δεν υπάρχουν στοιχεία υδατοκατανάλωσης για τις καλλιέργειες και γι' αυτό το λόγω χρησιμοποιήθηκαν οι παραπάνω βιβλιογραφίες από αντίστοιχες έρευνες στην Κύπρο. Συνεπώς, η εφαρμογή του προγράμματος συνείσφερε στην αύξηση της στάθμης της λίμνης αλλά δεν αποτέλεσε καθοριστικό παράγοντα για την επαναπλήρωση της.

4.2 ΣΥΝΤΑΞΗ ΠΙΛΟΤΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΟΥ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΑΝΑΠΛΗΡΩΣΗ ΤΗΣ ΛΙΜΝΗΣ

Ακολούθως θα γίνει μια προσπάθεια να περιγραφούν οι βασικοί άξονες που θεωρούμε ότι θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει ένα πιλοτικό σχέδιο διαχείρισης των υδατικών πόρων για την επαναπλήρωση της Λ. Δοϊράνης.

1. Σχέδια διαχείρισης της λεκάνης απορροής της Λ. Δοϊράνης αλλά και των γειτονικών λεκανών απορροής. Με βάση το κοινοτικό δίκαιο απαιτείται η σύνταξη των σχεδίων διαχείρισης των διασυνοριακών λεκανών του Αξιού και της Δοϊράνης και η πληροφόρηση του κοινού για τα αποτελέσματα τους και τις συνακόλουθες τροποποιήσεις των σχεδίων.

2. Μεταφορά ύδατος. Το πολυδάπανο έργο το οποίο σχεδίασε και εκτέλεσε η ΠΓΔΜ για την μεταφορά ύδατος από τις ανατολικές όχθες του Αξιού στην λεκάνη απορροής της Λ. Δοϊράνης αντίκειται στην κοινοτική νομοθεσία και επιβαρύνει με την λειτουργία του τον Αξιό. Με βάση την γεωμορφολογική διαμόρφωση της περιοχής έρευνας η μοναδική πηγή εμπλουτισμού της λίμνης Δοϊράνης με δυνατότητα μεταφοράς ύδατος αποτελεί η παρακείμενη υδρολογική λεκάνη της Λ. Κερκίνης (Σχ. 1) (Καλούση, 2002). Ειδικότερα από τα χειμαρρικά ρέματα του όρους Μπέλλες μέσω υδρομάστευσης θα μπορούσαμε να συγκεντρώσουμε και να οδηγήσουμε τις ποσότητες ύδατος που περισσεύουν κατά τους χειμερινούς μήνες στην λίμνη Δοϊράνη διοχετεύοντας προς την λίμνη ετήσια ποσότητα νερού ίση με $5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ κατά την υγρή περίοδο (χωρίς άλλα έξοδα όπως π.χ. ηλεκτρισμός για την χρήση αντλιών (Λαγαράς κ.άλ., 2007). Δεδομένου ότι κατά το παρελθόν λόγω των αυξημένων βροχοπτώσεων είχε ανέβει αισθητά η στάθμη της λίμνης Κερκίνης ξεπερνώντας το όριο ασφαλείας με αποτέλεσμα να κινδυνεύουν δέκα χωριά των Σερρών που βρίσκονται κάτω από το επίπεδο των υδάτων της λίμνης Κερκίνης εκατέρωθεν του ποταμού Στρυμόνα θα περίμενε κανείς ότι η υλοποίηση του έργου υδρομάστευσης θα ήταν κάτι απλό (Εφραιμίδης κ.άλ., 2006). Παρόλα αυτά, οι κάτοικοι του πρώην Δήμου Κερκίνης αντιδρούν στην υλοποίηση του έργου θεωρώντας ότι η εκτέλεση του έργου θα είχε σοβαρές επιπτώσεις στην διαθεσιμότητα των υδατικών πόρων με συνέπεια την μείωση της αγροτικής παραγωγής. Γίνεται άλλη μια φορά αντιληπτό πόσο σημαντική είναι η δημιουργία σχεδίων διαχείρισης των λεκανών απορροής και η ενημέρωση του κοινού.

3. Τιμολόγηση του ύδατος: Σήμερα στην περιοχή έρευνας λειτουργούν 450 αρδευτικές γεωτρήσεις οι ιδιοκτήτες των οποίων πληρώνουν αρκετά χρήματα στην ΔΕΗ για το ηλεκτρικό αλλά ελάχιστα για το νερό που καταναλώνουν για την άρδευση των καλλιεργειών. Με βάση την οδηγία πλαίσιο για τα ύδατα απαιτείται η εφαρμογή πολιτικών τιμολόγησης του ύδατος για να εξασφαλιστεί η αποτελεσματική χρήση των υδάτων. Συνεπώς η εγκατάσταση υδρομετρητών και η τιμολόγηση των νερού θα είχε ως συνέπεια να περιοριστεί η κατανάλωση, να αλλάξουν τα συστήματα άρδευσης, όπως της κατάκλυσης και της τεχνητής βροχής σε στάγδην άρδευσης και να προσπαθήσουν οι αγρότες να μειώσουν τις απώλειες μέσω των δικτύων μεταφοράς νερού.

4. Επέκταση του προγράμματος των Γεωργοπεριβαλλοντικών Μέτρων. Η επέκταση του προγράμματος γεωργοπεριβαλλοντικών μέτρων για το σύνολο των καλλιεργειών εντός της λεκάνης απορροής της Λ. Δοϊράνης και η αύξηση των ενισχύσεων θα είχε ως αποτέλεσμα

την ουσιαστική μείωση της υδατοκατανάλωσης με την παράλληλη εξασφάλιση σταθερού εισοδήματος για τους αγρότες της περιοχής.

5. Ευαισθητοποίηση-δημοσιότητα. Παρόλα τα χρήματα και τον χρόνο που δαπανήθηκαν δεν θα έχουμε τα επιθυμητά αποτελέσματα αν δεν φροντίσουμε να ενημερώσουμε, ευαισθητοποιήσουμε και εκπαιδεύσουμε τους πολίτες έτσι ώστε να γνωρίσουν την σημασία της ορθολογικής διαχείρισης των υδάτινων πόρων (Polyzos and Arabatzis, 2008). Απαιτείται λοιπόν η εφαρμογή ενός διασυννοριακού πολυετούς προγράμματος ενημέρωσης, ευαισθητοποίησης και δημοσιότητας για να επιτευχθεί η μεταβολή των στάσεων και των απόψεων των κατοίκων της περιοχής όσον αφορά την διαχείριση των υδατικών πόρων (Emmanouiloudis et al., 2008).

6. Εγκατάσταση ολοκληρωμένου δικτύου παρακολούθησης. Απαραίτητη προϋπόθεση για την ορθολογική διαχείριση των υδατικών πόρων αποτελεί η ανάπτυξη ενός τέτοιου δικτύου το οποίο θα συνδέεται με ένα ολοκληρωμένο σύστημα λήψης αποφάσεων (Ioannou et al., 2011) που θα μπορεί να μας υποβοηθήσει στην διαδικασία της λήψης απόφασης σε θέματα διαχείρισης των υδατικών πόρων.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η λίμνη Δοϊράνη κινδύνευσε με ολοκληρωτική αποξήρανση μεταξύ του χρονικού διαστήματος 1984-2002 εξαιτίας έντονων ανθρωπογενών επεμβάσεων (απόληψη ύδατος, υπεράντληση) ενώ λόγω των τεχνικών έργων μεταφοράς ύδατος που εκτέλεσε η κυβέρνηση της ΠΓΔΜ και των ευνοϊκών καιρικών συνθηκών το φαινόμενο αντιστράφηκε τα τελευταία χρόνια με αποτέλεσμα σήμερα να υπολείπεται η στάθμη μόλις 0,80m από το ελάχιστο συμφωνηθέν όριο μεταξύ των δυο κρατών. Η ανάλυση κατέδειξε τους κακούς χειρισμούς από πλευράς πολιτείας όσον αφορά διακρατικές συμφωνίες απόληψης ύδατος οι οποίες είχαν ως αποτέλεσμα να μειωθεί ο όγκος της λίμνης κατά $22,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, την αδυναμία ελέγχου των γεωτρήσεων και τη συμβολή των γεωργοπεριβαλλοντικών μέσω της ετήσιας εξοικονόμησης $1,2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ ύδατος η οποία συνοδεύεται με ανταποδοτική ενίσχυση του εισοδήματος. Η αντιστροφή του φαινομένου κατά την τελευταία δεκαετία οφείλετε σε ένα ποσοστό στις καλές κλιματικές συνθήκες που επικράτησαν στην περιοχή αλλά και στην διοχέτευση ποσότητας ύδατος ίση με $88,3 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ μέσω έργων άντλησης και μεταφοράς ύδατος που εκτέλεσε η ΠΓΔΜ. Επίσης, έγινε αντιληπτή η επιτακτική ανάγκη εκπόνησης σχεδίων διαχείρισης για τις διασυννοριακές λεκάνες απορροής του Αξιού και της Λ. Δοϊράνης.

Τέλος, ένα ολοκληρωμένο πλάνο διαχείρισης των υδατικών πόρων για την επαναπλήρωση της λίμνης θα πρέπει να στηρίζεται στην σύνταξη σχεδίων διαχείρισης των λεκανών απορροής, σε έργα μεταφοράς ύδατος των πλεοναζόντων ποσοτήτων ύδατος, σε ορθή τιμολόγηση του ύδατος, σε προγράμματα εξοικονόμησης της υδατοκατανάλωσης, στην ενημέρωση-ευαισθητοποίηση και εκπαίδευση των κατοίκων και στην εγκατάσταση ενός δικτύου παρακολούθησης. Στο μέλλον είναι ανάγκη να εκπονηθεί ολοκληρωμένη υδρογεωλογική μελέτη της λεκάνης απορροής της Λ. Δοϊράνης.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ο κ. Μυρωνίδης ευχαριστεί το Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών για τη χορήγηση υποτροφίας μεταδιδακτορικής έρευνας στο πλαίσιο του προγράμματος υποτροφιών 2008-2009.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ΕΕ, 2000. Οδηγία 2000/60/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του συμβουλίου για τη θέσπιση πλαισίου κοινοτικής δράσης στον τομέα της πολιτικής των υδάτων.
- ΕΚΒΥ, 2001. *Διακρατική συνάντηση για τη λίμνη Δοϊράνη*. 11-12 Δεκεμβρίου 2000.
- Εφραϊμίδης, Α., Μυρωνίδης, Δ. και Εμμανουλούδης, Δ. 2006. *Η επίδραση των πλημμυρικών συμβαλλόντων του Στρυμόνα σε τμήματα του πεδινού ρου του*, 10^ο Πανελλήνιο Συνέδριο της Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης (Ε.Υ.Ε.), Ξάνθη, 55-62.
- Καλούση, 2002. *Μελέτη ορθολογικής διαχείρισης υδατικών πόρων Ν. Κιλκίς*, Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Μελετών.
- Λαγαράς, Κ., Λουμπιέ, Α. & ΣΙΑ Ε.Ε. και Παντζαρτζής, 2007. *Αναγνωριστική μελέτη έργων υδρομάστευσης αποθήκευσης και μεταφοράς νερού για τον εμπλουτισμό της Λ. Δοϊράνης Ν. Κιλκίς*, Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων, Δ/ση Τεχνικών Μελετών και Κατασκευών.
- Μάρης Φ. 2000. *Το χειμαρρικό περιβάλλον των φυσικών λιμνών της Ελλάδος*, Διδακτορική Διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Μυρωνίδης, Δ. 2010. *Διερεύνηση των αιτιών της πτώσης στάθμης της Λ. Δοϊράνης και σύνταξη πιλοτικού σχεδίου δράσης για την επαναπλήρωση αυτής*, Τελική Έκθεση Πεπραγμένων Μεταδιδακτορικής Έρευνας, Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών.
- Πανταρτζής, Π. 2007. *Τεύχος αναγνωριστικής γεωλογικής μελέτης*, Μελέτη κατασκευής έργων υδρομάστευσης, αποθήκευσης και μεταφοράς νερού για τον εμπλουτισμό της Λ. Δοϊράνης Ν. Κιλκίς.
- Σαπουντζής, Μ., Παπαθανασίου, Θ., Μυρωνίδης, Δ. και Αγγελακόπουλος, Ι. 2007. *Υδρολογική απόκριση του χειμάρρου «Γεραμπινή» Ζαγοράς μετά από την κατασκευή φραγμάτων στερέωσης της κεντρικής κοίτης*, Υδροτεχνικά, Τόμος 17, σελ. 89-102
- DG Environment. E.C. 2007. *Water scarcity & droughts in-depth assessment*. Second Interim Report – June 2007.
- Durnev, B., Lazarevski, N. 2001. *Report on morphological characteristics of the Dojran Lake catchment*, Ministry of Agriculture, Forestry and Water Economy, Contribution for Lake study.
- Emmanouloudis, D., Myronidis, D., Lambova, M. and Tzamerikou, D. 2008. *A Paradigm of an Integrated Transboundary Environmental Education, Training and Technology Transfer Project*, The Environmentalist, 28, 489-493.
- Feidas, X., Nouloupoulou, Ch., Makrogiannis, T. and Bora-Senta, E. 2007. *Trend analysis of precipitation time series in Greece and their relationship with circulation using surface and satellite data: 1955–2001*. Theoretical and Applied Climatology, 87: 155-177.
- Fotakis, D. and Sidiropoulos, E. 2012. *Combined land-use and water allocation planning*, Annals of Operations Research, 1-17.
- GTZ, 2001. *Lake Dojran*, Draft main report for the discussions with the Greek experts, bilateral meeting, Thessaloniki.
- Hatzigiannakis, S. 1993. *A brief report on the hydrological problem of lake Doiran*. Greek Biotope/Wetland Centre (EKBY), Themi, Greece.
- Ioannou, K., Lefakis, P. and Arabatzis, G. 2011. *Development of a Decision Support System for the study of an area after the occurrence of forest fire*, International Journal of Sustainable Society. 3(1), 5-32.
- Markou M. and Papadavid G. 2007. *Norm input – output for the main crop and livestock enterprises of Cyprus*. Agricultural economics report 46. Agricultural research institute – Ministry of agriculture, natural resources and environment
- Mavromatis, T. and Stathis D. 2011. *Response of the water balance in Greece to temperature and precipitation trends*, Theoretical and Applied Climatology, 104 (1-2), 13-24.

- Polyzos, S. and Arabatzis, G. 2008. *Spatial distribution of natural resources and their contribution to regional development in Greece*, Journal of Environmental Protection and Ecology, 9 (1): 183-199.
- Popovska, C. and Bonacci, O. 2006. *Ecohydrology of Dojran Lake*. Presented at Conference on Water Observation and Information System for Decision Support, Ohrid, FYROM 1-6.
- Sofios, S., Arabatzis, G., and Baltas, E. 2008. *Policy for management of water resources in Greece*, The Environmentalist, 28(3), DOI: 10.1007/s10669-007-9126-4.

**ΜΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΕΣ ΠΑΡΕΜΒΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ
ΑΝΤΙΠΛΗΜΜΥΡΙΚΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΣΤΟΝ ΔΙΑΚΡΑΤΙΚΟ
ΠΟΤΑΜΟ ΕΒΡΟ: Η ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΗΣ ΟΡΘΟΛΟΓΙΚΗΣ
ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ**

**Π. Αγγελίδης*, Ε. Πεταλά, Μ. Κώτσικας, Κ. Κοπασάκης, Α. Γεωργουλός,
Ν. Κωτσοβίνος**

Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Δ.Π.Θ., Βασ. Σοφίας 12, 67100 Ξάνθη
*Στοιχεία επικοινωνίας: pangelid@civil.duth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ήπιες δράσεις αντιπλημμυρικής προστασίας (non-structural measures) είναι πολύ ενδιαφέρουσες εναλλακτικές δράσεις, που είναι συμπληρωματικές των κατασκευαστικών (υδραυλικά έργα) και που μπορεί να οδηγήσουν σε μείωση απωλειών ζωής και περιουσιών, που προκαλούνται από τις πλημμύρες. Στην παρούσα εργασία διερευνάται ο ρόλος των ήπιων δράσεων (μη κατασκευαστικών παρεμβάσεων) στο πλημμυρικό φαινόμενο του διακρατικού ποταμού Έβρου, και μελετάται και προτείνεται ιδιαίτερα η ορθολογική διαχείριση των Βουλγαρικών φραγμάτων σε συνδυασμό με έγκαιρη πρόγνωση βροχοπτώσης – απορροής, που όπως αποδεικνύεται, είναι δυνατό να οδηγήσουν σε σημαντική μείωση ή αποφυγή πλημμυρών, πολλές φορές και χωρίς οικονομικές απώλειες.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Πλημμύρες, ήπιες δράσεις αντιπλημμυρικής προστασίας, διαχείριση φραγμάτων, διακρατικός ποταμός Έβρος

**NON-STRUCTURAL FLOOD PROTECTION MEASURES FOR
EVROS TRANSBOUNDARY RIVER: THE IMPORTANCE OF THE
APPROPRIATE MANAGEMENT OF DAMS**

**P. Angelidis*, E. Petala, M. Kotsikas, K. Kopasakis, A. Georgoulas,
N. Kotsovinos**

Civil Engineering Department, Democritus University of Thrace,
Vas. Sofias 12, GR-67100 Xanthi, Greece.

*Corresponding author: pangelid@civil.duth.gr

ABSTRACT

Non-structural flood protection measures are very important alternative activities, which are complementary additions to the essentially structural solutions to flood control, and they are capable to save lives, reduce costs and enhance efficiency in flood defence. In this paper the role of non-structural measures is investigated for floods generated in the transboundary river basin of Evros. The appropriate management of Bulgarian dams together with forecasting, early warning and rainfall-runoff modelling is studied, and as is demonstrated, it is possible to reduce or avoid floods, usually without economic losses.

KEY WORDS: Floods, non-structural flood protection, management of dams, Evros transboundary river

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Από την αρχαιότητα, καταστροφικές πλημμύρες έθεται σε κίνδυνο εγκαταστάσεις και ζωές, που βρίσκονταν σε κοιλάδες ποταμών. Παρά την αλματώδη ανάπτυξη της τεχνολογίας και τις τεράστιες επενδύσεις σε αντιπλημμυρικά έργα, πλημμύρες εξακολουθούν και σήμερα να συμβαίνουν με όλες τις δυσμενείς συνέπειες. Η κατασκευή ταμιευτήρων, όπου η πλεονάζουσα ποσότητα νερού μπορεί να αποθηκευτεί, επιτρέπει την προσωρινή ρύθμιση της παροχής των ποταμών και την αποφυγή πλημμυρών με τον υποβιβασμό της καταστροφικής πλημμυρικής αιχμής. Οι ταμιευτήρες συνεπώς αποτελούν ένα βασικό στοιχείο της διαχείρισης του νερού, εξυπηρετώντας πολλαπλούς σκοπούς, μεταξύ των οποίων είναι και η αντιπλημμυρική προστασία.

Μέχρι πριν από 50 χρόνια, η επιστήμη του νερού κυριαρχούνταν από το δόγμα της «τιθάσευσης της φύσης» και η αντιμετώπιση των κινδύνων των πλημμυρών γίνονταν με κατασκευές έργων μηχανικού, ολοένα αυξανόμενου μεγέθους, κλίμακας εφαρμογής και σπουδαιότητας: αναχώματα, τάφροι, επεμβάσεις στις κοίτες των ποταμών, φράγματα και ταμιευτήρες, κ.λπ. Στόχος όλων αυτών των κατασκευών ήταν κυρίως η μείωση της συχνότητας πλημμύρας των προστατευόμενων περιοχών, και πολύ λιγότερο ο μετριασμός των προκαλούμενων ζημιών. Σήμερα αναπτύσσεται ένας προβληματισμός σχετικά με τα υπέρ και τα κατά των μεγάλων κατασκευαστικών παρεμβάσεων. Υπάρχει μια αυξανόμενη συνειδητοποίηση, ότι οι κατασκευαστικές παρεμβάσεις μπορεί να μην είναι κατάλληλες για μακροπρόθεσμη ανάπτυξη, δεδομένης της περιορισμένης διαθεσιμότητας χρηματοδοτικών πόρων σε συνδυασμό με την ευαισθησία για την υποβάθμιση του περιβάλλοντος. Ο άνθρωπος πρέπει να αποδεχτεί, ότι τα τεχνικά έργα, όσο ακριβά και να είναι, πρέπει να συνδυαστούν με άλλες, μη-κατασκευαστικές ήπιες παρεμβάσεις για την καλύτερη αντιμετώπιση και την συνύπαρξη με τους αναπόφευκτους κινδύνους. Η σύγχρονη τάση λοιπόν είναι η εφαρμογή ενός μικτού σχήματος τόσο από κατασκευαστικές όσο και από ήπιες παρεμβάσεις.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας διερευνάται ο ρόλος των ήπιων δράσεων (μη κατασκευαστικών παρεμβάσεων) στο πλημμυρικό φαινόμενο. Για την περίπτωση του διακρατικού ποταμού Έβρου, μελετάται ιδιαίτερα και προτείνεται η ορθολογική διαχείριση των Βουλγαρικών φραγμάτων σε συνδυασμό με έγκαιρη πρόγνωση και προσομοίωση βροχόπτωσης – απορροής, που όπως αποδεικνύεται, είναι δυνατό να οδηγήσουν σε σημαντική μείωση ή αποφυγή πλημμυρών. Η αντιμετώπιση των πλημμυρών γίνεται πολύ δυσκολότερη, όταν πρόκειται για διακρατική υδρολογική λεκάνη, όπου εμπλέκονται περισσότερες χώρες, όπως στην περίπτωση του διακρατικού ποταμού Έβρου, όπου η υδρολογική λεκάνη μοιράζεται σε τρεις χώρες: τη Βουλγαρία που είναι η ανάντη χώρα και την Ελλάδα και την Τουρκία που είναι οι κατάντη χώρες. Ιδιαίτερα δε, όταν η ανάντη χώρα, που κατασκεύασε μεγάλα φράγματα, ενδιαφέρεται κύρια για την οικονομική τους εκμετάλλευση και ελάχιστα για τη διάθεση οικονομικών πόρων για την κατάστρωση εξειδικευμένων διαχειριστικών σχεδίων για την αντιπλημμυρική προστασία των κατάντη χωρών.

2. ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΑΝΤΙΠΛΗΜΜΥΡΙΚΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

Σε όλο τον κόσμο, η αντιμετώπιση των πλημμυρών γίνεται με τους ακόλουθους τρόπους (Kundzewicz, 2001):

A. Ενέργειες πριν τις πλημμύρες με σκοπό τη μείωση της ευπάθειας έναντι αυτών

- Σχεδιασμός χρήσεων γης.
- Καθορισμός ζωνών όπου συγκεκριμένες χρήσεις γης επιτρέπονται ή απαγορεύονται.

- Έλεγχος στην ανάπτυξη περιοχών με υψηλό κίνδυνο πλημμυρών, εγκαταλείποντας κατακλυζόμενες περιοχές.
- Αποζημίωση γης και ιδιοκτησιών, που βρίσκονται σε περιοχές που πλημμυρίζουν, ενθαρρύνοντας επανεγκατάσταση σε άλλες περιοχές.
- Αντιπλημμυρική προστασία (μέσω υψομετρικής διαφοράς, αναχωμάτων, στεγανοποίησης, κ.λπ.).
- Συστήματα πρόγνωσης και έγκαιρης προειδοποίησης.
- Αύξηση επαγρύπνησης βελτιώνοντας την πληροφόρηση και την εκπαίδευση στις πλημμύρες και στις ενέργειες, που πρέπει να γίνουν σε περίπτωση ανάγκης, πολιτική προστασία.
- Ασφάλιση για τον κίνδυνο πλημμύρας.
- Νομοθεσία.

Β. Αντιπλημμυρικά έργα

- Φράγματα και ταμιευτήρες ελέγχου πλημμύρας, αντιπλημμυρικές τάφροι, αναχώματα, έργα εκτροπής.
- Βελτίωση παροχετευτικότητας ποταμών, ώστε να μπορούν να διοδεύσουν το πλημμυρικό κύμα.
- Έλεγχος στη πηγή μέσω της διαχείρισης της υδρολογικής λεκάνης.
- Αύξηση χώρων προσωρινής αποθήκευσης – κατάκλισης και υγροτόπων.
- Αύξηση διήθησης και διαπερατών επιφανειών.
- Διαχείριση φυτοκάλυψης, δασοκάλυψης και αποφυγή γυμνού εδάφους κατά την περίοδο βροχοπτώσεων.
- Δημιουργία αναβαθμίδων (πεζούλες) και όργανα παράλληλα με τις ισοϋψείς.

Γ. Ενέργειες μείωσης συνεπειών πλημμυρών (κατά τη διάρκεια και μετά τις πλημμύρες)

- Εκτίμηση πιθανότητας δημιουργίας πλημμύρας, πρόβλεψη ανώτατης στάθμης νερού στον ποταμό και συνθηκών ροής, γνωστοποίηση στις αρμόδιες αρχές και στο κοινό της έκτασης, της σοβαρότητας και του χρόνου της πλημμύρας, διάχυση της προειδοποίησης, εκκένωση.
- Οικονομική βοήθεια (ασφαλιστικές αποζημιώσεις, δάνεια, έκπτωση φόρων, πάγωμα χρεών), ανακούφιση των πληγέντων.
- Επανακατασκευή των καταστραφέντων κτιρίων, υποδομών και αντιπλημμυρικών έργων, αποκατάσταση του περιβάλλοντος και των οικονομικών δραστηριοτήτων.
- Επανεξέταση των ενεργειών διαχείρισης πλημμύρας με στόχο τη βελτίωση των διαδικασιών και του σχεδιασμού για μελλοντικά πλημμυρικά γεγονότα (παραπομπή στις Α & Β).

Τα προαναφερθέντα παραπάνω μέτρα αντιπλημμυρικής προστασίας διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες: α) κατασκευαστικά – structural (“hard”), και β) μη κατασκευαστικά μέτρα – ήπιες δράσεις (“soft”). Τα κατασκευαστικά μέτρα, όπως φράγματα, αναχώματα κ.λπ. έχουν μακρά παράδοση, καθώς κατασκευάζονται εδώ και 4000 χρόνια. Κατασκευάζοντας ταμιευτήρες, όπου το περίσσειμα του νερού μπορεί να αποθηκευτεί προσωρινά, ρυθμίζεται η κατανομή της πλημμυρικής παροχής, και αποφεύγεται η πλημμύρα με τη μείωση της αιχμής. Συνεπώς ο όρος «κατασκευαστικά μέτρα – structural» αναφέρεται σε μεγάλης κλίμακας αντιπλημμυρικά έργα, όπως: φράγματα και ταμιευτήρες ρύθμισης, αναχώματα, εκτροπές, βελτιώσεις της παροχετευτικής ικανότητας του ποταμού (εκβάθυνση, αύξηση πλάτους, προστασία της όχθης, ευθυγράμμιση άξονα – αύξηση κλίσης, κ.λπ.). Έτσι, τα υπόλοιπα μέτρα

αντιπλημμυρικής προστασίας, που αφορούν κατανεμημένα μέτρα σε όλη την υδρολογική λεκάνη, που είναι μικρής κλίμακας, θεωρούνται ήπιες (soft) δράσεις.

Αξίζει εδώ να αναφερθούν ορισμένες εσφαλμένες αντιλήψεις - «μύθοι», που δημιουργήθηκαν με την πάροδο του χρόνου σχετικά με τις πλημμύρες και την αντιπλημμυρική προστασία (Kundzewicz, 2001):

A. Τα συστήματα αντιπλημμυρικής προστασίας εγγυώνται απόλυτη ασφάλεια

Επειδή τα φράγματα και τα αναχώματα κοστίζουν τόσα πολλά χρήματα, οι άνθρωποι νομίζουν, ότι πρέπει να αντιστέκονται με επιτυχία σε μεγάλες πλημμύρες.

B. Οι πλημμύρες συμβαίνουν σε σχεδόν κανονικά (περιοδικά) χρονικά διαστήματα

Πολλοί πιστεύουν, ότι αφού μια πλημμύρα με περίοδο επαναφοράς 100 ετών συνέβη πρόσφατα, η επόμενη ίδια πλημμύρα δεν θα συμβεί κατά τη διάρκεια ζωής αυτής της γενιάς, οπότε δεν απαιτείται να ληφθούν μέτρα αντιπλημμυρικής προστασίας και να δαπανηθούν «άσκοπα» χρηματικοί πόροι. Και όμως, συμβαίνει πολλές φορές, αντίστοιχης περιόδου επαναφοράς πλημμύρες να κάνουν την επίσκεψή τους τα αμέσως επόμενα χρόνια.

Γ. Αμετάβλητος κόσμος: οι γεωφυσικές διαδικασίες στο μέλλον θα είναι όμοιες με αυτές στο παρελθόν

Έχοντας ζήσει σε ένα μέρος για κάποιο διάστημα, κάποιος έχει την αίσθηση του τι αναμένεται. Κάποιοι δύσκολα μπορούν να αντιληφθούν, ότι ένα επόμενο πλημμυρικό κύμα μπορεί να έχει διάσταση, που θα ξεπερνάει σημαντικά όλα τα προηγούμενα καταγραφέντα.

Δ. Πλημμύρες δεν συμβαίνουν σε όλους τους ποταμούς

Πολλοί πιστεύουν, ότι πλημμύρες συμβαίνουν συχνά σε «υγρές» περιοχές, όπως π.χ. στο Bangladesh. Δεν είναι αντιληπτό, ότι καταστροφικές πλημμύρες συμβαίνουν επίσης και σε περιοχές με ξηρασία, όπου ο πληθυσμός είναι απροετοίμαστος.

3. ΗΠΙΕΣ ΔΡΑΣΕΙΣ ΑΝΤΙΠΛΗΜΜΥΡΙΚΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

Μέχρι πριν από 50 χρόνια, η αντιμετώπιση των κινδύνων των πλημμυρών γίνονταν με κατασκευές έργων μηχανικού, ολοένα αυξανόμενου μεγέθους και κλίμακας εφαρμογής, με βάση τη φιλοσοφία της «τιθάσευσης» της φύσης. Σήμερα αναπτύσσεται ένας προβληματισμός σχετικά με τα υπέρ και τα κατά των μεγάλων κατασκευαστικών παρεμβάσεων. Η σύγχρονη τάση είναι η εφαρμογή ενός μικτού σχήματος τόσο από κατασκευαστικές όσο και από ήπιες παρεμβάσεις. Οι ήπιες δράσεις (non-structural measures) αντιπλημμυρικής προστασίας διακρίνονται στις ακόλουθες τέσσερις κύριες ομάδες (Kundzewicz, 2001):

A. Πρόγνωση πλημμύρας και έγκαιρη προειδοποίηση

Είναι πολύ σημαντική και είναι πιθανόν να σώσει ζωές. Βασίζεται στις ανεπτυγμένες σήμερα μεθόδους αξιόπιστης μετεωρολογικής πρόγνωσης μερικών ημερών (ύψος επερχόμενης βροχής) και επιτρέπει την κατασκευή εξειδικευμένου υδρολογικού λογισμικού, που προβλέπει μερικές μέρες πριν το συμβάν τις παροχές, στάθμες νερού, κ.λπ. στο χώρο και το χρόνο. Τα τελευταία χρόνια γίνονται πολλές προσπάθειες για τη βελτίωση της ακρίβειας των μετεωρολογικών προβλέψεων και για την επιμήκυνση του χρονικού ορίζοντα.

B. Διαχείριση υδρολογικής λεκάνης

Πρόκειται για σημαντικά μέτρα αντιπλημμυρικής προστασίας, καθώς τροποποιείται ο σχηματισμός πλημμύρας με έλεγχο στην πηγή. Αφορά τις χρήσεις γης και τη συγκράτηση του εδαφικού υλικού με στόχο τη μείωση της επιφανειακής απορροής, της διάβρωσης και της μεταφοράς φερτών, μέσω δημιουργίας αναβαθμίδων (πεζούλες) και οργώματος παράλληλα με τις ισοϋψείς, και μέσω της διαχείρισης της φυτοκάλυψης και

της δασοκάλυψης. Η ιδέα της «συγκράτησης του νερού στη θέση που πέφτει» υλοποιείται με μέτρα, όπως η αύξηση της διήθησης, η μείωση των αδιαπέρατων επιφανειών, η αύξηση της αποθήκευσης σε φυσικές ή τεχνητές λίμνες. Αυξάνοντας τη συγκράτηση, εξουδετερώνονται οι αντίθετες επιδράσεις της αστικοποίησης, καθώς η συγκρατούμενη ποσότητα νερού θα αύξανε την αιχμή του υδρογραφήματος. Η διαχείριση της υδρολογικής λεκάνης περιλαμβάνει επίσης την αύξηση των χώρων αποθήκευσης μέσα στο υδρογραφικό δίκτυο (χώροι κατάκλισης δίπλα στο ποτάμι, αποξηραμένες εκτάσεις προστατευόμενες με αναχώματα, κ.λπ.).

Γ. Επανεγκατάσταση σε ασφαλείς περιοχές

Εάν οι άνθρωποι έχουν οικοδομήσει μέσα στην ευρύτερη πλημμυρική κοίτη του ποταμού, τότε δεν υπάρχει λύση. Γι' αυτό προληπτικά μέτρα, όπως καθορισμός ζωνών και οριοθέτηση της πλημμυρικής ζώνης είναι αναγκαία. Ωστόσο μερικές φορές, μόνιμη εκκένωση τέτοιων κατακλυζόμενων περιοχών είναι αδιανόητη, όπως π.χ. στο Bangladesh – μια πυκνοκατοικημένη περιοχή σε μια υποανάπτυκτη χώρα, ίσως την περισσότερο πληττόμενη από πλημμύρες χώρα του κόσμου. Η χώρα του Bangladesh πρέπει κυριολεκτικά να ζει με τις καταστροφικές πλημμύρες, καθώς το μεγαλύτερο μέρος της καλλιεργήσιμης γης αποτελείται από κατακλυζόμενες εκτάσεις, η γονιμότητα των οποίων εξαρτάται από την «επίσκεψη» των πλημμυρών. Νέα αναχώματα, ακόμα και αν μπορούσαν οικονομικά να κατασκευαστούν, θα στερούσαν πολύτιμη γη.

Δ. Ασφάλιση, αρωγή του δημοσίου και αποκατάσταση μετά την πλημμύρα

Είναι αναγκαίο να υπάρξει αρωγή του δημοσίου για την αποκατάσταση ζημιών μετά την πλημμύρα με τη μορφή αποζημιώσεων, δανείων και άλλων διευκολύνσεων στους πληγέντες, και να αποκατασταθούν οι οικονομικές δραστηριότητες το συντομότερο δυνατό.

Προφανώς, οι ήπιες (soft) δράσεις δεν μπορούν από μόνες τους να δώσουν ικανοποιητική λύση σε πληττόμενες από πλημμύρες περιοχές. Είναι οπωσδήποτε απαραίτητες οι κατασκευαστικές δράσεις. Στην Ιαπωνία η ύπαρξη τεράστιων πόλεων δίπλα σε τεράστιους ποταμούς, όπου καμία αστοχία αναχώματος δεν επιτρέπεται, έχει οδηγήσει σε πολυδάπανα κατασκευαστικά έργα, όπως super-αναχώματα, που είναι πολύ ψηλά και με πλάτος 300-500m. Από την άλλη μεριά, κατανεμημένα, μικρής κλίμακας κατασκευαστικά έργα, όπως συγκράτηση του νερού στα ανάντη, αύξηση διαπερατών επιφανειών, κανονισμοί οικοδόμησης, κ.λπ. θεωρούνται ως «αιεφορικά» μέτρα προστασίας.

Η νέα σύγχρονη αντίληψη για τις ήπιες δράσεις αντιπλημμυρικής προστασίας έχει επηρεάσει και την Ιαπωνία. Η νέα φιλοσοφία μπορεί να περιγραφεί ως μετατόπιση «από τα ποτάμια στις υδρολογικές λεκάνες» (Takeuchi, 2001). Η στρατηγική του περιορισμού των πλημμυρών με κατά μήκος άξονες (αναχώματα) μέσα στα ποτάμια, έχει αλλάξει σε διαχείριση των πλημμυρών στην υδρολογική λεκάνη. Η αλλαγή αυτή υπαγορεύτηκε και από το γεγονός, ότι η πρόσφατη αύξηση των πλημμυρικών γεγονότων και των καταστροφών, δεν μπορεί να αντιμετωπιστεί μόνο με την παραδοσιακή στρατηγική. Με βάση τη νέα φιλοσοφία, οι υδρολογικές λεκάνες στην Ιαπωνία διαχωρίζονται σε περιοχές I, II-1, II-2, και III, όπου ανάλογα προβλέπονται δυνατότητες προσωρινής συγκράτησης ή προστασία με συνεχή αναχώματα και υπερυψώσεις, ή με κατασκευές που αντέχουν στις πλημμύρες, κ.λπ.

4. ΤΟ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΟΥ ΔΙΑΚΡΑΤΙΚΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ ΕΒΡΟΥ

Ο ποταμός Έβρος είναι ένας από τους μεγαλύτερους σε μήκος ποταμούς της Βαλκανικής χερσονήσου με συνολική έκταση υδρολογικής λεκάνης 53000 km², από

την οποία το 66% (34169 km²) ανήκει στη Βουλγαρία, το 28% στην Τουρκία και το 6% στην Ελλάδα. Εντός της Βουλγαρίας το μήκος του ποταμού είναι περίπου 320 km με μια μέση κλίση 7.7%. Διασχίζει τα Ελληνοβουλγαρικά σύνορα και μέχρι να φτάσει στο Αιγαίο αποτελεί το φυσικό σύνορο μεταξύ Ελλάδας και Τουρκίας.

Στο Βουλγαρικό τμήμα της υδρολογικής λεκάνης του Έβρου έχει κατασκευαστεί ένας σημαντικός αριθμός μεγάλων φραγμάτων (περισσότερα από 15) κατά την περίοδο 1950 – 1970. Η συνολική χωρητικότητα των ταμιευτήρων ανέρχεται σε $2810 \times 10^6 \text{ m}^3$ και η συνολική έκταση, που παροχετεύει τα νερά της στους ταμιευτήρες αυτούς, υπερβαίνει τα 12800 km² από το σύνολο των 34169 km² (Artinyan et al., 2008). Έτσι το 37.5% της απορροής στο Βουλγαρικό τμήμα της υδρολογικής λεκάνης ελέγχεται από τα φράγματα. Συνεπώς, στο Ελληνοτουρκικό κατάντη τμήμα του ποταμού Έβρου δεν εισέρχεται πλέον απευθείας η απορροή της υδρολογικής λεκάνης, όπως παλιά πριν από την κατασκευή των φραγμάτων, αλλά κυρίως εισέρχονται οι απελευθερούμενες ποσότητες νερού μέσω των φραγμάτων. Συνεπώς η διαχείριση αυτών των ποσοτήτων νερού είναι καθοριστικής σημασίας για τις προκαλούμενες πλημμύρες.

Κατά την τελευταία 20ετία υπάρχει μια δραματική αύξηση της συχνότητας πλημμυρών (εξαπλασιασμός της συχνότητας εμφάνισης των πλημμυρών, σύμφωνα με Angelidis et al., 2010), τα αίτια της οποίας αξίζει να διερευνηθούν. Οι κλιματικές αλλαγές μπορεί ενδεχομένως να είναι εν μέρει υπεύθυνες γι' αυτή τη δραματική αύξηση της συχνότητας των πλημμυρών. Ο Velev (1996) ανέλυσε τις κλιματικές μεταβολές βασιζόμενος σε δεδομένα θερμοκρασίας αέρα και βροχόπτωσης 18 Βουλγαρικών σταθμών για την περίοδο 1916-1993. Καμιά ουσιαστική μεταβολή δεν παρατήρησε στη μέση ετήσια θερμοκρασία της Βουλγαρίας. Όπως επισημάνθηκε από τους Vassilev and Georgiev (1996) και τον Yordanova (1996), οι κλιματικές αλλαγές που εμφανίστηκαν στη νότια Βουλγαρία τα τελευταία χρόνια είχαν ως αποτέλεσμα τη μείωση της βροχόπτωσης και της απορροής των ποταμών. Σε προκαταρκτικές έρευνες, που βασίστηκαν σε κατανεμημένα δεδομένα επιφανειακής κλιματολογίας για την Ευρώπη, οι Knight and Staneva (1996) διαπίστωσαν στατιστικά αρνητική τάση για την ετήσια βροχόπτωση για ολόκληρη τη Βουλγαρία για την περίοδο 1961-1994, με μεγαλύτερες μειώσεις στις περιοχές υψηλότερου υψομέτρου. Άλλες αιτίες, όπως π.χ. μεταβολή χρήσεων γης, είναι δυνατόν να επηρεάσουν την απορροή, αλλά όχι σε τέτοιο βαθμό, ώστε να προκαλέσουν εξαπλασιασμό της συχνότητας πλημμυρών.

Είναι γνωστό, ότι πλημμύρες δημιουργούνται, όταν η αιχμή του εισερχόμενου πλημμυρικού υδρογραφήματος στο Ελληνοτουρκικό τμήμα του ποταμού ξεπερνάει τα 2500 m³/s, καθώς υπερπιδώνται ή θραύονται τα αναχώματα, που είναι κατασκευασμένα αριστερά και δεξιά του ποταμού. Έτσι, για ένα «σύνθηες», «τυπικό» υδρογράφημα με παροχή αιχμής της τάξεως των 2900 m³/s, ο όγκος νερού που πλημμυρίζει, είναι της τάξεως των $32 \times 10^6 \text{ m}^3$. Το ερώτημα που εύλογα τίθεται είναι, αν θα μπορούσε να γίνει κατάλληλη διαχείριση της ποσότητας αυτής, ώστε να αποφευχθούν οι πλημμύρες. Είμαστε πεπεισμένοι, ότι με κατάλληλη διαχείριση των Βουλγαρικών φραγμάτων είναι δυνατό να αποφευχθούν τέτοιου είδους πλημμύρες. Άλλωστε, ο παραπάνω όγκος νερού πλημμύρας αποτελεί μόλις το 1.2% της χωρητικότητας των ταμιευτήρων των μεγαλύτερων φραγμάτων ($2810 \times 10^6 \text{ m}^3$). Συνεπώς, η διαχείριση αυτών των ποσοτήτων νερού από τα φράγματα είναι καθοριστικής σημασίας για τις δημιουργούμενες πλημμύρες.

Μετά την πολιτική αλλαγή στη Βουλγαρία στις αρχές της δεκαετίας του 1990, μια ιδιωτική εταιρία παραγωγής ηλεκτρισμού είναι υπεύθυνη για τα μεγαλύτερα Βουλγαρικά φράγματα. Είναι αναμενόμενο, ότι ο κύριος στόχος της εταιρίας είναι να προσπαθεί να «μεγιστοποιήσει» την παραγόμενη υδροηλεκτρική ενέργεια, ακολουθώντας την απλοποιημένη στρατηγική της διατήρησης της στάθμης του νερού

στους ταμιευτήρες υπεράνω της στέψης του υπερχειλιστή, κρατώντας τα θυροφράγματα κλειστά, ώστε να μεγιστοποιηθεί το ωφέλιμο ύψος πτώσεως και ο αποθηκευμένος όγκος νερού. Όταν όμως συμβεί μια ισχυρή βροχόπτωση στην υδρολογική λεκάνη του φράγματος, το οποίο ήδη λειτουργεί με τη στάθμη του ταμιευτήρα στο υψηλότερο επίπεδο, τότε δημιουργείται κίνδυνος υπερπήδησης του φράγματος, και οι χειριστές του για να τον αποφύγουν ανοίγουν τα θυροφράγματα. Η αιχμή του υδρογραφήματος, που δημιουργείται λόγω λειτουργίας του υπερχειλιστή, μπορεί να είναι πολύ μεγαλύτερη από την αιχμή του πλημμυρικού υδρογραφήματος, που θα δημιουργούνταν χωρίς την παρουσία του φράγματος κάτω από τις ίδιες μετεωρολογικές συνθήκες. Συνεπώς πρέπει να αναζητηθεί μια καλύτερη στρατηγική διαχείρισης, η οποία θα έχει στόχο τη μεγιστοποίηση της παραγόμενης ενέργειας, αλλά με περιορισμό της παροχής αιχμής, για την αποφυγή πλημμυρών στα κατάντη.

5. ΟΡΘΟΛΟΓΙΚΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ

Από τις διάφορες προαναφερθείσες ήπιες δράσεις αντιπλημμυρικής προστασίας, κρίνεται περισσότερο σημαντική για την περίπτωση του διακρατικού ποταμού Έβρου, η δράση της ορθολογικής διαχείρισης των φραγμάτων σε συνδυασμό με έγκαιρη πρόγνωση και προσομοίωση βροχόπτωσης – απορροής. Για τον λόγο αυτό αναπτύχθηκε ένα νέο διαχειριστικό εργαλείο (λογισμικό) για την προσομοίωση της διαχείρισης (πρώτη δοκιμαστική έκδοση) των πλημμυρικών απορροών του ποταμού Έβρου. Ο κύριος λόγος, που οδήγησε στην ανάπτυξή του, είναι η ύπαρξη μεγάλου αριθμού φραγμάτων και κυρίως η προσομοίωση της λειτουργίας τους όχι μόνο από υδρολογική σκοπιά, αλλά επίσης από διαχειριστική με έμφαση στην «ενεργειακή – οικονομική» διάσταση της λειτουργίας των φραγμάτων.

Το αναπτυχθέν μοντέλο, που ονομάστηκε Envofloods, απαιτεί ως είσοδο προβλέψεις βροχόπτωσης σε όλη την υδρολογική λεκάνη καθώς και τις στάθμες των ταμιευτήρων κατά την έναρξη της προσομοίωσης. Στη συνέχεια υπολογίζει (προβλέπει) μερικές μέρες πιο μπροστά τις παροχές σε διάφορες κρίσιμες θέσεις του ποταμού Έβρου, ανάλογα με τον τρόπο που θα γίνει διαχείριση του νερού των φραγμάτων. Υπολογίζει επίσης τους χρόνους ταξιδιού μέχρι τα Ελληνοβουλγαρικά σύνορα των πλημμυρικών κυμάτων, που δημιουργούνται από τα ανοίγματα των θυροφραγμάτων των υπερχειλιστών. Σε κάθε περίπτωση υπολογίζει την ενέργεια, που παράγεται, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα οικονομικής αξιολόγησης των ενεργειών διαχείρισης των νερών των φραγμάτων, με στόχο την επιλογή της βέλτιστης στρατηγικής αλλά και την αποτίμηση του κόστους της αντιπλημμυρικής προστασίας. Αναλυτική περιγραφή του αναπτυχθέντος λογισμικού και των δυνατοτήτων του γίνεται στην εργασία Angelidis et al. (2010).

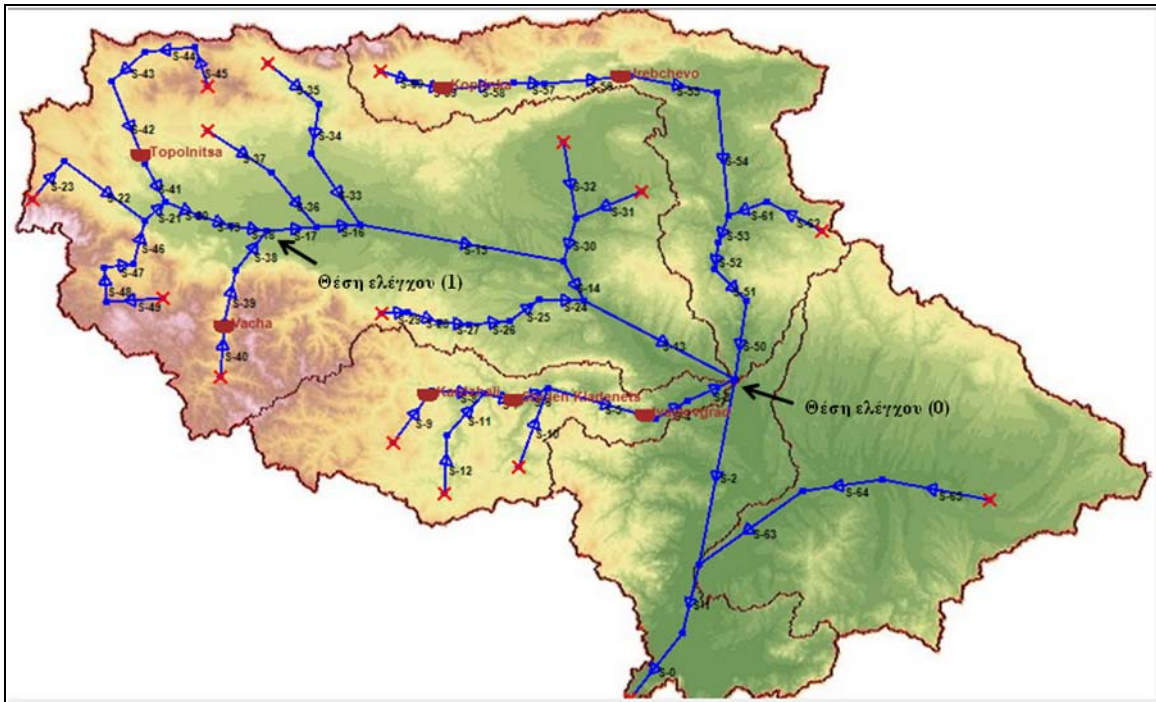
Για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας του τρόπου διαχείρισης της πλημμυρικής απορροής και ιδιαίτερα των φραγμάτων χρησιμοποιούνται δύο κριτήρια (Πεταλά, 2011): α) Η πλημμυρική παροχή αιχμής του υδρογραφήματος στο ύψος της Ανδριανούπολης, όπου συμβάλει ο ποταμός Έβρος με δύο μεγάλους παραποτάμους του, δηλαδή τον Άρδα και τον Τούντζα, και β) το ενεργειακό αποτέλεσμα (όφελος ή ζημία) στο τέλος του πλημμυρικού επεισοδίου σε σχέση με την ενεργειακή κατάσταση τη στιγμή της έναρξής του ($E_{end} - E_{begin}$). Για τον υπολογισμό του ενεργειακού αποτελέσματος θεωρείται ως χρονική στιγμή $t=0$, ο χρόνος 3 ημερών πριν από την έναρξη της βροχής. Η επιλογή αυτή γίνεται, γιατί η σημερινή τεχνολογία επιτρέπει ασφαλή πρόβλεψη της βροχής και της χωρικής της κατανομής για μελλοντικό χρόνο 3 ημερών και συνεπώς δίνεται η δυνατότητα έγκαιρης προετοιμασίας και αντίδρασης στους διαχειριστές των φραγμάτων μέσα στον χρόνο αυτό.

Έτσι, ως ενέργεια E_{begin} ορίζεται η ενέργεια που θα μπορούσε να παραχθεί τον χρόνο $t=0$, με βάση τη στάθμη του ταμιευτήρα, τον αποθηκευμένο όγκο νερού στο φράγμα και την υπόθεση, ότι η ενέργεια αυτή θα παραχθεί σε ώρες υψηλής ζήτησης, που είναι οικονομικά περισσότερο αποδοτική. Ως ενέργεια E_{end} ορίζεται, όπως παραπάνω, η ενέργεια που μπορεί να παραχθεί μετά τη λήξη του πλημμυρικού επεισοδίου σε ώρες υψηλής ζήτησης με βάση τη στάθμη του ταμιευτήρα και τον όγκο του αποθηκευμένου νερού συν την ενέργεια που έχει παραχθεί κατά τη διάρκεια του πλημμυρικού επεισοδίου. Η παραγόμενη ενέργεια κατά τη διάρκεια του πλημμυρικού επεισοδίου διακρίνεται στην ηθελημένη – προγραμματισμένη παραγωγή κατά τις ώρες υψηλής ζήτησης και στη μη ηθελημένη παραγωγή κατά τις ώρες χαμηλής ζήτησης, που γίνεται για λόγους υποβιβασμού της στάθμης του ταμιευτήρα, ώστε να μπορέσει να παραληφθεί η επερχόμενη πλημμυρική απορροή. Είναι προφανές, ότι η παραγωγή ενέργειας σε ώρες χαμηλής ζήτησης είναι λιγότερο οικονομικά αποδοτική και για τον λόγο αυτό χρησιμοποιείται ένας συντελεστής ισοδυναμίας λ για τη μετατροπή της παραγόμενης ενέργειας σε ώρες χαμηλής ζήτησης σε ισοδύναμη με παραγόμενη σε ώρες υψηλής ζήτησης.

Με βάση τα παραπάνω, η διαφορά ($E_{end} - E_{begin}$) αντιπροσωπεύει το ενεργειακό αποτέλεσμα σε Mwh, που μπορεί να είναι θετικό, δηλαδή να υπάρχει όφελος ή να είναι αρνητικό, που σημαίνει κόστος είτε λόγω κακής διαχείρισης είτε για λόγους αντιπλημμυρικής προστασίας. Το παραπάνω ενεργειακό αποτέλεσμα αποτιμάται εύκολα και χρηματικά. Στην παρούσα εργασία λήφθηκε συντελεστής αποτίμησης 74,49 €/MWh και συντελεστής ισοδυναμίας λ ίσος με 0,5 καθώς η ενέργεια που παράγεται σε ώρες χαμηλής ζήτησης πωλείται περίπου 50% φθηνότερα από την παραγόμενη σε ώρες αιχμής (Angelidis et al., 2010).

Για να γίνει κατανοητή η σπουδαιότητα του τρόπου διαχείρισης των φραγμάτων, παρουσιάζονται στη συνέχεια συνοπτικά λίγα μόνο διαχειριστικά σενάρια για την περίπτωση του διακρατικού ποταμού Έβρου. Στο Σχήμα 1, φαίνεται η διακριτοποίηση της υδρολογικής λεκάνης σε υπολεκάνες και τμήματα ποταμού με περίπου ομοιογενή χαρακτηριστικά, καθώς και μερικά από τα σπουδαιότερα φράγματα, όπως Topolnitsa στα βορειοδυτικά, Vacha στα νοτιοδυτικά, τα τρία φράγματα Kardjali, Student Kladenets και Ivaylovgrad του παραπόταμου Άρδα στα νότια και τα δύο φράγματα του παραπόταμου Τούντζα, Korinka και Jrebchono στο βορά. Έστω η βροχή της 02/10/2005, η οποία διατίθεται καταγεγραμμένη σε 17 μετεωρολογικούς σταθμούς διασπαρμένους στην υδρολογική λεκάνη, με ύψη που κυμάνθηκαν από 6.4 mm έως 73.7 mm. Με το μέθοδο των πολυγώνων Thiessen υπολογίσθηκε και εφαρμόσθηκε το αντιστοιχούν ύψος βροχής σε κάθε μία υπολεκάνη. Κατά τον χρόνο $t=0$, ας υποθέσουμε ότι οι ταμιευτήρες των προαναφερθέντων φραγμάτων ήταν γεμάτοι μέχρι τη στέψη του υπερχειλιστή τους.

Ως ένα πρώτο σενάριο εργασίας Σ1 ας υποθέσουμε, ότι ακολουθείται η απλοποιημένη στρατηγική της διατήρησης της στάθμης του νερού στους ταμιευτήρες υπεράνω της στέψης του υπερχειλιστή, κρατώντας τα θυροφράγματα κλειστά, ώστε να μεγιστοποιηθεί το ωφέλιμο ύψος πτώσεως και ο αποθηκευμένος όγκος νερού (Πεταλά, 2011). Όταν η στάθμη του ταμιευτήρα φτάσει στο υψηλότερο δυνατό επίπεδο (π.χ. 1.50 m κάτω από την στέψη του φράγματος), τότε δημιουργείται κίνδυνος υπερπήδησης και οι χειριστές του για να τον αποφύγουν ανοίγουν τα θυροφράγματα.

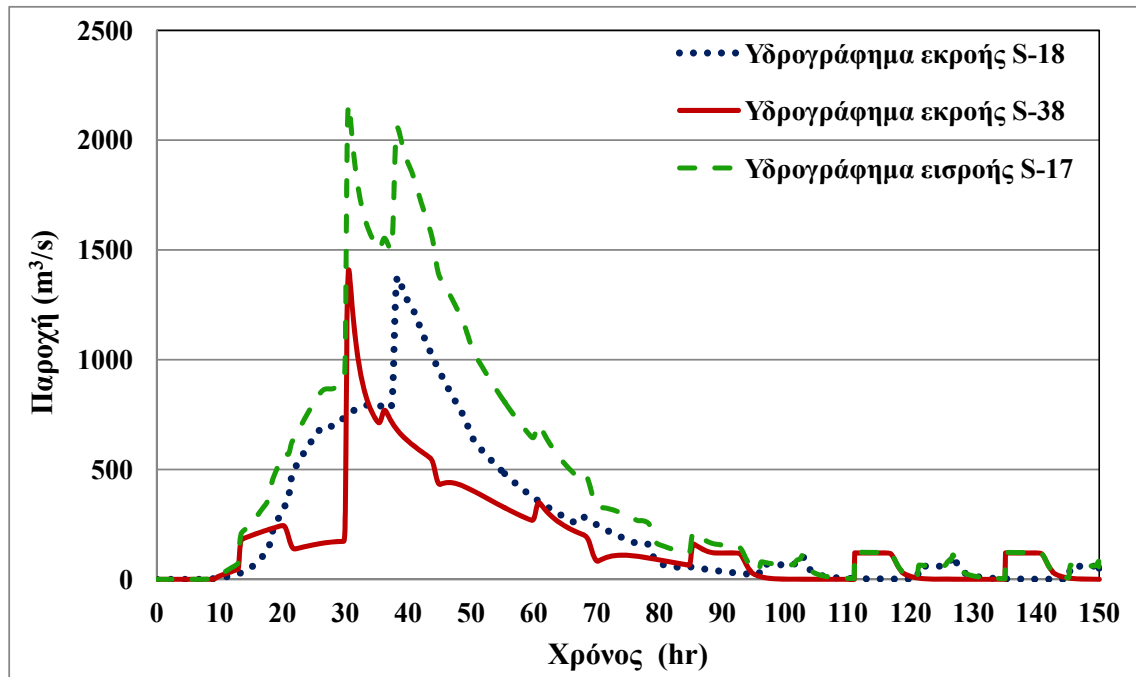


Σχήμα 1. Προσομοίωση της υδρολογικής - υδραυλικής συμπεριφοράς της υδρολογικής λεκάνης του ποταμού Έβρου με το αναπτυχθέν λογισμικό Evrofloods.

Όπως προκύπτει από την προσομοίωση με το λογισμικό Evrofloods, το φράγμα Vacha, που έχει κλειστά τα θυροφράγματα, συγκρατεί την εισερχόμενη απορροή και όταν η στάθμη του ταμιευτήρα φτάσει στο όριο συναγερμού, οι χειριστές ανοίγουν τα θυροφράγματα και απελευθερώνουν ταχύτατα μεγάλες παροχές, οι οποίες διοδεύονται προς τα κατάντη μέσα στα υδατορεύματα. Στη θέση ελέγχου (1) του Σχήματος 1 το υδρογράφημα εισροής S-38 έχει τη μορφή, που φαίνεται στο Σχήμα 2 και όπως παρατηρείται, η παροχής αιχμής είναι $1409 \text{ m}^3/\text{s}$ και η εμφάνισή της γίνεται την $30.5^{\text{η}}$ ώρα. Το ίδιο συνέβη και με το φράγμα Topolnitsa, ο υπερχειλιστής του οποίου άνοιξε και απελευθέρωσε ξαφνικά μεγάλες ποσότητες νερού, οι οποίες διοδεύονται κατάντη μέσα στο δίκτυο των υδατορευμάτων, μαζί φυσικά και με τις απορροές των άλλων υπολεκανών της περιοχής. Έτσι στη θέση ελέγχου (1) φτάνει το υδρογράφημα S-18 του Σχήματος 2, το οποίο έχει παροχή αιχμής $1379 \text{ m}^3/\text{s}$ και άφιξη την $38.3^{\text{η}}$ ώρα. Ευτυχής σύμπτωση είναι το γεγονός, ότι οι αιχμές των 2 υδρογραφημάτων παρουσιάζουν χρονική υστέρηση 8 περίπου ωρών και «αθροιζόμενα» δίνουν το υδρογράφημα S-17 του Σχήματος 2. Είναι προφανές, ότι η παροχή αιχμής θα ήταν πολύ μεγαλύτερη, αν για παράδειγμα η βροχή άρχιζε 8 ώρες αργότερα στην περιοχή του φράγματος Vacha σε σχέση με την υπόλοιπη περιοχή του φράγματος Topolnitsa. Συνεπώς, οι ενέργειες διαχείρισης των φραγμάτων πρέπει να συντονίζονται με τέτοιο τρόπο, ώστε κατά τη συμβολή των υδρογραφημάτων των διαφόρων κλάδων, να μη συρρέουν ταυτόχρονα και «αθροίζονται» οι αιχμές τους.

Η θέση ελέγχου (0) του Σχήματος 1, που βρίσκεται πλησίον της Ανδριανούπολης, είναι μια κρίσιμη θέση, καθώς στο σημείο αυτό συμβάλει ο κύριος ποταμός Έβρος (S-13), με τον παραπόταμο Τούντζα (S-50) και τον παραπόταμο Άρδα (S-3). Όπως προκύπτει από το Σχήμα 3, η παροχή αιχμής των $1593 \text{ m}^3/\text{s}$ από τον παραπόταμο Άρδα συμπίπτει περίπου χρονικά με την παροχή αιχμής των $4110 \text{ m}^3/\text{s}$ της κύριας κοίτης του ποταμού Έβρου, που τελικώς μετά τη συμβολή τους και με τον παραπόταμο Τούντζα δημιουργούν μια υψηλότατη πλημμυρική αιχμή της τάξεως των $5766 \text{ m}^3/\text{s}$. Από τον

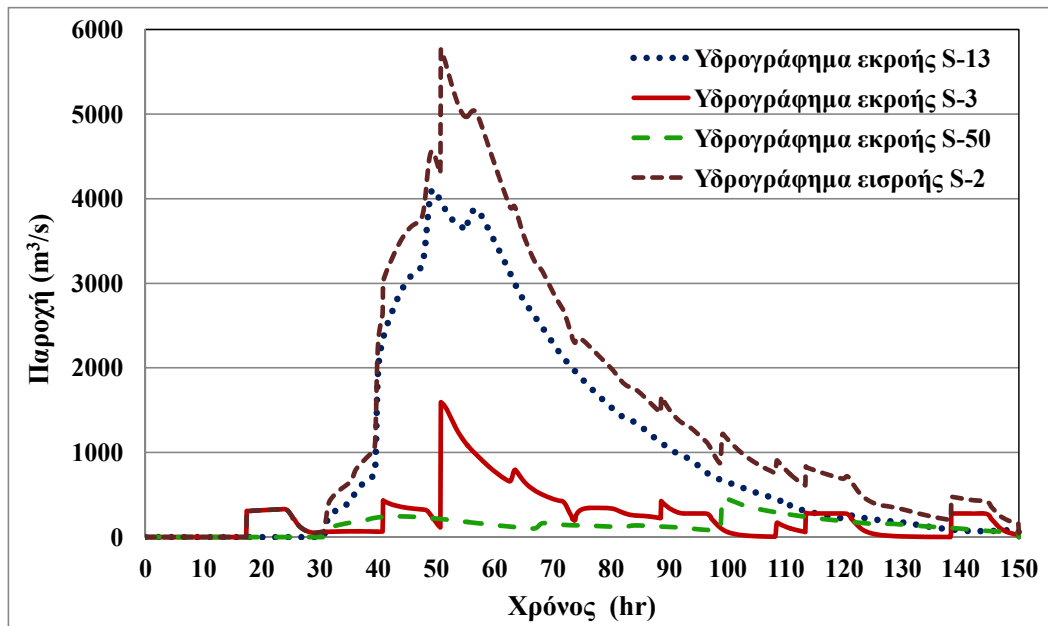
τρόπο διαχείρισης των προαναφερθέντων 7 φραγμάτων προκύπτει θετικό ενεργειακό αποτέλεσμα (όφελος) της τάξεως των 45,892 MWh, που αποτιμάται σε 3,418,499 €.



Σχήμα 2. Υδρογραφήματα στη θέση (1) από τον βορειοδυτικό κλάδο (S-18) και τον νοτιοδυτικό κλάδο (S-38), που μετά τη συμβολή τους «αθροίζονται» δίνοντας το υδρογράφημα (S-17).

Αξίζει εδώ να σημειωθεί, ότι για το ίδιο βροχομετρικό γεγονός, αν δεν υπήρχαν καθόλου φράγματα, θα προέκυπτε πλημμυρική αιχμή στην Ανδριανούπολη (θέση ελέγχου 0) ίση με $5364 \text{ m}^3/\text{s}$, δηλαδή κατά $402 \text{ m}^3/\text{s}$ μικρότερη σε σχέση με το προαναφερθέν σενάριο βάσης Σ1. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει, ότι η επιλεγείσα στρατηγική δεν είναι ορθή, δεδομένου ότι δημιουργεί μεγαλύτερη πλημμυρική αιχμή σε σχέση με την απουσία και των 7 φραγμάτων. Για τον λόγο αυτό θα αναζητηθεί εναλλακτικός τρόπος χειρισμού των φραγμάτων. Ένας τέτοιος εναλλακτικός τρόπος διαχείρισης θα ήταν ο προκαταβολικός υποβιβασμός της στάθμης ενός ταμιευτήρα μέσω της παραγωγής ενέργειας σε 24ωρη βάση, λόγω έγκαιρης (3 μέρες πριν) πρόγνωσης της επερχόμενης βροχής.

Στο σενάριο εργασίας Σ2 υποβιβάζεται η στάθμη του ταμιευτήρα του φράγματος Student Kladenets (επί του Άρδα) κατά 5.0 m, που με βάση τα τεχνικά χαρακτηριστικά των υδροστροβίλων του αντιστοιχεί σε 24ωρη παραγωγή ενέργειας για περίπου 3 μέρες πριν αρχίσει η βροχή και 8ωρη ηθελημένη παραγωγή ενέργειας στη συνέχεια κατά τη διάρκεια του πλημμυρικού επεισοδίου. Ως αποτέλεσμα προκύπτει παροχή αιχμής $4564 \text{ m}^3/\text{s}$ στη θέση ελέγχου (0) στην Ανδριανούπολη, δηλαδή σημαντικά μικρότερη σε σχέση με του σεναρίου Σ1, που ήταν $5766 \text{ m}^3/\text{s}$. Το ενεργειακό αποτέλεσμα (όφελος) είναι ελαφρώς μικρότερο σε σχέση με το σενάριο βάσης Σ1, ήτοι 44,713 MWh, που αποτιμάται σε 3,330,680 €.



Σχήμα 3. Υδρογραφήματα στη θέση ελέγχου (0)-Ανδριανούπολη από τον κύριο ποταμό Έβρο (S-13), τον παραπόταμο Τούντζα (S-50), τον παραπόταμο Άρδα (S-3), που μετά τη συμβολή τους «αθροίζονται» δίνοντας το υδρογράφημα (S-2).

Στο σενάριο εργασίας Σ3 επιλέγεται 24ωρη παραγωγή ενέργειας 3 μέρες πριν αρχίσει η βροχή αλλά και κατά τη διάρκεια του πλημμυρικού επεισοδίου με στόχο τον περεταίρω υποβιβασμό της στάθμης του ταμιευτήρα του φράγματος Student Kladenets (επί του Άρδα). Μετά από αυτό τον χειρισμό, προκύπτει ακόμα μικρότερη παροχή αιχμής ίση με $4400 \text{ m}^3/\text{s}$ στη θέση ελέγχου (0) στην Ανδριανούπολη, και ενεργειακό αποτέλεσμα (όφελος) αρκετά μεγαλύτερο σε σχέση με όλα τα προηγούμενα σενάρια, ήτοι $54,913 \text{ MWh}$, που αποτιμάται σε $4,090,482 \text{ €}$. Αυτό συνέβη, γιατί λόγω της έγκαιρης έναρξης του υποβιβασμού της στάθμης μέσω της 24ωρης παραγωγής ενέργειας, αφενός μεν αποφεύχθηκε η λειτουργία του υπερχειλιστή και η συνεπακόλουθη υψηλή παροχή αιχμής, και αφετέρου τελικά συγκρατήθηκε στον ταμιευτήρα μεγαλύτερη ποσότητα νερού για την παραγωγή ενέργειας στο μέλλον.

Τέλος, στο σενάριο εργασίας Σ4 επιλέγεται 24ωρη παραγωγή ενέργειας 3 μέρες πριν αρχίσει η βροχή αλλά και κατά τη διάρκεια του πλημμυρικού επεισοδίου με στόχο τον υποβιβασμό της στάθμης του ταμιευτήρα του φράγματος Vacha. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν ήταν τα καλύτερα από όλες τις προηγούμενες περιπτώσεις, καθώς η παροχή αιχμής μειώθηκε περεταίρω σε $3965 \text{ m}^3/\text{s}$ στη θέση ελέγχου (0) στην Ανδριανούπολη, και το ενεργειακό αποτέλεσμα (όφελος) αυξήθηκε ακόμα περισσότερο, ήτοι $58,140 \text{ MWh}$, που αποτιμάται σε $4,330,877 \text{ €}$.

Από τα παραπάνω γίνεται φανερή η σημασία της ορθολογικής διαχείρισης των φραγμάτων σε συνδυασμό με έγκαιρη πρόβλεψη και προσομοίωση τόσο για τον μετριασμό ή αποφυγή πλημμυρών όσο και για την παραγωγή ενέργειας. Συντονίζοντας τις ενέργειες εκτόνωσης των φραγμάτων είναι δυνατό, όχι μόνο να ελαττωθούν οι πλημμυρικές αιχμές, αλλά πολλές φορές ακόμα και να αυξηθεί το οικονομικό όφελος, όπως προέκυψε από την αναζήτηση εναλλακτικών τρόπων διαχείρισης των προαναφερθέντων 7 μεγάλων φραγμάτων. Στα παραπάνω σενάρια εργασίας επιχειρήθηκε εναλλακτικός χειρισμός σε ένα κάθε φορά φράγμα, και όπως προέκυψε, είναι δυνατό να βελτιωθεί σημαντικά το τελικό αποτέλεσμα. Βέβαια το πρόβλημα των κατάλληλων χειρισμών σε κάθε φράγμα, ώστε να προκύψει μέγιστο οικονομικό όφελος

και αποφυγή πλημμυρών δεν είναι καθόλου απλό, καθώς γίνεται αντιληπτός ο τεράστιος αριθμός συνδυασμών χειρισμού των φραγμάτων. Όμως η βέλτιστη λύση βρίσκεται σε έναν από τους παραπάνω συνδυασμούς ενεργειών, πρέπει να αναζητηθεί με έναν συστηματικό – μαθηματικό τρόπο, και αναμένεται να είναι εξαιρετικά επωφελής.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι Ήπιες δράσεις αντιπλημμυρικής προστασίας (non-structural measures) είναι πολύ ενδιαφέρουσες εναλλακτικές δράσεις, που είναι συμπληρωματικές των κατασκευαστικών (υδραυλικά έργα) και που μπορεί να οδηγήσουν σε μείωση των πλημμυρών. Προφανώς, οι δράσεις αυτές δεν μπορούν από μόνες τους να δώσουν ικανοποιητική λύση σε πληττόμενες από πλημμύρες περιοχές. Είναι οπωσδήποτε απαραίτητες οι κατασκευαστικές δράσεις. Η σύγχρονη τάση είναι η εφαρμογή ενός μικτού σχήματος τόσο από κατασκευαστικές όσο και από ήπιες παρεμβάσεις.

Στα πλαίσια της αντιπλημμυρικής προστασίας με ήπιες (μη κατασκευαστικές) δράσεις, διερευνήθηκε και εφαρμόστηκε στην εργασία αυτή για την περίπτωση του διακρατικού ποταμού Έβρου, η δράση της ορθολογικής διαχείρισης των φραγμάτων σε συνδυασμό με έγκαιρη πρόγνωση και προσομοίωση βροχόπτωσης – απορροής. Σύμφωνα με διάφορα διαχειριστικά σενάρια, που εξετάστηκαν στην παρούσα έρευνα, βρέθηκε ότι σε ακραία μετεωρολογικά επεισόδια (ισχυρή βροχόπτωση) είναι δυνατό με κατάλληλη διαχείριση των φραγμάτων να μετριαστούν ή ακόμα και να αποφευχθούν πλημμύρες κατάντη, χωρίς (πιθανότατα) οικονομικές απώλειες στην παραγωγή ενέργειας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Angelidis, P., Kotsikas, M., Kotsovinos N. 2010. *Management of upstream dams and flood protection of the transboundary river Evros/Maritza*. Water Resour Manag, 24: 2467–2484.
- Artinyan, E., Habets, F., Noilhan, J., Ledoux, E., Dimitrov, D., Martin, E., Moigne, P. 2008. *Modelling the water budget and the riverflows of the Maritsa basin in Bulgaria*. Hydrol. Earth Syst. Sci., 12: 21–37.
- Knight, G., Staneva, M. 1996. *The water resources of Bulgaria: an overview*. GeoJournal, 40(4): 347-362.
- Kundzewicz, Z. 2001. *Non-structural flood protection and sustainability*. Proceedings of the International Workshop on Non-structural Measures for Water Management Problems, UNESCO, Ontario, Canada, 8-27.
- Πεταλά, Ε. 2011. *Προσομοίωση υδρολογικής συμπεριφοράς λεκάνης απορροής ποταμού Έβρου με το λογισμικό Evroflows*. Μεταπτυχιακή διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Δ.Π.Θ., 404 σελ.
- Takeuchi, Z. 2001. *Flood management in Japan - from rivers to basin*. Proceedings of the International Workshop on Non-structural Measures for Water Management Problems, UNESCO, Ontario, Canada, 37-44.
- Vassilev, I., Georgiev, B. 1996. *River runoff changes and recent climatic fluctuations in Bulgaria*. GeoJournal, 40.4: 379-385.
- Velev, S. 1996. *Is Bulgaria becoming warmer and drier?* GeoJournal, 40(4): 363-370.
- Yordanova, M. 1996. *Contemporary runoff trends in some highland stream basins in Bulgaria*. GeoJournal, 40(4): 371-378.

**ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΕ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΥΠΟ
ΚΑΘΕΣΤΩΣ ΥΠΕΡ-ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ: Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ
ΛΙΜΝΗΣ ΚΑΡΛΑΣ**

Π. Σιδιρόπουλος, Ν. Μυλόπουλος

Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Πεδίον Άρεως 38334 Βόλος, Ελλάδα
Τηλ: +3024210 74153, Fax: +3024210 74169
e-mail:psidirop@uth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σε αυτήν την εργασία εξετάζεται η επίδραση που έχει η υδρογεωλογική αβεβαιότητα στην εφαρμογή μεθόδων βελτιστοποίησης σε υδροφορέα. Ο υπό μελέτη υδροφορέας είναι της λεκάνης της Κάρλας, με τα τεράστια προβλήματα υπεράντλησης και την προσπάθεια ανάταξης μέσω του νέου ταμιευτήρα. Ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης εφαρμόζεται στον υδροφορέα, για να εκτιμηθεί η μέγιστη επιτρεπόμενη άντληση από αυτόν, ώστε σε ένα εύλογο χρονικό διάστημα η στάθμη του να επανέλθει στην προτεραία κατάσταση. Το πρόβλημα αυτό εφαρμόστηκε σε ίσης πιθανότητας απεικονίσεις του υδροφορέα που προέκυψαν από τη στοχαστική προσομοίωση της υδραυλικής αγωγιμότητας. Τα συμπεράσματα αποτυπώνουν τη σημαντική επίδραση που έχει η αβεβαιότητα της υδραυλικής αγωγιμότητας όχι μόνο στην προσομοίωση αλλά και στην βελτιστοποίηση του συστήματος.

**STOCHASTIC OPTIMIZATION OF AN OVER-EXPLOITED
AQUIFER: THE CASE OF LAKE KARLA**

P. Sidiropoulos, N. Mylopoulos

Department of Civil Engineer, School of Engineering, University of Thessaly
Pedion Areos 38334 Volos, Greece
Tel: +3024210 74153, Fax: +3024210 74169
e-mail:psidirop@uth.gr

ABSTRACT

This study examines the effect of uncertainty estimation of hydraulic conductivity in the attempt to apply optimization methods to an aquifer. The under study aquifer is of Lake Karla watershed. An optimization problem is applied to the aquifer, to determine the allowable extracted water so as its water table to return to a prior status, during a reasonable period. This problem was applied in equal probability realizations of aquifer resulting from stochastic simulation of hydraulic conductivity. The findings illustrate the important effect of hydraulic conductivity uncertainty not only in aquifer's simulation but also in its optimization.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο υπόγειος υδροφορέας της λεκάνης απορροής της λίμνης Κάρλας βρίσκεται από τα τέλη της δεκαετίας του '80 σε κατάσταση υπερ-εκμετάλλευσης, μιας και συνεχώς αντλούνται τα μη ανανεώσιμα υδάτινα αποθέματά του για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών (Σιδηρόπουλος, 2004). Το γεγονός αυτό οφείλεται καθαρά στην έντονη γεωργική δραστηριότητα των τελευταίων ετών με την ανεξέλεγκτη εγκατάσταση ιδιωτικών αρδευτικών γεωτρήσεων (Γκούμας, 2005). Ως αποτέλεσμα οι πτώσεις στάθμης των πιεζομέτρων της νοτιοανατολικής περιοχής του υδροφορέα αγγίζουν τα 80 με 100 μέτρα. Όμως από τις αρχές του 2000 βρίσκονται σε εξέλιξη τα έργα επαναδημιουργίας της λίμνης Κάρλας με κυριότερο στόχο την αναστροφή της παραπάνω κατάστασης. Ήδη η λίμνη έχει κατασκευασθεί σε έκταση 38 km² και τροφοδοτείται από νερά του ποταμού Πηνειού. Προβλέπεται να καλύψει τις αρδευτικές ανάγκες 92000 στρεμμάτων, προσφέροντας μέχρι και 60 εκ. κυβικά επιφανειακό νερό το έτος. Έτσι πάρα πολλές ιδιωτικές γεωτρήσεις προβλέπεται να κλείσουν.

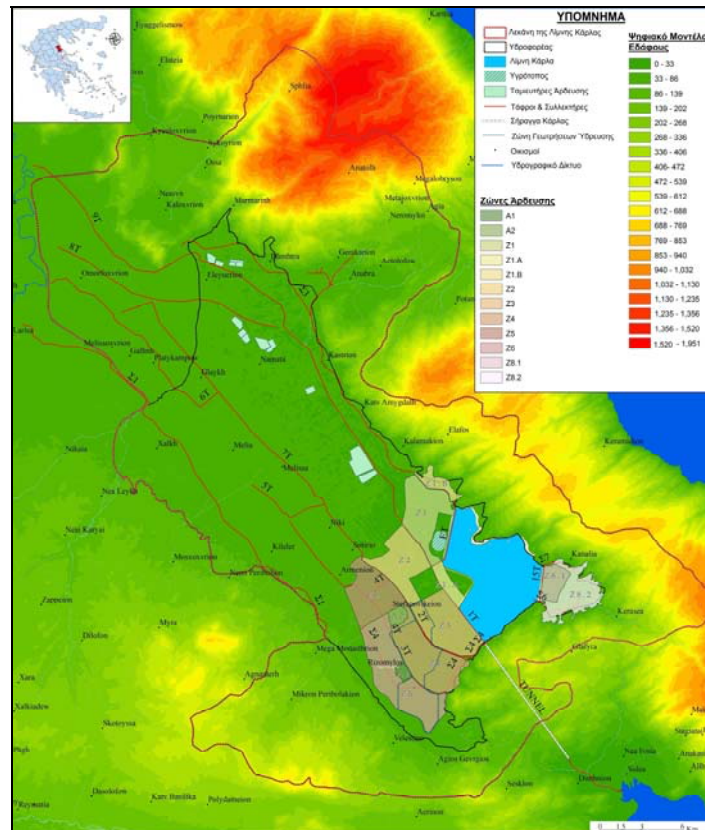
Εκμεταλλεζόμενοι τη λειτουργία του ταμιευτήρα, ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης εφαρμόζεται στον υδροφορέα, για να εκτιμηθεί η επιτρεπόμενη άντληση από αυτόν, ώστε σε ένα εύλογο χρονικό διάστημα η στάθμη του να επανέλθει στην προτεραιά κατάσταση. Το διάστημα αυτό είναι από το 2012 έως το 2044 και αντιστοιχεί στην έναρξη της λειτουργίας του ταμιευτήρα και στην τελική ολοκλήρωση όλων των φάσεων των επί μέρους έργων σύμφωνα με το χρονοδιάγραμμα του έργου. Η δε προτεραιά κατάσταση αναφέρεται στα μέσα της δεκαετίας του '80 και συγκεκριμένα στο 1987, όπου μέχρι τότε δεν παρατηρούνταν άντληση των μη ανανεώσιμων υπόγειων υδατικών πόρων της λεκάνης της Κάρλας (Σιδηρόπουλος, 2007). Εξαιτίας όμως της αβεβαιότητας που προκύπτει λόγω της έλλειψης ικανοποιητικών δεδομένων της χωρικά μεταβαλλόμενης υδραυλικής αγωγιμότητας, εκτιμήθηκε η επίδραση αυτής της αβεβαιότητας στην προσπάθεια της βελτιστοποίησης. Το πρόβλημα αυτό εφαρμόστηκε σε ίσης πιθανότητας απεικονίσεις του υδροφορέα που προέκυψαν από τη στοχαστική (Monte Carlo) προσομοίωση της υδραυλικής αγωγιμότητας, ώστε να εκτιμηθεί η επίδρασή της. Για τη δημιουργία των στοχαστικών απεικονίσεων της Υδραυλικής Αγωγιμότητας χρησιμοποιήθηκε το Γεωστατιστικό μοντέλο GSLIB. Το αριθμητικό μοντέλο MODFLOW 2000 επιλέχθηκε για την προσομοίωση της υπόγειας ροής, ενώ για το πρόβλημα της βελτιστοποίησης του υδροφορέα χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας GWM-2000 της USGS.

2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

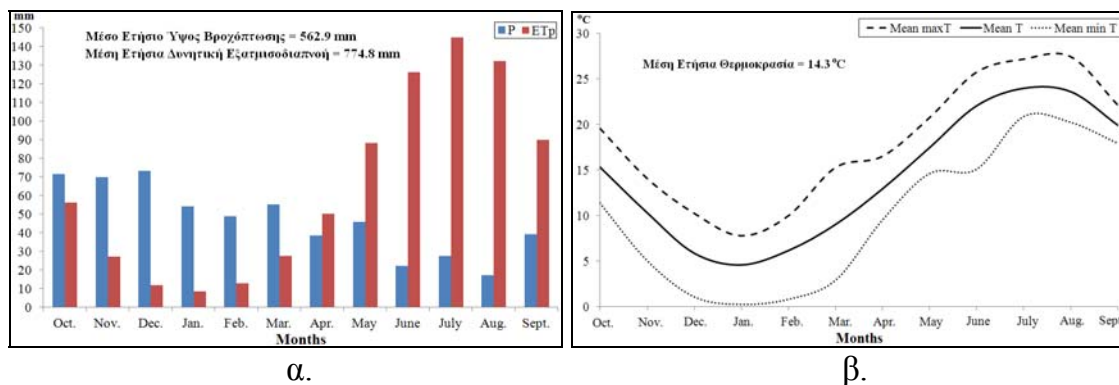
Η έκταση της υδρολογικής λεκάνης της λίμνης Κάρλας ανέρχεται στα 1663 km² με τον υπόγειο υδροφορέα της να καταλαμβάνει το πεδινό κυρίως τμήμα της σε έκταση 500 km² (Σχήμα 1).

Το κλίμα της περιοχής είναι Μεσογειακό με μέση ετήσια θερμοκρασία 16-17° C (Σχήμα 2β), μέσο ετήσιο ύψος βροχόπτωσης 500 – 600 mm και μέση ετήσια δυνητική εξατμισοδιαπνοή 700 – 800 mm (Σχήμα 2α). Το μεγαλύτερο τμήμα της περιοχής που καταλαμβάνει ο υδροφορέας είναι πεδινό με υψόμετρο 45 έως 65 m. Μόνο στα ΝΔ το υψόμετρο αγγίζει τα 90 m, λόγω της παρουσίας του Χαλκοδόνιου Όρους. Η γεωλογική δομή του υπεδάφους όλης της λεκάνης αποτελείται κατά 30.6% από αδιαπέραστα πετρώματα (φλύσχης στα όρια του όρους Μαυροβουνίου με την πεδιάδα), κατά 14.5% από καρστικά πετρώματα (στο ΝΑ τμήμα της λεκάνης στο όρος Μαυροβούνιο) και τέλος κατά 54.9% από σύγχρονες αποθέσεις ποτάμιας και λιμναίας προέλευσης ποικίλης κοκκομετρίας, οι οποίες καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο τμήμα της πεδιάδας,

εντός του οποίου βρίσκεται ο υδροφορέας. Το αδιαπέραστο υπόβαθρο αποτελείται από σχιστόλιθους και μάργες (Costandinidis, 1978).



Σχήμα 1. Η υδρολογική λεκάνης της λίμνης Κάρλας, με τον υπόγειο υδροφόρο, τον ταμιευτήρα και τα λοιπά έργα.



Σχήμα 2. Υδρομετεωρολογικά δεδομένα της λεκάνης.

3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Για την προσομοίωση των υδατικών πόρων της λεκάνης πραγματοποιήθηκε η σύνδεση, μίας σειράς μοντέλων (Sidiropoulos et. al., 2008), τα οποία είναι:

1. Μοντέλο επιφανειακής υδρολογίας UTHBAL (Λουκάς κ.ά., 2005), το οποίο χρησιμοποιεί για δεδομένα την επιφανειακή βροχόπτωση, τη μέση επιφανειακή θερμοκρασία και τη δυνητική εξατμισοδιαπονή και υπολογίζει την πραγματική εξατμισοδιαπονή, την εδαφική υγρασία, την επιφανειακή

απορροή και κατείσδυση με την τελευταία να αποτελεί τη σύνδεση του επιφανειακού μοντέλου με το υπόγειο.

2. Μοντέλο προσομοίωσης της λειτουργίας του ταμιευτήρα UTHRL (Λουκάς κ.ά., 2005), το οποίο έχοντας ως δεδομένα την επιφανειακή απορροή, τη βροχόπτωση από το UTHBAL και την εξάτμιση, την αποθηκευτική ικανότητα με τις απολήψεις του ταμιευτήρα υπολογίζει τον όγκο και τη στάθμη του νερού.
3. Μοντέλο προσομοίωσης της επικοινωνίας ταμιευτήρα-υδροφορέα LAK3 (Merrit and Konikow 2000), δεχόμενα ως δεδομένα την επιφανειακή απορροή, τη βροχόπτωση, την εξάτμιση, τις απολήψεις από τα προηγούμενα μοντέλα εκτιμά τις εισροές προς στον υπόγειο υδροφορέα.
4. Τέλος το μοντέλο προσομοίωσης της υπόγειας ροής (MODFLOW 2000), το οποίο αποτελεί και τον πυρήνα του συστήματος. Δέχεται από τα προηγούμενα μοντέλα την κατείσδυση (UTHBAL) και την εισροή από τον ταμιευτήρα (UTHRL) και υπολογίζει, μεταξύ άλλων, ισοζύγια υδατικού όγκου, το πεδίο ροής και τα υδραυλικά φορτία του υδροφορέα. Αναλυτική περιγραφή ακολουθεί παρακάτω.

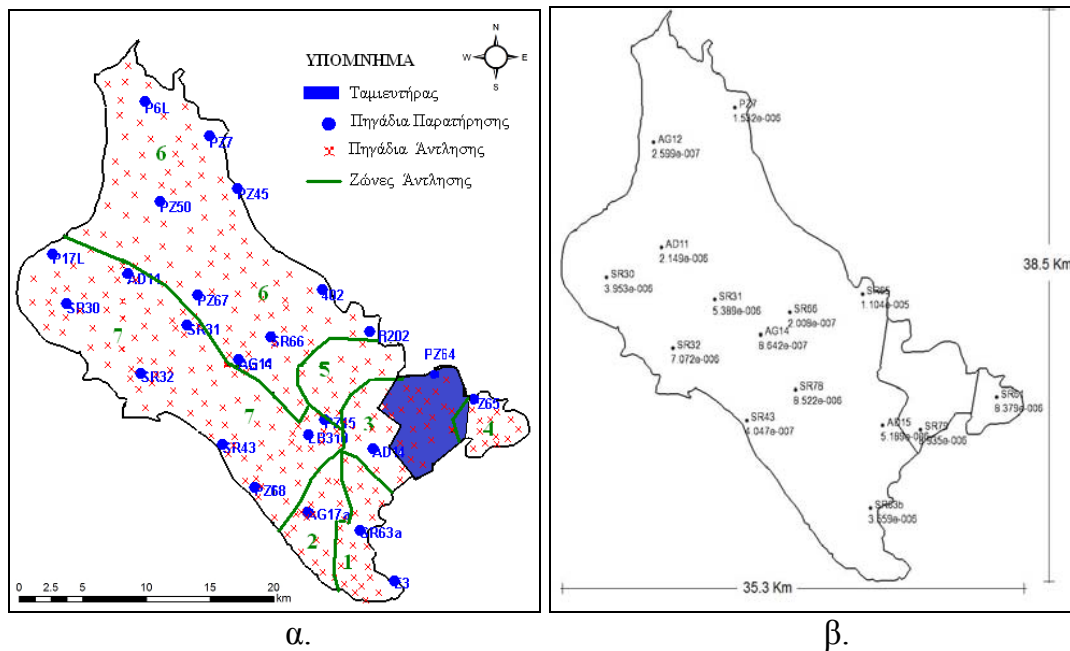
Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε για την περίοδο 1987-2044 με τα αποτελέσματα των μοντέλων να είναι σε μηνιαίο βήμα. Τα δύο μοντέλα του ταμιευτήρα ξεκινούν από το 2012, διότι τότε ξεκινά και η λειτουργία του σύμφωνα με το χρονοδιάγραμμα του έργου. Όλα τα μοντέλα ρυθμίστηκαν έναντι παρατηρούμενων δεδομένων εντός της ιστορικής περιόδου 1960-2002, με διαφορετικές περιόδους το καθένα, ανάλογα με τα διαθέσιμα παρατηρούμενα. Η επέκταση της χρονοσειράς από το 2002-2044 έγινε με επανάληψη της προηγούμενης 40ετίας 1960-2002. Η διαχειριστική περίοδος του υδροφορέα για την οποία εκτιμάται, μέσω του προβλήματος της βελτιστοποίησης, ο επιτρεπόμενος αντλούμενος όγκος νερού των ίσης πιθανότητας απεικονίσεών του είναι η 2012-2044.

4. ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ

Ο κοκκώδης υπόγειος υδροφορέας της Κάρλας προσομοιώθηκε από τον κώδικα MODFLOW 2000 (Harbaugh et. al., 2000) με ένα κάρναβο 12500 κελιών, βασικής διάστασης 200 mX200 m, με πυκνώσή του στις περιοχές των γεωτρήσεων σε ένα κατακόρυφο επίπεδο (layer), το οποίο αντιπροσωπεύει το στρώμα των σύγχρονων αποθέσεων ποτάμιας και λιμναίας προέλευσης ποικίλης κοκκομετρίας (Σχήμα 3α).

Οι οριακές συνθήκες του μοντέλου έχουν ως εξής :i) Το ανατολικό όριο είναι αδιαπέραστο λόγω παρουσίας σχιστόλιθων και ii) στο δυτικό όριο υπάρχει μικρή υδραυλική επικοινωνία με γειτονικό υδροφορέα. Για τις αρχικές συνθήκες χρησιμοποιήθηκαν 23 πηγάδια παρατήρησης, τα οποία έδωσαν τα αρχικά ύψη για την 1/1/1987. Οι εισροές του μοντέλου προέρχονται από την επιφανειακή κατείσδυση, η οποία υπολογίζεται από το μοντέλο UTHBAL, από την επικοινωνία με τον γειτονικό υδροφορέα, και από την επικοινωνία με τον Ταμιευτήρα, η οποία υπολογίζεται από το μοντέλο LAK3. Η περιοχή μελέτης χωρίστηκε σε επτά ζώνες άντλησης, εκ των οποίων οι πέντε πρώτες ανήκουν στον Νομό Μαγνησίας και ορίζονται από την Μελέτη Έργων Ενίσχυσης της Ύδρευσης της Μείζονος περιοχής του Βόλου, ενώ οι άλλες δύο ανήκουν στο Νομό Λάρισας, με την έκτη να καταλαμβάνει την περιοχή δράσης του Τ.Ο.Ε.Β. Πηνείου και την έβδομη να είναι η μοναδική ζώνη στην οποία οι ανάγκες για νερό καλύπτονται μόνο από τον υπόγειο υδροφορέα (Πίνακας 1). Οι αντλούμενες ποσότητες προέκυψαν από τις υδατικές ανάγκες των καλλιεργειών που ανήκουν σε αυτές

αφαιρώντας το διαθέσιμο επιφανειακό νερό, όπου αυτό υφίσταται και για τη μη διαχειριστική περίοδο 1987-2012, αφού για τη διαχειριστική περίοδο 2012-2044 το πρόβλημα της βελτιστοποίησης θα προτείνει τον επιτρεπόμενο όγκο.



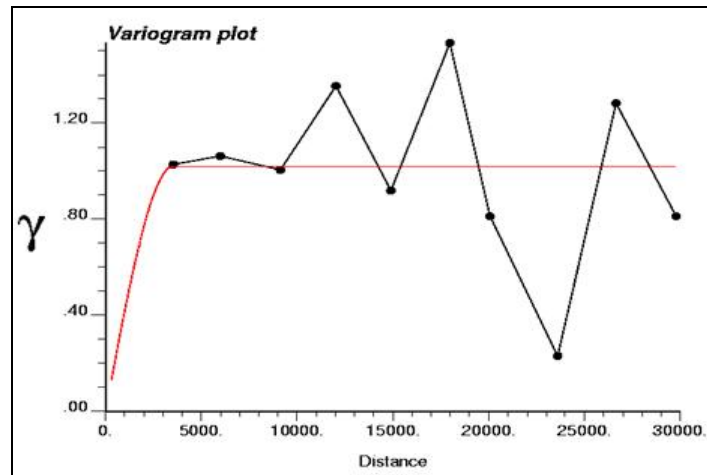
Σχήμα 3. Ο υπόγειος υδροφορέας της λίμνης Κάρλας με α. τις ζώνες άντλησης, τα πηγάδια παρατήρησης, τα πηγάδια άντλησης και β. τις δειγματοληπτικές τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας σε m/s.

Πίνακας 1. Μέση ετήσια αντλούμενη ποσότητα υπόγειου νερού για την περίοδο 1987-2012.

	Ζώνη 1	Ζώνη 2	Ζώνη 3	Ζώνη 4	Ζώνη 5	Ζώνη 6	Ζώνη 7
Μέση ετήσια άντληση υπόγειου νερού (hm³)	22.4	3.6	5.9	3.5	1.5	38.5	55.7

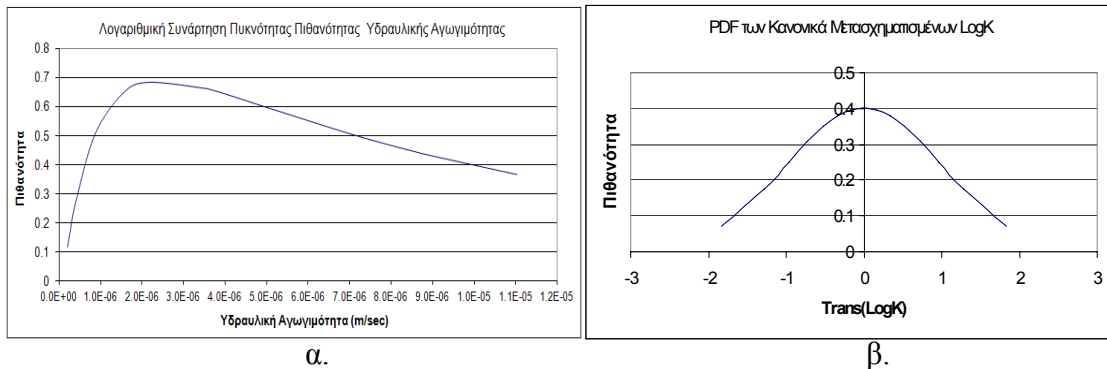
Η ρύθμιση του μοντέλου έγινε με τη χρήση των pilot points της PEST για τη χωρικά μεταβαλλόμενη υδραυλική αγωγιμότητα τη δεκαετία '87-'97 με 23 παρατηρούμενες τιμές. Μέσω της ρύθμισης, προέκυψε το βέλτιστο θεωρητικό ημιβαριόγραμμα (Σχήμα 4) που προσομοιώνει τη χωρική αλληλεξάρτηση των τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας και προσεγγίζεται με σφαιρική καμπύλη της εξίσωσης 4.1. Οι δειγματοληπτικές τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας είναι δεκαπέντε και οι θέσεις τους με τις τιμές τους παρουσιάζονται στο σχήμα 3.β με μέση τιμή $m = 4.374 \cdot 10^{-6}$ και τυπική απόκλιση $\sigma = 3,618 \cdot 10^{-6}$. Για να προκύψει όμως το ημιβαριόγραμμα, θεωρήθηκε ότι το πεδίο τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας ακολουθεί λογαριθμική κατανομή τηρώντας έτσι την παραδοχή της στασιμότητας (Delhomme, 1976).

$$\gamma(h) = \begin{cases} 1 * \left[1.5 * \frac{h}{3520} - 0.5 * \left(\frac{h}{3520} \right)^3 \right], & h \leq 3520 \text{ m} \\ 1, & h \geq 3520 \text{ m} \end{cases} \quad (4.1)$$



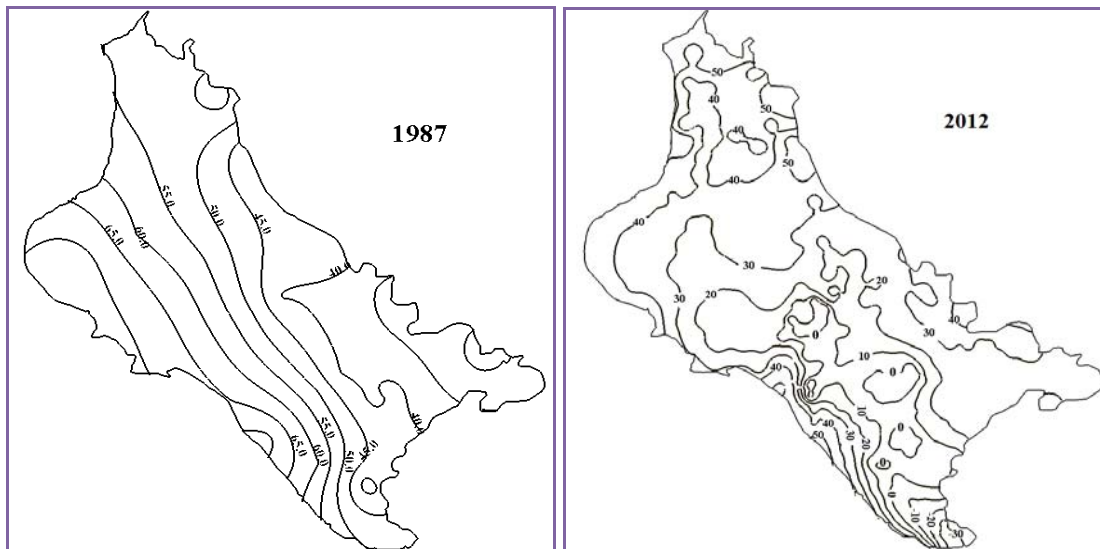
Σχήμα 4. Το πειραματικό και το θεωρητικό ημιβαριόγραμμα της υδραυλικής αγωγιμότητας.

Η χωρική παρεμβολή της υδραυλικής αγωγιμότητας και έπειτα η στοχαστική της προσομοίωση με την παραγωγή πολλαπλών ισοπίθανων χαρτών της, πραγματοποιήθηκαν μέσω της γεωστατιστικής προσέγγισης με τη χρήση της Γεωστατιστικής Βιβλιοθήκης GSLIB (Deutch and Journel, 1998). Η χωρική παρεμβολή της επιτεύχθηκε με την χρήση της Simple Kriging, χρησιμοποιώντας το θεωρητικό βαριόγραμμα της εξίσωσης 4.1. Η στοχαστική της προσομοίωση πραγματοποιήθηκε με βάση τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητάς της (Σχήμα 5.α), με τη χρήση της Σειριακής Κανονικής Προσομοίωσης (Sequential Gaussian Simulation), η οποία κανονικοποιεί το πεδίο τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας για μεγαλύτερη σταθερότητα. Έτσι το πεδίο μεταβάλλεται σε λογοκανονικό (Σχήμα 5.β) και τηρείται για κάθε παραγόμενο πεδίο τιμών της K η χωρική συσχέτιση που επιβάλλει το θεωρητικό ημιβαριόγραμμα.



Σχήμα 5. Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας για α. το λογαριθμικό πεδίο τιμών της K και β. για το λογοκανονικό πεδίο τιμών της K .

Με την παραπάνω διαδικασία παρήχθησαν 100 στοχαστικοί χάρτες ίσης πιθανότητας της χωρικά μεταβαλλόμενης υδραυλικής αγωγιμότητας, οι οποίοι εισήχθησαν στο μοντέλο της υπόγειας ροής, το οποίο με τη σειρά του έδωσε 100 ίσης πιθανότητας απεικονίσεις του υπόγειου υδροφορέα. Στα αποτελέσματα του μοντέλου υπόγειας ροής ήταν μεταξύ άλλων οι χάρτες ισοδυναμικών γραμμών του υδραυλικού ύψους και τα υδατικά ισοζύγια για κάθε απεικόνιση.



Σχήμα 6. Ισοδυναμικές γραμμές υδραυλικού φορτίου προερχόμενες από α. τα αρχικά ύψη του 1987 και β. τη μέση τιμή των 100 στοχαστικών απεικονίσεων αμέσως πριν ξεκινήσει η διαχειριστική περίοδος.

Συγκρίνοντας τις εικόνες 6α και 6β, γίνεται αμέσως αντιληπτή η σημαντική ταπείνωση του υδροφόρου ορίζοντα μέσα σε αυτήν την περίοδο υπερ-εκμετάλλευσής του. Στο νότιο τμήμα του η ταπείνωση αγγίζει μέχρι και τα 80 μέτρα, γεγονός το οποίο έχει επαληθευτεί με πρόσφατες μετρήσεις από τα πιεζόμετρα της περιοχής. Το υδατικό ισοζύγιο του πίνακα 2 μαρτυρά την ίδια κατάσταση μιας και η μέση ετήσια εκμετάλλευση του μη ανανεώσιμου υπόγειου υδατικού αποθέματος ξεπερνά τα 90 εκ. κυβικά το χρόνο.

Πίνακας 2. Υδατικό ισοζύγιο υδροφορέα για την περίοδο 1987-2012.

	Για όλη την περίοδο 1987-2012 (hm ³)	Μέσο Ετήσιο (hm ³)
Ανανεώσιμος Όγκος	932.47	37.29
Αντλούμενος Όγκος	3277.5	131.1
Μη ανανεώσιμος Όγκος	2345.03	93.82

5. ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ

Εκμεταλλεζόμενοι τη λειτουργία του ταμιευτήρα για την κάλυψη 100 χιλιάδων στρεμμάτων με 60 εκ. κυβικά επιφανειακού νερού ετησίως και την ταυτόχρονη μείωση των αρδευτικών ιδιωτικών γεωτρήσεων, ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης για τον υδροφορέα της Κάρλας τίθεται σε εφαρμογή για τη διαχειριστική περίοδο 2012-2044. Στόχος του διαχειριστικού αυτού πλάνου είναι ο υπολογισμός της επιτρεπόμενης άντλησης υπόγειου νερού ώστε μέσα σε αυτήν την περίοδο να επανέλθει ο υδροφόρος ορίζοντας σε πρότερη κατάσταση, στην οποία τα μη ανανεώσιμα αποθέματα δεν ήταν υπό εκμετάλλευση. Επιλέχθηκε η χρονιά του 1987, η οποία ήταν η τελευταία χρονιά της μη εκμετάλλευσης των μη ανανεώσιμων αποθεμάτων του. Για να εκτιμηθεί περαιτέρω η επίδραση της αβεβαιότητας της υδραυλικής αγωγιμότητας σε αυτό το διαχειριστικό πλάνο, το πρόβλημα της διαχείρισης εφαρμόστηκε στις 100 ισοπίθανες απεικονίσεις του υδροφορέα.

Η αντικειμενική συνάρτηση και οι περιορισμοί της βελτιστοποίησης δίνονται από τις εξισώσεις 5.1-5.3:

$$\text{Maximize} \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N Q_n^t \quad (5.1)$$

$$h_i^{2044} \geq h_i^{1987}, i = 1, \dots, N \quad (5.2)$$

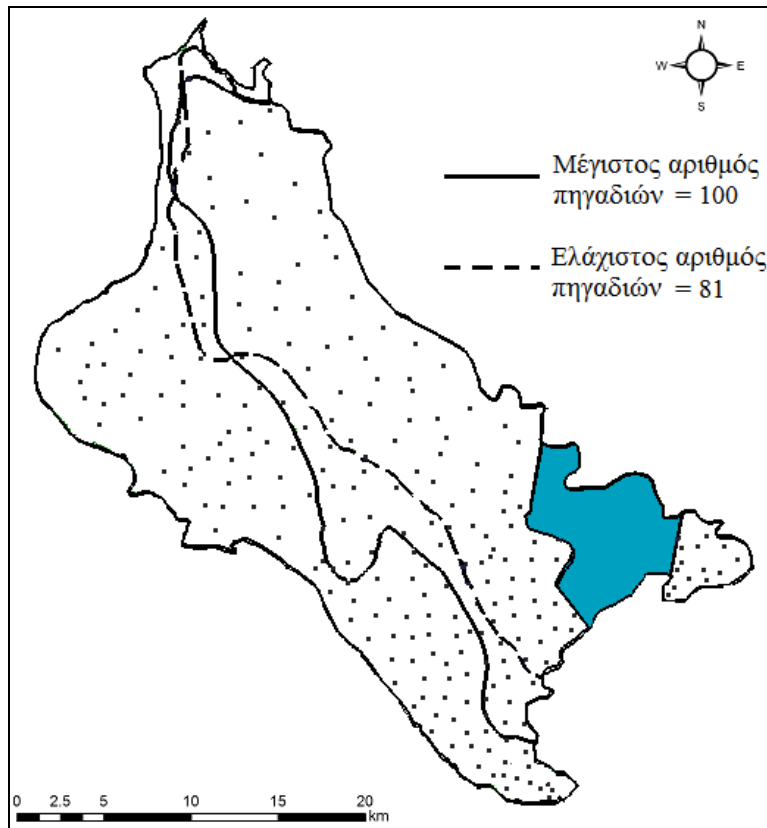
$$Q_n \geq 0 m^3 / s, n = 1, \dots, N \quad (5.3)$$

Όπου Q_n είναι η παροχή άντλησης των πηγαδιών που συμμετέχουν στη βελτιστοποίηση, T είναι ο αριθμός των χρονικών περιόδων του υπόγειου μοντέλου από το 2012-2044 και h_i το υδραυλικό ύψος στο κελί του πηγαδιού με τον εκθέτη να αναφέρεται στην χρονιά. Το παραπάνω πρόβλημα είναι μη γραμμικό. Όμως εάν αντί για περιορισμό υδραυλικού ύψους επιλεγθεί περιορισμός πτώσης στάθμης, τότε μετατρέπεται σε γραμμικό, μιας και η σχέση του περιορισμού της πτώσης στάθμης για υπό πίεση υδροφορείς είναι γραμμική με την παροχή άντλησης Q_n , όπως διατυπώνεται στην εξίσωση 5.4:

$$h_i^{2044} - h_i^{1987} = s = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{R}{r} \quad (5.4)$$

Το παραπάνω πρόβλημα επιλύθηκε με τη χρήση αρχικά του σειριακού γραμμικού προγραμματισμού (SLP) του προγράμματος GWM-2000 της USGS, ο οποίος μετατρέπει τυχόν μη γραμμικές συσχετίσεις σε γραμμικές. Στη συνέχεια με τη χρήση του μοναδιαίου μητρώου απόκρισης και της μεθόδου Simplex επιλύθηκαν, για κάθε απεικόνιση, οι παραπάνω εξισώσεις.

Για να εξετασθεί ποια από όλα τα πηγάδια άντλησης θα συμμετάσχουν στο πρόβλημα της βελτιστοποίησης, το μοντέλο της υπόγειας ροής επιλύθηκε για κάθε ένα από τους 100 στοχαστικούς χάρτες της υδραυλικής αγωγιμότητας για την περίοδο 2012-2044, χωρίς τη συμμετοχή των πηγαδιών άντλησης, και έδωσε αντίστοιχα 100 απεικονίσεις του για το 2044. Στη συνέχεια προέκυψε η διαφορά των 100 παραπάνω χαρτών των υδραυλικών υψών με τον χάρτη του 1987 της εικόνας 6α, και τα πηγάδια τα οποία βρίσκονταν στην περιοχή με θετικό υδραυλικό ύψος ήταν αυτά που συμμετείχαν στη βελτιστοποίηση. Στην εικόνα 7 φαίνονται οι μηδενικές ισοδυναμικές γραμμές που δίνουν η μία τη μεγαλύτερη περιοχή (στα ανατολικά της συνεχούς γραμμής) και η άλλη τη μικρότερη (στα ανατολικά της διακεκομμένης γραμμής). Στην πρώτη ο αριθμός των πηγαδιών που συμμετέχει στη βελτιστοποίηση είναι 100, και στη δεύτερη είναι 81.



Σχήμα 7. Μέγιστη (συνεχής γραμμή) και ελάχιστη (διακεκομμένη γραμμή) περιοχή συμμετοχής των πηγαδιών άντλησης στη βελτιστοποίηση.

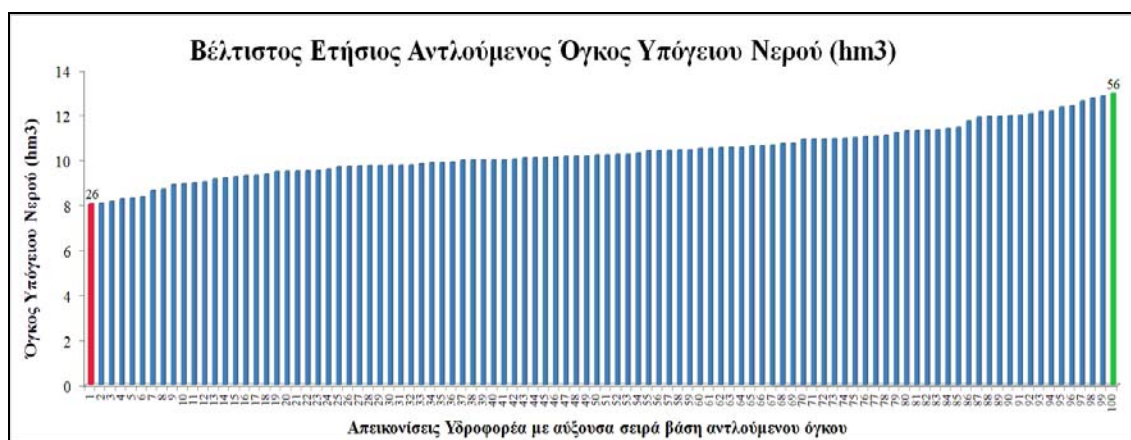
6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Σύμφωνα με την παραπάνω μεθοδολογία καταρτίστηκαν τα 100 στοχαστικά προβλήματα βελτιστοποίησης των εξισώσεων 5.1-5.4 και επιλύθηκαν με τη χρήση του προγράμματος Groundwater Management 2000 δίνοντας έτσι για κάθε απεικόνιση του υδροφορέα και τη βέλτιστη του λύση για τη διαχειριστική περίοδο 2012-2044. Τα αποτελέσματα του διαχειριστικού εργαλείου είναι ο βέλτιστος αριθμός, η θέση και ο βέλτιστος αντλούμενος όγκος υπόγειου νερού των προτεινόμενων πηγαδιών για κάθε απεικόνιση.

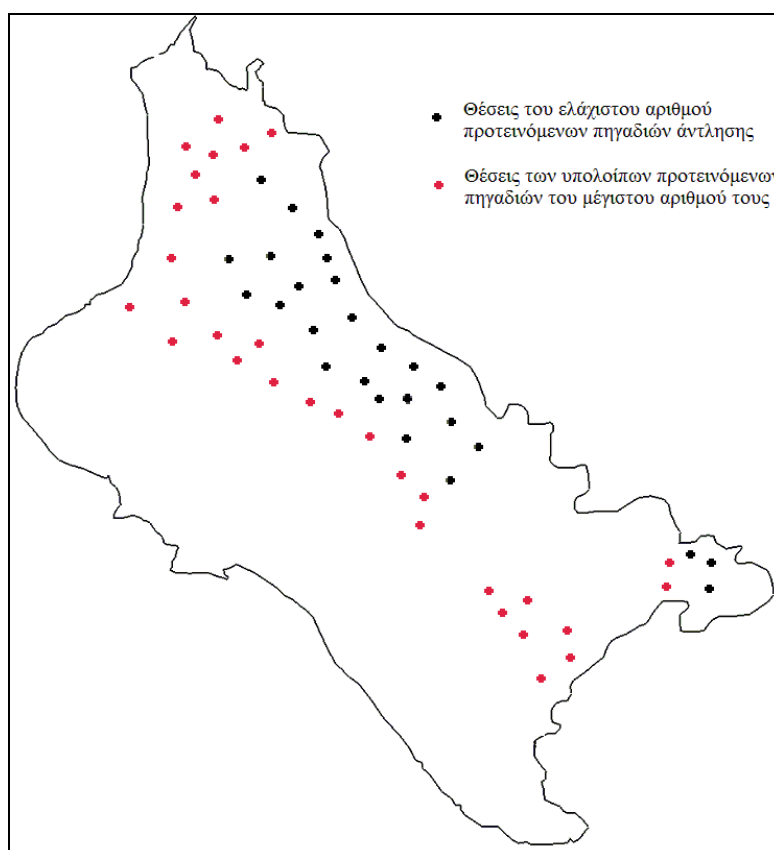
Στο διάγραμμα της εικόνας 8 παρουσιάζεται ο βέλτιστος επιτρεπόμενος ετήσιος όγκος άντλησης που προέκυψε από το πρόβλημα της στοχαστικής βελτιστοποίησης για κάθε απεικόνιση του υδροφορέα τη διαχειριστική περίοδο 2012-2044. Με την κόκκινη μπάρα είναι ο ελάχιστος όγκος που προέκυψε σε μία από τις 100 απεικονίσεις, ενώ με την πράσινη ο μέγιστος. Η απεικόνιση του ελάχιστου επιτρεπόμενου όγκου αντιστοιχεί στην περίπτωση της διακεκομμένης γραμμής της εικόνας 7, ενώ η απεικόνιση του μέγιστου αντιστοιχεί στη συνεχή γραμμή. Πάνω ακριβώς από τις δύο ακραίες μπάρες σημειώνεται ο αριθμός των προτεινόμενων πηγαδιών, από τα οποία θα πραγματοποιείται η βέλτιστη άντληση.

Γίνεται αμέσως αντιληπτό πως υπάρχει ένα σημαντικό εύρος βέλτιστου ετήσιου αντλούμενου όγκου νερού το οποίο είναι ίσο με 4.918 hm^3 , όταν ο μέσος όρος είναι 10.356 hm^3 . Η ίδια εικόνα ισχύει και για τα προτεινόμενα πηγάδια άντλησης μιας και ο αριθμός τους ποικίλει από 26 μέχρι 56, οι θέσεις των οποίων φαίνονται στο σχήμα 9. Η αποτίμηση λοιπόν της επίδρασης της αβεβαιότητας της υδραυλικής αγωγιμότητας γίνεται μέσω του εύρους του βέλτιστου ετήσιου αντλούμενου όγκου νερού το οποίο

είναι ίσο με 4.918 hm^3 και του εύρους του αριθμού των προτεινόμενων πηγαδιών που είναι 30. Τέλος ο προτεινόμενος αριθμός και όγκος νερού για κάθε ζώνη δίνεται στον πίνακα 3.



Σχήμα 8. Διάγραμμα βέλτιστου ετήσιου αντλούμενου όγκου υπόγειου νερού για κάθε απεικόνιση του υδροφορέα.



Σχήμα 9. Θέσεις των προτεινόμενων πηγαδιών άντλησης.

Πίνακας 3. Βέλτιστος ετήσιος αντλούμενος όγκος υπόγειου νερού και αριθμός πηγαδιών για κάθε ζώνη.

	Ζώνη 1	Ζώνη 2	Ζώνη 3	Ζώνη 4	Ζώνη 5	Ζώνη 6	Ζώνη 7
Αριθμός πηγαδιών	0	0	0-7	2-5	4-11	20-33	0
Βέλτιστη ετήσια άντληση υπόγειου νερού (hm³)	0	0	0-1.61	0.62-1.16	1.06-2.91	6.37-7.29	0

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τα παραπάνω αποτελέσματα φαίνεται πως η επίδραση της αβεβαιότητας της υδραυλικής αγωγιμότητας επηρεάζει σημαντικά τη βελτιστοποίηση του υδροφορέα, αφού για κάθε απεικόνιση ποικίλουν τόσο ο βέλτιστος αντλούμενος όγκος όσο και ο αριθμός των προτεινόμενων πηγαδιών άντλησης. Ο διαχειριστής του συστήματος δεν έχει σαφή εικόνα της βέλτιστης άντλησης και των αριθμών των πηγαδιών, γεγονός που μπορεί να τον οδηγήσει σε λανθασμένες εκτιμήσεις.

Η επίδραση αυτή γίνεται ακόμη πιο έντονη όταν η βέλτιστη λύση αποτιμάται σε οικονομικούς όρους πώλησης του υπόγειου νερού προς άρδευση, κάτι το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικό οικονομικό ρίσκο τον διαχειριστή.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Delhomme, J., 1976. *Applications de la theorie des variables regionalisees dans les sciences de l'eau*. Ph.D. Dissertation, University Pierre et Marie Curie, Paris, 232 pp.
- Deutsch, C. and Journel, A., 1998. *Geostatistical Software Library and User's Guide 2nd Edition*. Oxford University Press, 188 pp.
- Costandinidis, D., (1978) *Hydrodynamique d'un systeme aquifere heterogene*, Hydrogeologie de la Thessalie Orientale. Ph.D. Dissertation, Grenoble (in French), 248 pp.
- Harbaugh, A. W., Banta, E. R., Hill, M. G., 2000. *MODFLOW-2000 the U.S. Geological Survey Modular Groundwater Model: User guide to modularization concepts and the ground-water flow process*. U.S. Geological Survey, Open – File Report, 00-92, USA.
- Michael, L. Merritt and L. F. Konikow, 2000. *Documentation of a Computer Program to Simulate Lake-Aquifer Interaction Using the MODFLOW Ground-Water Flow Model and the MOC3D Solute-Transport Model*, U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations Report 00-4167, USA.
- Sidiropoulos, P., Folia, S., Mylopoulos, N. and Loukas, A., 2008. *A coupled surface hydrology-lake-groundwater modeling framework for the lake Karla basin*, Protection and Restoration of the Environment X, Greece, Kefalonia.
- Γκούμας, Κ., 2005. *Οι αρδεύσεις στη Θεσσαλική πεδιάδα : Επιπτώσεις στα υπόγεια και επιφανειακά νερά*. Υδατικοί Πόροι και Γεωργία pp. 39-53
- Λουκάς, Α., Μυλόπουλος, Ν., Μυλόπουλος, Γ. και Μουστάκα, Ε., 2005. *Προσομοίωση και Αποτίμηση της Λειτουργίας του Ταμιευτήρα της Κάρλας*. 5^ο Εθνικό Συνέδριο της ΕΕΔΥΠ “Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Πόρων με Βάση τη Λεκάνη Απορροής”, Ξάνθη, 6-9 Απριλίου 2005, pp. 267-274.
- ΥΠΕΧΩΔΕ, 2004. *Μελέτη Έργων Ενίσχυσης της Ύδρευσης της Μείζονος περιοχής του Βόλου*, Αθήνα, 72 σελ.

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΘΕΩΡΙΑΣ ΠΑΙΓΝΙΩΝ ΣΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΜΜΟΧΑΛΙΚΟΛΗΨΙΩΝ ΕΠΙ ΤΟΥ ΑΛΦΕΙΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ

Μαριάνθη Β. Ποδηματά, Παναγιώτης Χ. Γιαννόπουλος

Εργαστήριο Τεχνολογίας του Περιβάλλοντος, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών,
Πολυτεχνική Σχολή Πανεπιστημίου Πατρών, 265 04 Πάτρα

Η.τ.: mpodim@upatras.gr; yannopp@upatras.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας γίνεται προσπάθεια διερεύνησης της ταυτόχρονης παρουσίας και συνεργιστικής δράσης των κυριότερων χρηστών που σχετίζονται με την εκμετάλλευση των αμμοχαλικών στην περιοχή Λεκάνης Αλφειού Ποταμού. Λαμβάνοντας υπόψη τεχνικές της θεωρίας παιγνίων, βασική επιδίωξη είναι η εξέταση του σημείου ισορροπίας του συστήματος από την δραστηριότητα των εμπλεκόμενων μερών και η διασφάλιση της ολοκληρωμένης διαχείρισης του πόρου μέσα από μια διαδικασία προσαρμογής της ζήτησης και προσφοράς, η οποία λαμβάνει χώρα εντός πεδίου συνεχών συνεργασιών-συμμαχιών και συγκρούσεων-αντιπαραθέσεων μεταξύ των χρηστών. Η μεθοδολογία που χρησιμοποιείται αποτελεί εφαρμογή σύγχρονων μεθόδων κυβερνητικής, και αποσκοπεί στη λήψη αποφάσεων με περιβαλλοντικά, οικονομικά και κοινωνικά κριτήρια.

IMPLEMENTING GAME THEORY ON SAND GRAVEL SOURCES MANAGEMENT IN ALFEIOS RIVER BASIN (GREECE)

Marianthi V. Podimata, Panayotis C. Yannopoulos

Environmental Engineering Laboratory, Department of Civil Engineering,
School of Engineering, University of Patras, 265 04, Patras, Greece

E-mail: mpodim@upatras.gr; yannopp@upatras.gr

ABSTRACT

The present paper explores the simultaneous presence and synergistic action of major users related to gravel-sand exploitation in Alfeios River Basin. By implementing techniques of game theory, basic aim of the paper is a) to approach the equilibrium point of the system, as the outcome of interaction of involved users and b) to ensure the integrated management of gravel-sand resources, through a process of supply and demand adjustment policy which occurs under partnership and conflict situations among stakeholders. The method is actually a policy course of action and focuses its attention on a process for problem solving and decision making with cost-effective methodologies regarding environment, economy and society.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το γεωμορφολογικό ανάγλυφο της Ελλάδας παρουσιάζει πληθώρα ορεινών όγκων και χαραδρών, γεγονός που συμβάλλει στο πλούσιο υδρολογικό δίκτυο ποταμών και ρεμάτων, ανά την επικράτεια, τα οποία μεταφέρουν αμμοχαλκώδεις αποθέσεις (συλλεκτά αδρανή), λόγω φαινομένων αποσάθρωσης και διάβρωσης των πετρωμάτων. Οι ποτάμιες αποθέσεις αδρανών αποτελούν σημαντικό εμπορικό προϊόν, με πληθώρα εφαρμογών στον τομέα των κατασκευών και γενικότερα τεχνικών έργων και έργων υποδομής (παρασκευή σκυροδέματος-επιχρισμάτων, υλικό για οδοποιία και σιδηροδρόμους, πρώτη ύλη σε βιομηχανία), καθώς υπερτερούν των αδρανών που παράγονται σε λατομεία ως προς το κόστος εργασίας, ενέργειας και εξοπλισμού καθώς και το κόστος συμμόρφωσης με περιβαλλοντικούς όρους και όρους ασφαλείας. Το ποτάμιο αμμοχάλικο είναι εύκολα προσβάσιμο στα μηχανήματα συλλογής, διακρίνεται από ομοιομορφία ως προς την κοκκομετρία του, είναι συνήθως καλά ταξινομημένο, και ως επί το πλείστον δεν περιέχει λοιπά υλικά, όπως ιλύ και άργιλο.

Το αμμοχάλικο είναι περιορισμένος πόρος και η λήψη του είναι επιθυμητή από πολλούς ενδιαφερόμενους που έχουν συγκεκριμένες επιλογές, προτιμήσεις και προτεραιότητες για τη χρήση και αξιοποίησή του. Όμως, υπάρχουν αντικρουόμενα συμφέροντα ως προς τον τρόπο και την έκταση διαχείρισης του πόρου αυτού, καθώς κάθε ενδιαφερόμενος χρήστης προσπαθεί να μεγιστοποιήσει το όφελός του, εντός ενός ιδιαίτερα ανταγωνιστικού περιβάλλοντος. Η πολιτεία οφείλει να μεσολαβεί για την εύρυθμη λειτουργία της αγοράς του αμμοχαλίκου και τη διασφάλιση προϋποθέσεων για βέλτιστη αξιοποίηση του πόρου με περιβαλλοντικά και κοινωνικά κριτήρια.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η περιγραφή μιας μεθοδολογίας που στηρίζεται στη Θεωρία Παιγνίων (Game Theory), όπου κάθε συμμετέχων στη διαδικασία απόφασης για απόληψη αμμοχαλίκου (χρήστης ή μεσολαβητής) απολαμβάνει κέρδη (χρησιμότητα, οφέλη) που προφανώς εξαρτώνται από τις επιλογές που άρθησαν ταυτόχρονα από άλλους εμπλεκόμενους παίκτες. Η μελέτη των επιλογών για όλες τις αντιτιθέμενες πλευρές συμβάλλει στη διαμόρφωση κανόνων (Reverse Game Theory), ώστε όλοι οι χρήστες να οδηγούνται σε συνετή διαχείριση του πόρου.

2. ΑΠΟΛΗΨΗ ΑΜΜΟΧΑΛΙΚΟΥ: ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ - ΑΡΜΟΔΙΟΙ ΦΟΡΕΙΣ

Η υδρομορφολογία ενός ποτάμιου συστήματος καθορίζεται κυρίως από τη δυναμική ισορροπία τεσσάρων παραγόντων: α) ποσότητα-ταχύτητα ρέοντος νερού, β) ποσότητα-κατανομή φερτών, γ) διαμόρφωση του πυθμένα-όχθης, και δ) παρόχθια βλάστηση. Η διατάραξη αυτής της ισορροπίας με τη λήψη αλλουβιακού υλικού από την κοίτη ποταμού έχει άμεσες επιπτώσεις στα φυσικά όρια και γεωμετρικά χαρακτηριστικά του υδατορρέματος, στην ταχύτητα ροής των υδάτων, στην ικανότητα στερεομεταφοράς, στα ποιοτικά χαρακτηριστικά (για μικρή χρονική περίοδο) του νερού και στην ισορροπία της υδρόβιας και παρόχθια βιοκοινότητας (βλ. Πίνακα 1) (Brown et al., 1998). Για το λόγο αυτό, η απόληψη αμμοχαλίκου χρήζει ιδιαίτερης προσοχής και ορθολογικής διαχείρισης. Σε πολλές χώρες, όπως Ηνωμένο Βασίλειο, Γερμανία, Γαλλία, Ολλανδία, Ελβετία, έχει απαγορευθεί πλήρως η απευθείας απόληψη ποτάμιου αμμοχαλίκου. Σε κάποιες άλλες, όπως Ιταλία, Πορτογαλία, ΗΠΑ, Καναδά, Ελλάδα, επιτρέπεται υπό περιορισμούς (Kondolf, 1997). , σε πολλές περιπτώσεις, η απόληψη αμμοχαλίκου συμβάλλει θετικά στην ισορροπία του συστήματος, καθώς αφενός αποτρέπεται η συσσώρευση των αδρανών σε περιοχές κρίσιμες για πλημμυρικά φαινόμενα (απειλή για καλλιέργειες, υποδομές, οικισμούς) και αφετέρου διασφαλίζεται η ταμιευτική υδατοϊκανότητα του ποταμού (έλεγχος πλημμυρικών παροχών, μείωση φαινομένων διάβρωσης πυθμένα) (Γιαννόπουλος και Μαναριώτης, 2005).

Πίνακας 1: Επιπτώσεις απευθείας ποτάμιας αμμοχαλικοληψίας (Πηγή: Kondolf, 1997)

Αλλαγή γεωμετρίας διατομής ποταμού	Εκτράχυνση πυθμένα
Μείωση ύψους πυθμένα	Πλευρικές αστάθειες
Εκτροπή της ροής και μεταβολή ταχυτήτων	Δημιουργία ευρύτερης και ρηχής κοίτης
Αποθήκευση ιζήματος	Αύξηση θερμοκρασίας νερού
Δημιουργία τάφρων	Αλλαγές και διαταραχές παρόχθιας βλάστησης
Δημιουργία ορύγματος επί της διατομής	Υποβάθμιση ενδαιτημάτων ιχθύων

Οι αμμοχαλικοληψίες από κοίτες χειμάρρων και ποταμών υπάγονται κατά κύριο λόγο στην αρμοδιότητα της Κτηματικής Υπηρεσίας του Δημοσίου του Υπουργείου Οικονομικών, καθότι οι περιοχές αυτές ανήκουν στο Ελληνικό Δημόσιο, σύμφωνα με τα άρθρα 967-968 του Αστικού Κώδικα. Η παραχώρηση δικαιώματος απόληψης αμμοχαλικού (με τέλη) νομιμοποιείται κατόπιν σχετικής έγκρισης των Αρμόδιων Αρχών. Σύμφωνα με τις διατάξεις (άρθρο 100) του Π.Δ. 284/1988 έχει θεσμοθετηθεί Επιτροπή Καθορισμού Θέσεων Αμμοληψίας, η οποία συγκροτείται από υπαλλήλους της αρμόδιας Κτηματικής Υπηρεσίας και υπάλληλο της αντίστοιχης Δ/σης Υγείας και Πρόνοιας. Επίσης, σύμφωνα με τις διατάξεις (άρθρο 49) του Ν. 1416/1984 και του Ν. 2307/1995 (άρθρο 7) οι δήμοι και κοινότητες έχουν το δικαίωμα εκμετάλλευσης χώρων αμμοληψίας και αμμοχαλικών που βρίσκονται στα όρια της διοικητικής τους περιφέρειας. Παρόλα αυτά, ο δημόσιος τομέας τηρεί σειρά προτεραιότητας ως προς την αξιοποίηση του πόρου σε σχέση με την τοπική αυτοδιοίκηση και τον ιδιωτικό τομέα.

Προκειμένου να γίνει απόληψη ποτάμιου αμμοχαλικού, είναι απαραίτητο να προηγηθεί έκδοση Απόφασης της Επιτροπής Καθορισμού Θέσεων Αμμοληψίας περί καταλληλότητας του χώρου για αμμοληψία, και στην συνέχεια σε περιπτώσεις κοινοχρήστων εκτάσεων να εκδοθεί απόφαση Παραχώρησης του Δικαιώματος Εκμετάλλευσης σε ΟΤΑ από τον αιρετό Περιφερειάρχη ή απευθείας σε φορείς Δημοσίου από Υπουργό Οικονομίας & Οικονομικών ή Γενικό Γραμματέα Περιφέρειας (Χαπιζάνης, 2007). Για έκδοση της απόφασης παραχώρησης δικαιώματος αμμοληψίας προαπαιτείται Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων και Απόφαση Έγκρισης Περιβαλλοντικών όρων από τις εκάστοτε αρμόδιες Δ/σεις Περιβάλλοντος (Περιφέρειας, ή Αποκεντρωμένης Διοίκησης ή Υπουργείου)

Η υποβολή έκθεσης μεθοδολογίας απόληψης των υλικών είναι απαραίτητη για τη χορήγηση της σχετικής άδειας, καθώς πέρα από την περιγραφή της απολήψιμης ποσότητας, του βάθους και των θέσεων απόληψης πρέπει να αναλυθούν οι επιπτώσεις της αμμοχαλικοληψίας στη ροή των υδάτων, τα προβλεπόμενα μέτρα ελαχιστοποίησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, καθώς και αποκατάστασης της περιοχής μετά την ολοκλήρωση της απόληψης. Τα αιτήματα εξετάζονται κατά περίπτωση, λαμβανομένων υπόψη των ιδιαίτερων συνθηκών της κάθε περίπτωσης, την τυχόν επιβάρυνση που θα υποστεί το περιβάλλον από την διενεργούμενη αμμοληψία και λοιπούς παράγοντες, που ανάγονται στη διακριτική ευχέρεια της Διοίκησης, η οποία καλείται κάθε φορά να εφαρμόσει τις σχετικές διατάξεις.

3. ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΜΜΟΧΑΛΙΚΟΥ ΜΕ ΠΑΙΓΝΙΑ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΘΕΜΑΤΑ ΤΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ ΠΑΙΓΝΙΩΝ

Η θεωρία παιγνίων αποτελεί μια μέθοδο ανάλυσης προβλημάτων και λήψης αποφάσεων σε καταστάσεις στρατηγικής αλληλεπίδρασης. Δηλαδή, η έκβαση του προβλήματος (παίγνιο) καθορίζεται από τη θέση (στρατηγική) που έχουν αναπτύξει οι συμμετέχοντες στο παίγνιο (παίκτες). Ως επιστημονικός κλάδος, η θεωρία παιγνίων ξεκίνησε το 1944 με τις μελέτες των John von Neumann και Oskar Morgenstern,

βρίσκοντας εφαρμογή σε ζητήματα της οικονομικής επιστήμης. Όμως, στην πορεία μετεξελίχθηκε και χρησιμοποιείται ευρέως σε πληθώρα άλλων επιστημών, όπως πολιτικές επιστήμες, επιστήμες ηλεκτρονικών υπολογιστών, εξελικτική βιολογία, ψυχολογία, κοινωνιολογία κλπ. Η θεωρία παιγνίων βασίζεται στην ορθολογικότητα, δηλαδή οι παίκτες λειτουργούν ορθολογικά και πιστεύουν ότι και οι ανταγωνιστές τους προβαίνουν σε ορθολογικές αποφάσεις (http://en.wikipedia.org/wiki/Game_theory).

Η θεωρία παιγνίων αποτελεί στην ουσία τη μαθηματική μέθοδο για την περιγραφή του ανταγωνισμού και της συνεργασίας μεταξύ παικτών και μπορεί να προβλέψει τη συμπεριφορά των παικτών σε συνθήκες ανταγωνισμού. Το πλεονέκτημα της θεωρίας παιγνίων στην ανάλυση τέτοιων ζητημάτων είναι ότι προσομοιώνει την εγωκεντρική στάση των εμπλεκόμενων παικτών με αρκετά ρεαλιστικό τρόπο, επιτρέποντας με αυτόν τον τρόπο την καλύτερη εκτίμηση κάποιων καταστάσεων σε σύγκριση με άλλες συμβατικές μεθόδους, όπως π.χ. γραμμικός προγραμματισμός. Εφαρμογές τεχνικών της θεωρίας παιγνίων σε ζητήματα συναφή με τη διαχείριση υδατικών πόρων έχουν περιγραφεί στη βιβλιογραφία από τα μέσα της δεκαετίας του 1990, ιδίως στο πλαίσιο του επιστημονικού ενδιαφέροντος για τη πρόβλεψη και εξομάλυνση συγκρούσεων σε διασυνοριακές υδρολογικές λεκάνες (Madani, 2010).

Κάθε παίγνιο αποτελείται από: α) Ένα σύνολο παικτών $N = \{1,2,\dots,n\}$, β) ένα σύνολο στρατηγικών – κινήσεων για κάθε παίκτη ξεχωριστά, π.χ. του παίκτη i θα είναι $S_i = \{S_1, S_2, \dots, S_k\}$, $i \in \{1,2,\dots,n\}$ και, γ) τις αποδόσεις κάθε παίκτη για κάθε σύνολο στρατηγικών $u_i = \{u_1, u_2, \dots, u_k\}$. Δηλαδή ένα παίγνιο μπορεί να οριστεί ως εξής:

$$G \triangleq \langle N, (S_i), u_i \rangle \quad (3.1)$$

3.2. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΠΡΟΤΙΜΗΣΕΩΝ - ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Λαμβάνεται ως παίγνιο η περίπτωση όπου διατίθεται ένας φυσικός πόρος (ποτάμιο αμμοχάλικο) προς εκμετάλλευση. Οι ενδιαφερόμενοι εργολήπτες για παραχώρηση δικαιώματος αμμοχαλικοληψίας θεωρούνται παίκτες. Η συμπεριφορά τους χαρακτηρίζεται ως ανταγωνιστική. Η απόληψη του αμμοχαλικού έχει ως σκοπό την εξυπηρέτηση διαφόρων επιχειρηματικών μονάδων για την κατασκευή δημόσιων ή ιδιωτικών έργων. Ο κάθε παίκτης επιθυμεί να χρησιμοποιήσει όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ποσότητα πόρου, καθότι έτσι αυξάνεται έμμεσα το κέρδος του. Αν όλοι οι παίκτες ενεργήσουν αντίστοιχα, τότε τα διαθέσιμα αποθέματα του πόρου δεν θα επαρκέσουν για όλους, με αποτέλεσμα όλοι οι ενδιαφερόμενοι να υποστούν μείωση στα εισοδήματά τους. Αν κάποιος παίκτης περιορίσει την ποσότητα που θα εμπορευτεί, ακολουθώντας μια «συνετή τακτική», κινδυνεύει να γίνει αντικείμενο εκμετάλλευσης από άλλους παίκτες, οι οποίοι δεν πρόκειται να φερθούν ανάλογα και θα προβούν σε υπερ-απολήψεις (πιθανόν, με υπέρβαση των ανανεώσιμων αποθεμάτων) με σκοπό τη μεγαλύτερη δυνατή αύξηση του εισοδήματός τους. Είναι προφανές ότι το «κέρδος» κάθε παίκτη, που θα αποκομίσει με τη στρατηγική που θα εφαρμόσει, καθορίζεται από τις κινήσεις των άλλων παικτών.

Επίσης, η πολιτεία ενδιαφέρεται να γίνεται ανά τακτές περιόδους απόληψη αδρανών, καθότι έχει να λάβει έσοδα από το τίμημα τη απόληψης αμμοχαλικού, τα οποία μπορεί να χρησιμοποιήσει για την ικανοποίηση διαφόρων αναγκών της. Επιπρόσθετα, αν δεν υπάρξει ενδιαφερόμενος για απόληψη του υλικού, η πολιτεία εν ευθέτω χρόνο θα αναγκαστεί να προβεί σε έξοδα απομάκρυνσης ποσότητας αμμοχαλικού, καθότι σε διαφορετική περίπτωση ενδέχεται να προκληθούν πλημμυρικά επεισόδια, με μεγαλύτερο κόστος. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η περίπτωση του ποταμού Αλφειού. Στη θέση Φλόκα εδράζεται το ομώνυμο φράγμα, το οποίο

κατασκευάστηκε για την εκτροπή υδάτων προς άρδευση. Η λειτουργία του φράγματος συνεπάγεται προβλήματα κατακράτησης και συσσώρευσης φερτών υλικών με αποτέλεσμα την ελλειμματική κατάντη στερεομεταφορά. Η αμμοχαλικοληψία ανάντη του φράγματος μειώνει τη συσσώρευση φερτών υλικών και έμμεσα εξυπηρετεί στην επιμήκυνση του χρόνου καλής λειτουργίας του τεχνικού έργου.

Επιδίωξη είναι η αναζήτηση της βέλτιστης πολιτικής. Το γεγονός ότι η ανανεώσιμη ποσότητα αμμοχαλικού δεν μπορεί να καθοριστεί επακριβώς για το κάθε έτος και επηρεάζεται από το υδατικό ισοζύγιο της περιοχής και τις κλιματικές συνθήκες καθώς και ότι οι απαιτήσεις των ενδιαφερομένων δεν μπορούν να καθοριστούν εκ των προτέρων, αλλά εξαρτώνται σε σημαντικό βαθμό από τις ανάγκες της αγοράς που μεταβάλλονται σημαντικά με τον χρόνο, καθιστά το πρόβλημα της διαχείρισης του πόρου εξαιρετικά σύνθετο και πολύ-παραμετρικό.

Έστω ότι έχουμε δύο ενδιαφερόμενους εργολήπτες, που επιθυμούν να εκμεταλλευθούν το αμμοχάλικο εντός κοίτης ποταμού. Εάν και οι δύο εργολήπτες συνεργαστούν και μοιραστούν ισότιμα το διαθέσιμο αμμοχάλικο, τότε θα έχουν το ίδιο όφελος ω . Εάν και οι δύο εργολήπτες οδηγηθούν σε υπερ-εκμετάλλευση του πόρου, τότε μεσοπρόθεσμα θα επιβαρυνθούν με ζημία ζ , καθώς θα προκύψει έλλειψη υλικών. Εάν ο ένας εργολήπτης υπερ-εκμεταλλετεί τον πόρο, ενώ ο άλλος αποκομίζει μικρή έως καθόλου ποσότητα του υλικού, τότε για τον μεν πρώτο εργολήπτη θα υπάρξει μεγάλο όφελος Ω , ενώ για τον δεύτερο εργολήπτη θα υπάρξει μεγάλη ζημία Z . Σύμφωνα με τη θεωρία παιγνίων οι δύο ενδιαφερόμενοι (λόγω έλλειψης εμπιστοσύνης) δεν θα συνεργαστούν και τελικά θα υπερ-εκμεταλλευτούν τον πόρο, παρόλο που το συμφέρον και των δύο θα ήταν η ισότιμη διαχείριση του αμμοχαλικού. Η έλλειψη συνεργασίας των δύο παικτών οδηγεί στην 3^η επιλογή προτίμησης κάθε παίκτη, ενώ αν τελικά οι παίκτες συνεργάζονταν θα επέτγγχαναν την 2^η σε σειρά προτίμησης επιλογή. Η περίπτωση αυτή αποτελεί αντίστοιχο ανάλογο του παιγνίου «Το δίλημμα του φυλακισμένου» (Prisoner's Dilemma) και αποτυπώνεται στους Πίνακες 2 και 3.

Πίνακας 2: Το παίγνιο δύο εργοληπτών για την εκμετάλλευση του αμμοχαλικού

		Εργολήπτης B	
		Soft-exploitation (se)	Over-exploitation(oe)
Εργολήπτης A	Soft-exploitation (se)	ω, ω	Z, Ω
	Over-exploitation (oe)	Ω, Z	ζ, ζ

Πίνακας 3: Προτιμήσεις (ζεύγος στρατηγικών) των δύο εργοληπτών

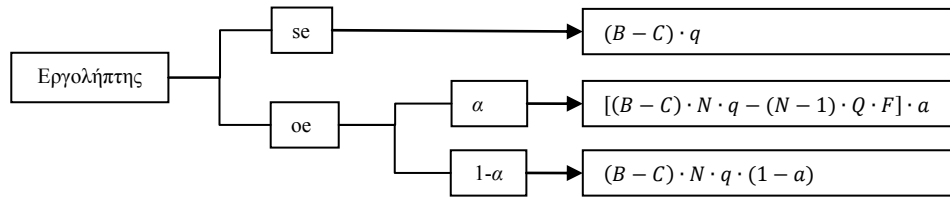
	Σε έκφραση αποδόσεων	Σε έκφραση στρατηγικών
Εργολήπτης A	$(\Omega, Z) > (\omega, \omega) > (\zeta, \zeta) > (Z, \Omega)$	$(oe, se) > (se, se) > (oe, oe) > (se, oe)$
Εργολήπτης B	$(Z, \Omega) > (\omega, \omega) > (\zeta, \zeta) > (\Omega, Z)$	$(se, oe) > (se, se) > (oe, oe) > (oe, se)$

Θα πρέπει να υπάρχει κάποιος θεσμικός παράγοντας (πολιτεία) που θα παρεμβαίνει στη διαχείριση του αμμοχαλικού και θα επιβάλλει κυρώσεις ή ποινές στους παίκτες που παρουσιάζουν «ανορθόδοξη» συμπεριφορά (π.χ. επιβολή προστίμου ή αποκλεισμό από επόμενες δημοπρασίες αμμοχαλικού για δεδομένη χρονική περίοδο), όπως φαίνεται στον Πίνακα 4. Για να προτιμήσουν οι παίκτες τη στρατηγική (se,se) πρέπει να ισχύει η σχέση $\zeta - F < \omega$.

Πίνακας 4: Προτιμήσεις (ζεύγος στρατηγικών) των δύο παικτών με επιβολή κυρώσεων

*επέμβαση πολιτείας με κυρώσεις		Εργολήπτης A	
		Soft-exploitation (se)	Over-exploitation(oe)
Εργολήπτης A	Soft-exploitation (se)	ω, ω	$Z, \Omega - F$
	Over-exploitation (oe)	$\Omega - F, Z$	$\zeta - F, \zeta - F$

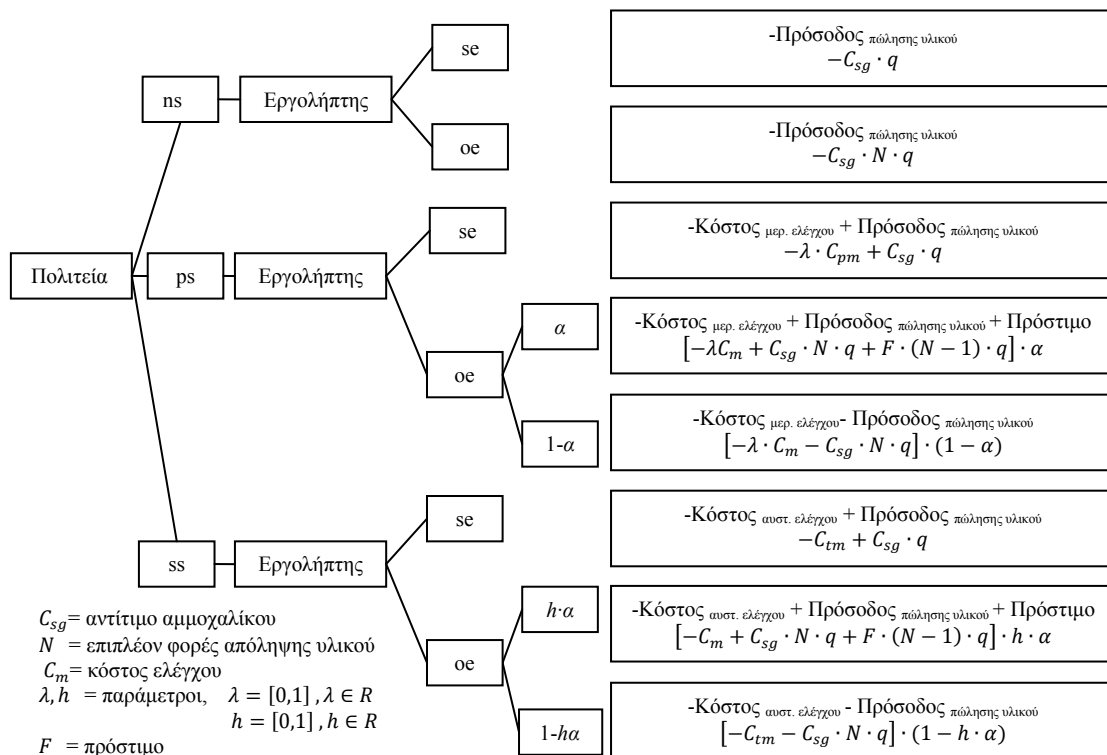
Θεωρώντας, q την απολήψιμη ποσότητα αμμοχαλικού, B τη μοναδιαία πρόσδο του εργολήπτη από τη χρήση του πόρου, C το μοναδιαίο κόστος της αμμοληψίας, a την πιθανότητα να γίνει αντιληπτή η παράνομη συμπεριφορά (οε) και N τις επιπλέον φορές που θα γίνει απόληψη υλικού, ο κάθε εργολήπτης έχει τις επιλογές που φαίνονται στο Σχήμα 1.



Σχήμα 1: Αποδόσεις επιλογών αμμοχαλικοληψίας

Κάθε εργολήπτης θα πάψει να συμπεριφέρεται ανορθόδοξα όταν: $B < C + Fa$ ή $C > B - Fa$ ή $a > (B-C)/F$ ή $F > (B-C)/a$. Επομένως, υπάρχουν τέσσερις δυνατοί τρόποι ή συνδυασμός αυτών, ώστε να κατευθυνθεί ο εργολήπτης στη συνετή διαχείριση του πόρου. Επειδή η παράμετρος B καθορίζεται από τους κανόνες της αγοράς, η πολιτεία έχει τη δυνατότητα να επέμβει είτε a) άμεσα, αν αυξήσει το ύψος της ποινής ($F \uparrow$) ή αυξήσει τον έλεγχο της περιοχής ($a \uparrow$) είτε β) έμμεσα, αν αυξήσει το αντίτιμο του αμμοχαλικού ($C \uparrow$).

Ο έλεγχος της περιοχής επιφέρει έσοδα στην πολιτεία, επειδή θα επιβληθούν κυρώσεις στους παράνομους εργολήπτες και δεν θα απωλεσθεί υλικό, το οποίο μπορεί να διατεθεί προς πώληση. Παρόλα αυτά, έχει σχετικά υψηλό κόστος, το οποίο αυξάνει υπερβολικά με την αύξηση των μέτρων ελέγχου. Λαμβάνοντας υπόψη τις προθέσεις των ενδιαφερομένων για συνετή ή μη διαχείριση του πόρου, η πολιτεία οφείλει να αποφασίσει το βαθμό ελέγχου της περιοχής [χωρίς έλεγχο (ns), μερικός έλεγχος (ps), αυστηρός έλεγχος (ss)]. Οι αποδόσεις στρατηγικών που θα ακολουθήσει η πολιτεία επηρεάζονται από τις στρατηγικές του εργολήπτη και περιγράφονται στο Σχήμα 2.



Σχήμα 2: Αποδόσεις επιλογών της Πολιτείας από τη διαχείριση αμμοχαλικού

Έστω ότι Q_{LBC} είναι η φέρουσα ικανότητα ενός ποταμού σε αμμοχάλικο με περίοδο επαναφοράς T , που αντιστοιχεί στη συνολική ετήσια αδειοδοτημένη ποσότητα απολήψιμου υλικού. Θα πρέπει $Q_{LBC} < Q_{ολικό}$, όπου $Q_{ολικό}$ είναι η συνολική ποσότητα αμμοχαλικού. Έστω επίσης ότι υπάρχουν δύο ενδιαφερόμενοι εργολήπτες. Επειδή ο πόρος είναι πεπερασμένος, το καθαρό όφελος του κάθε εργολήπτη ξεχωριστά είναι συνάρτηση της ποσότητας q_i που θα αξιοποιήσει ο εργολήπτης i , αλλά και της ποσότητας $q_{\sim i}$ που χρησιμοποιείται από τον άλλο ενδιαφερόμενο, επειδή μειώνεται η συνολική διαθεσιμότητα του πόρου. Μειωμένη διαθεσιμότητα υλικού συνεπάγεται υψηλό κόστος απόληψης για τον εργολήπτη. Ισχύει η σχέση: $q_i + q_{\sim i} < Q_{ολικό}$. Το πρόβλημα που αντιμετωπίζουν οι δύο εργολήπτες είναι πώς θα προσδιορίσουν την ποσότητα που θα διαχειρισθούν, προκειμένου να μεγιστοποιήσουν το κέρδος τους. Η ποσότητα αυτή εκφράζει, στην ουσία, την ισορροπία κατά Nash του συστήματος. Υποθέτουμε ότι οι εργολήπτες επιλέγουν την ποσότητα αμμοχαλικού ταυτόχρονα και ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλο. Η συνάρτηση καθαρού οφέλους του Εργολήπτη i θα είναι:

$$U_i = B \cdot q_i - C_{sg} \cdot q_i - q_i \cdot \left[\frac{(q_i + q_{\sim i})}{Q_{LBC}} \cdot C_{ac} + C_{eq} \right] \quad (3.2)$$

όπου: B = η μοναδιαία πρόσδοδος από την πώληση του αμμοχαλικού για τεχνικά έργα
 C_{sg} = το μοναδιαίο αντίτιμο αγοράς του αμμοχαλικού από το Δημόσιο
 C_{ac} = το κόστος εξεύρεσης και απόληψης του αμμοχαλικού, και
 C_{eq} = το κόστος της επένδυσης για την απόληψη του πόρου

Στην εξίσωση 3.2, ο πρώτος εντός της παρενθέσεως όρος, υποδηλώνει ότι το κόστος του συλλεχθέντος υλικού είναι συνάρτηση της διαθεσιμότητας του πόρου. Όταν δεν έχει συλλεχθεί αμμοχάλικο από τους εργολήπτες ($q_i + q_{\sim i} \rightarrow 0$), δηλαδή υπάρχει αρκετό διαθέσιμο υλικό στο ποτάμι, τότε το κόστος για τη συλλογή του είναι μηδενικό. Αντίθετα, όταν έχει συλλεχθεί ήδη σημαντική ποσότητα υλικού από τους εργολήπτες ($q_i + q_{\sim i} \rightarrow Q_{LBC}$), δηλαδή δεν υπάρχει αρκετό διαθέσιμο υλικό στο ποτάμι, τότε το κόστος για τη συλλογή του είναι μεγάλο και ίσο με C_{ac} το οποίο τέθηκε ίσο με $0,6 \text{ €/m}^3$. Το μοναδιαίο κόστος εξοπλισμού για τη συλλογή του υλικού ανέρχεται στα $3,6 \text{ €/m}^3$. Το αντίτιμο για την αγορά του αμμοχαλικού καθορίζεται κατά περίπτωση και η τιμή του κυμαίνεται από $0,6 \text{ €/m}^3$ έως $2,7 \text{ €/m}^3$.

Η μοναδιαία πρόσδοδος B από την πώληση του υλικού θεωρείται ως εκθετική συνάρτηση της διαθέσιμης ποσότητας, όπως φαίνεται από την εξίσωση που ακολουθεί

$$B = B_{max} \cdot \exp \left[-\xi \cdot \frac{(q_i + q_{\sim i})}{Q_{LBC}} \right] \quad (3.3)$$

όπου: B_{max} = η μέγιστη πρόσδοδος από την πώληση του αμμοχαλικού για τεχνητά έργα, που αντιστοιχεί στην περίπτωση που δεν έχει συλλεχθεί καθόλου υλικό από το ποτάμι ($q_i + q_{\sim i} \rightarrow 0$), οπότε και το αμμοχάλικο είναι εύκολα διαθέσιμο στον εργολήπτη. Όμως, όταν έχει συλλεχθεί ήδη σημαντική ποσότητα υλικού από τους εργολήπτες ($q_i + q_{\sim i} \rightarrow Q_{LBC}$), τότε η B μειώνεται σημαντικά. Η παράμετρος ξ εκφράζει πόσο έντονα μεταβάλλεται η εκθετική καμπύλη και εδώ ελήφθη ίση με τη μονάδα.

Οι ισορροπίες Nash του παιχνιδιού (ισορροπία αγοράς) είναι οι λύσεις (q_i^* , $q_{\sim i}^*$) του συστήματος:

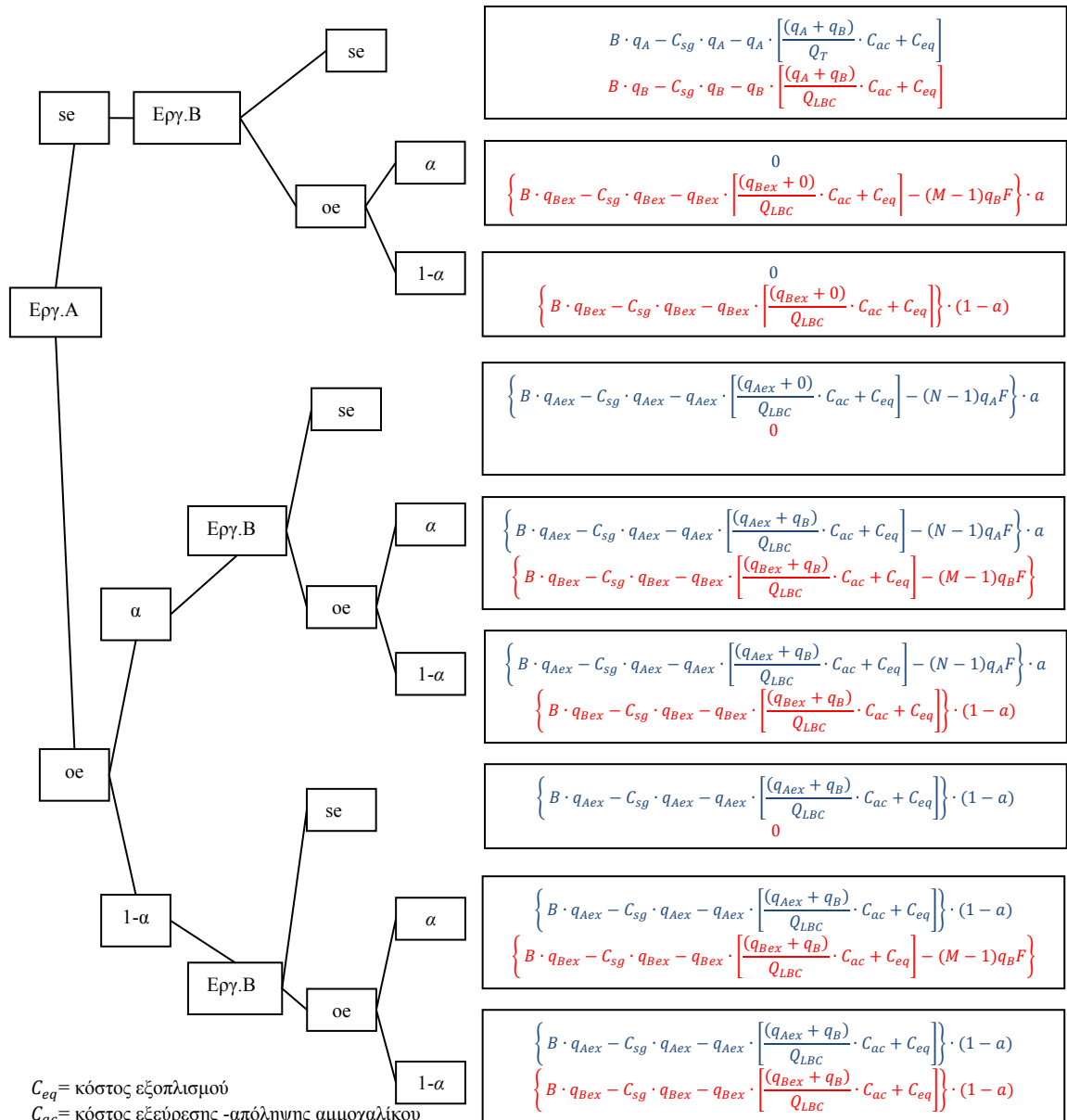
$$\frac{\partial U_i}{\partial q_i} = \frac{\partial U_{\sim i}}{\partial q_{\sim i}} = 0 \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial^2 U_i}{(\partial q_i)^2} < 0 \text{ και } \frac{\partial^2 U_{\sim i}}{(\partial q_{\sim i})^2} < 0 \tag{3.5}$$

με λύση

$$\frac{q_i^*}{Q_T} = \frac{q_{\sim i}^*}{Q_T} = \frac{1}{\xi} \cdot \left\{ 1 - \frac{(C_{ac} + C_{eq})}{B_{max} \cdot \exp\left(2 \cdot \xi \cdot \frac{q_i^*}{Q_{LBC}}\right)} \right\} \tag{3.6}$$

Η γεωμετρία της κατάστασης εξασφαλίζει ότι $q_i^* = q_{\sim i}^*$, δηλαδή οι δύο εργολήπτες διαχειρίζονται ίδια ποσότητα υλικού. Οι αποδόσεις στρατηγικών των δύο εργοληπτών Α και Β απεικονίζονται στο Σχήμα 3 με μπλε και κόκκινο χρώμα, αντίστοιχα.



Σχήμα 3: Αποδόσεις εργοληπτών αμμοχαλικοληψίας

4. ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ

4.1. ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΛΦΕΙΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ

Η λεκάνη απορροής του ποταμού Αλφειού, έκτασης 3.660 km², αποτελεί μία από τις κυριότερες υδρολογικές λεκάνες του Υδατικού Διαμερίσματος της Δυτικής Πελοποννήσου (01), αποστραγγίζοντας ολόκληρη σχεδόν την κεντρική και δυτική Πελοπόννησο. Ο ποταμός Αλφειός, με συνολικό μήκος 116 km, είναι συνεχούς ροής με μέση παροχή 67 m³/s και μέση ετήσια απορροή που κυμαίνεται μεταξύ 1.500 - 2.100 hm³. Το μέσο ετήσιο ύψος βροχοπτώσεων στην λεκάνη απορροής είναι 1.070 mm και ο μέσος ετήσιος όγκος νετού είναι 3.852 hm³. Το γεωμορφολογικό ανάγλυφο της λεκάνης χαρακτηρίζεται ως ήπιο στην παραλιακή και πεδινή ζώνη και στο εσωτερικό υψίπεδο της Μεγαλόπολης, με ομαλή και ήπια μετάβαση στη λοφώδη και ημιορεινή ζώνη και ως ορεινό και απότομο στο εσωτερικό και ανατολικό τμήμα του, όπου και βρίσκονται διάφοροι ορεινοί όγκοι, όπως Ταΰγετος, Μαίναλο, Χελμός κ.α.

Σημαντικό ρόλο στο γεωμορφολογικό ανάγλυφο παίζει μεταξύ άλλων παραμέτρων και η δράση του νερού, με το φαινόμενο της αποσάρθρωσης και της διάβρωσης. Ο Αλφειός Ποταμός, στη γεμάτη μαιανδρισμούς πορεία του, λόγω της πληθώρας φερτών που μεταφέρει έχει συμβάλει στη δημιουργία των παράκτιων λιμνών Αγουλινίτσας και Μουριάς (που έχουν αποξηρανθεί τεχνητός), στη θερμομεταλλική λίμνη Καϊάφα, στην πρόσχωση του Κυπαρισσιακού Κόλπου και επιμήκυνση των εκβολών του, όπως επίσης και στη μορφολογική ανάπτυξη της δελταϊκής ακτογραμμής του. Λόγω των φερτών που μεταφέρει, το έδαφος της λεκάνης του συνίσταται από αλουβιακές και αργιλομαργαϊκές αποθέσεις (Γιαννόπουλος, Μαναριώτης, 2005).

Ο υπολογισμός και η πρόβλεψη του ισοζυγίου φερτών υλών επιτρέπουν την εκτίμηση του βαθμού κατακράτησης φερτών και την εκτίμηση της ποσότητας αμμοχαλικού που μπορεί να ληφθεί σε κατάλληλο σημείο (appropriate sediment harvest locations) χωρίς να διαταραχθεί (σημαντικά) η δυναμική ισορροπία του συστήματος (safe yield) (USFWS, 2006). Όμως, επειδή η στερομεταφορά είναι συνάρτηση του υδρολογικών συνθηκών που επικρατούν σε μια περιοχή, η «παραγωγή» φερτού υλικού δεν είναι σταθερή σε κάθε ποτάμι.

Σύμφωνα με τη μελέτη των Δημητρακόπουλος κ.α. (2008), η ετήσια στερεοπαροχή του Αλφειού ποταμού εκτιμάται σε 2.630 m³ (με περίοδο επαναφοράς $T=1,28$ έτη) και 23.900 m³ (με περίοδο επαναφοράς $T=5$ έτη). Ειδικά, στο σημείο όπου εδράζεται το Φράγμα Φλόκα το μέσο ετήσιο υλικό εκτιμήθηκε σε 38.700 m³. Σύμφωνα με τη μελέτη, είναι δυνατή η απόληψη αδρανών από τον Αλφειό Ποταμό χωρίς αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, εφόσον λαμβάνεται υπόψη η φέρουσα ικανότητα του ποταμού.

Στη λεκάνη του Αλφειού Ποταμού κατάντη του φράγματος Φλόκα και μέχρι τις εκβολές του υπάρχει απαγορευτική απόφαση για αμμοχαλικοληψία (Απόφαση Νομάρχη Ηλείας υπ' αριθμ. 487/30-04-1996), καθώς και αντίστοιχη απόφαση απαγόρευσης χρήσης μηχανημάτων εκσκαφής με συρόμενο κάδο (drag-lines) (Απόφαση Νομάρχη Ηλείας υπ' αριθμ. 845/04-07-1996) για λόγους προστασίας της κοίτης και αποφυγής προβλημάτων στο φράγμα και άλλα τεχνητά έργα της ευρύτερης περιοχής, από αλόγιστη αμμοχαλικοληψία. Επιπρόσθετα, σε αρχαιολογικές περιοχές που γειτνιάζουν με την κοίτη του ποταμού απαγορεύεται η απόληψη υλικού σύμφωνα με τα ΦΕΚ 128/Β'/27-102-1992 και ΦΕΚ 686/Β'/02-06-2000.

4.2. Εφαρμογή της θεωρίας παιγνίων στον Αλφειό Ποταμό.

Οι νόμιμες απολήψεις αμμοχαλικού από τον μέσο και κάτω ρου του Αλφειού ποταμού, σύμφωνα με στοιχεία της Κτηματικής Υπηρεσίας, την τελευταία δεκαετία (2001-2011) ανέρχονται σε 435.228 m³, δηλαδή περίπου 45.000 m³ το χρόνο (αν

ληφθούν υπόψη και οι απολήψεις από μισθωμένες εκτάσεις των ΟΤΑ, με μη καταγεγραμμένα στοιχεία). Παρόλα αυτά, γίνονται πάρα πολλές παράνομες αμμοχαλικοληψίες από την κοίτη του ποταμού, για τις οποίες δυστυχώς δεν υπάρχουν καταγραφές, ώστε να είναι δυνατός ο υπολογισμός της επιπλέον ληφθείσας ποσότητας.

Η Κτηματική Υπηρεσία Ηλείας προσδιορίζει το αντίτιμο του αμμοχαλικού που προέρχεται από την κοίτη του Αλφειού Ποταμού στο $1,30 \text{ €/m}^3$. Στις περιπτώσεις που γίνεται μίσθωση θέσης αμμοχαλικοληψίας μετά από παραχώρηση στους Δήμους, τότε το αντίτιμο συνήθως προσδιορίζεται σε $0,60 \text{ €/m}^3$. Στην αγορά, όπου έχει ενσωματωθεί το κόστος θραύσης, πλύσης και μεταφοράς του υλικού και το προσδοκώμενο όφελος του προμηθευτή, το αντίτιμο πώλησης του αμμοχαλικού προσδιορίζεται σε $7-20 \text{ €/m}^3$. Σημειώνεται ότι σε περίπτωση παράνομης απόληψης ποτάμιου αμμοχαλικού, η Κτηματική Υπηρεσία εξετάζει την υπόθεση με το κριτήριο του διαφυγόντος κέρδους του Δημοσίου (απώλεια προσόδου) και προσδιορίζει το αντίτιμο του αμμοχαλικού στα 6 €/m^3 για την επιπλέον απολήψιμη ποσότητα υλικού.

Βάση των ισχυουσών τιμών, το θεωρητικό μοντέλο που αναπτύχθηκε στο 4^ο Κεφάλαιο και τον αλγόριθμο του Σχήματος 3 είναι δυνατόν α) να υπολογιστεί η εκτίμηση των προτιμήσεων των ενδιαφερόμενων εργοληπτών, υπό συγκεκριμένα υποθετικά σενάρια (Πίνακας 6) και β) να υπολογιστεί η μεταβολή της καθαρής ωφέλειας του κάθε εργολήπτη συναρτήσει των ποσοστιαίων απολήψιμων ποσοτήτων του αλλά και των ποσοστιαίων απολήψεων του άλλου εργολήπτη (Σχήμα 4).

Η εφαρμογή της μεθοδολογίας έγινε με τη βοήθεια του ελεύθερου λογισμικού Gambit, που εμπεριέχει ένα σύνολο εργαλείων υπολογισμών για τη ανάλυση θεμάτων με εφαρμογή τεχνικών της θεωρίας παιγνίων. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή, χρησιμοποιήθηκε η έκδοση 0.2007.12.04 Gambit. Το λογισμικό επιτρέπει την εκτίμηση της ισορροπίας και μπορεί να επιλύσει προβλήματα με πολλούς παίκτες σε άμεσο χρόνο, αλλά μόνο για μη συνεργατικά παίγνια (non-cooperative games) (McKelvey et al., 2010), όπως το εξεταζόμενο θεωρητικό μοντέλο.

Στόχος της εξέτασης των σεναρίων είναι η εξεύρεση του σημείου ισορροπίας κατά Nash (Nash equilibrium). Το σημείο αυτό εκφράζει την έκβαση του παιγνίου από την οποία κανένας παίκτης δεν έχει κίνητρο να παρεκκλίνει, αφού με δεδομένες τις πράξεις του άλλου παίκτη, η στρατηγική της ισορροπίας Nash είναι η βέλτιστη στρατηγική για κάθε παίκτη (Αλιμπραντής και Chakrabarti, 2004).

Βάση της μελέτης των Δημητρακόπουλος κ.α. (2010) αλλά και των δεδομένων της Κτηματικής Υπηρεσίας Ηλείας σχετικά με τις απολήψεις αμμοχαλικού την δεκαετία 2001-2011 θεωρήθηκε ότι η φέρουσα ικανότητα του ποταμού σε αμμοχάλικο είναι ίση με 40.000 m^3 . Αρχικά, η ένταση της υπερ-εκμετάλλευσης θεωρήθηκε ίση με 10% της φέρουσας (σενάρια Α και Β) και κατόπιν ίση με 20% (σενάριο C).

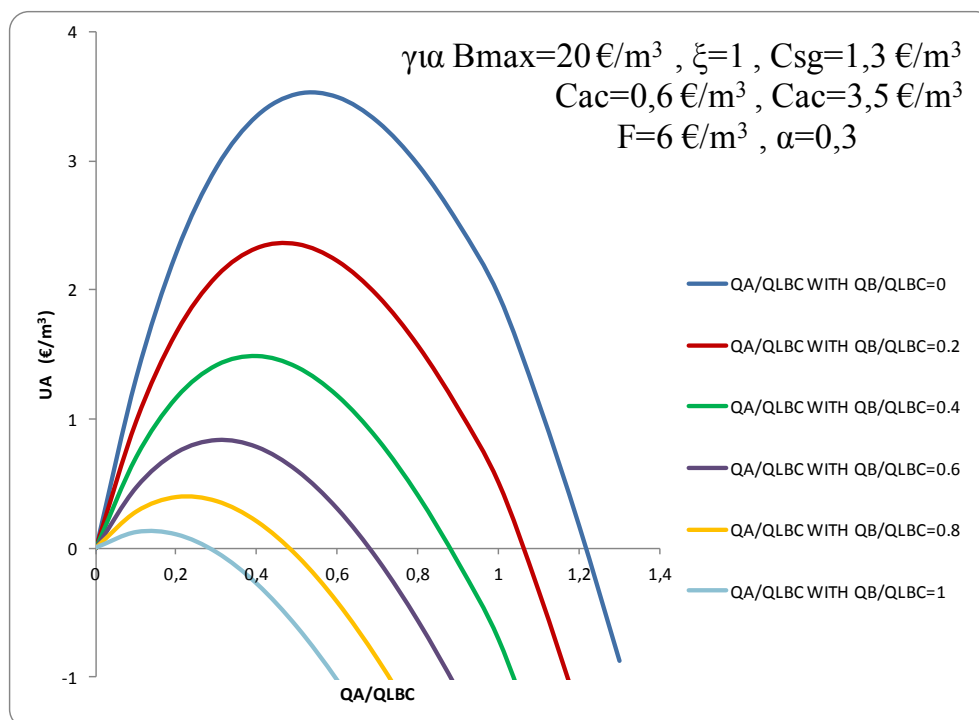
Πίνακας 5: Σημεία ισορροπίας κατά Nash σεναρίων εφαρμογής του μοντέλου για ΥΠΠ

ΣΕΝΑΡΙΟ	ΣΤΑΘΕΡΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	ΜΕΤΑΒΛΗΤΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΕΡΓ/ΤΗΣ Α	ΕΡΓ/ΤΗΣ Β	ΠΟΛΙΤΕΙΑ
A1	$B=20 \text{ €/m}^3$	$F=6 \text{ €/m}^3$	oe	oe	pa
A2	$C_1=3,7 \text{ €/m}^3$ $\alpha=0,3$	$F=9 \text{ €/m}^3$ (↑50%)	oe	oe	pa
A3	$C_{\text{αμμοχ.}}=1,3 \text{ €/m}^3$ $C_{\text{ελέγχου}}=12000 \text{ €/y}$	$F=12 \text{ €/m}^3$ (↑100%)	se	se	pa
B1(A1)	$B=20 \text{ €/m}^3$	$C_{\text{αμμοχ.}}=1,3 \text{ €/m}^3$	oe	oe	pa
B2	$C_1=3,7 \text{ €/m}^3$ $\alpha=0,3$	$C_{\text{αμμοχ.}}=1,5 \text{ €/m}^3$ (↑15%)	oe	oe	pa
B3	$F=6 \text{ €/m}^3$ $C_{\text{ελέγχου}}=12000 \text{ €/y}$	$C_{\text{αμμοχ.}}=1,7 \text{ €/m}^3$ (↑30%)	se	se	pa
C	Όμοια με σενάριο Α	$F=6 \text{ €/m}^3$	se	se	pa

Από τα δεδομένα του μοντέλου προέκυψε ότι για να επιτευχθεί η βέλτιστη έκβαση ορθολογικής λήψης του αμμοχαλικού στις περιπτώσεις που περιγράφονται από τα σενάρια Α και Β, πρέπει είτε να διπλασιασθεί η ποιμή είτε να αυξηθεί το αντίτιμο του αμμοχαλικού κατά 30% είτε να γίνει χρήση συνδυασμού και των δύο πολιτικών. Λαμβάνοντας υπόψη τις αποδόσεις της πολιτείας, είναι προφανές ότι μεταξύ των δύο επιθυμητών σεναρίων Α3 και Β3, προτιμάται η δεύτερη που δίνει μεγαλύτερες αποδόσεις. Όμως, από πολιτικής πλευράς, προτιμάται η πρώτη επιλογή, καθώς δεν μειώνονται σημαντικά οι αποδόσεις των εργοληπτών που κάνουν συνετή διαχείριση, παρά μόνο όσων ακολουθούν παράνομη συμπεριφορά.

Όταν η απόληψη του υλικού ξεπεράσει το 20% της αδειοδοτημένης, τότε σύμφωνα με τον αλγόριθμο, οι χρήστες έχουν μικρότερο καθαρό κέρδος, καθώς αυξάνει η δυσκολία εξεύρεσης του πόρου, και δεν τους συμφέρει ουσιαστικά η επιπλέον απόληψη υλικού. Ενδεχομένως να οδηγηθούν σε αυτή τη συμπεριφορά λόγω έλλειψης εμπιστοσύνης. Όμως, αν συμπεριφερθούν ως ορθολογικοί παίκτες, όπως ορίζει η θεωρία παιγνίων, τότε πρέπει σύμφωνα με το μοντέλο να διαχειριστούν συνετά τον πόρο. Το συμπέρασμα αυτό γίνεται και πιο εμφανές με τη βοήθεια του γραφήματος του Σχήματος 4, όπου φαίνεται ότι το κέρδος του εργολήπτη για υπέρβαση λήψης του πόρου κατά ποσοστό άνω του 20% είναι αρνητικό, δηλαδή εκφράζει ζημία, ακόμα και όταν ο άλλος εργολήπτης δεν συλλέξει καθόλου υλικό.

Επίσης, από τη μελέτη του γραφήματος γίνεται αντιληπτό ότι όσο αυξάνει η ποσότητα του συλλεχθέντος υλικού από τον εργολήπτη, δηλαδή όσο αυξάνεται η κατανάλωση του πόρου, τόσο ελαττώνεται το όφελος που απομένει για τον άλλο χρήστη (εργολήπτη). Δηλαδή, παρόλο που η υπερβολική χρήση του αμμοχαλικού οδηγεί σε ζημία, το γεγονός ότι ο πόρος λειτουργεί ως ανταγωνιστικό προϊόν (εμφανίζει αρνητική εξωτερικότητα), αναγκάζει τους χρήστες να οδηγηθούν στην υπερβολική χρήση του πόρου αυτού. Η κατάσταση αυτή χαρακτηρίζεται από τη βιβλιογραφία ως τραγωδία των κοινόχρηστων πόρων (tragedy of the commons) και σε αυτή την περίπτωση οφείλει να παρέμβει η πολιτεία είτε με ρυθμιστικές παρεμβάσεις της χρήσης του πόρου είτε με τον καθορισμό ιδιοκτησιακών κριτηρίων.



Σχήμα 4: Μεταβολή του μοναδιαίου οφέλους του κάθε εργολήπτη για το σενάριο C

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Επετεύχθη η δημιουργία ενός μοντέλου εκτίμησης της στρατηγικής συμπεριφοράς των ενδιαφερόμενων μερών (εργολήπτες και πολιτεία) για την αξιοποίηση του αμμοχαλικού, με τη βοήθεια τεχνικών της θεωρίας παιγνίων και τη διαμόρφωση ενός θεωρητικού παιγνίου τριών παικτών. Γνωρίζοντας τη συμπεριφορά των εμπλεκόμενων μερών, η οποία καθορίζεται σημαντικά από τις δράσεις και ενέργειες του καθενός ξεχωριστά και των αποφάσεων των λοιπών μερών, η πολιτεία δύναται να ακολουθήσει κατάλληλη πολιτική ώστε να επιτυγχάνεται ορθολογική αξιοποίηση του πόρου, στα πλαίσια βιώσιμης ανάπτυξης και ευημερίας της περιοχής. Μελλοντικός στόχος της έρευνας είναι η περαιτέρω βελτίωση του μοντέλου, εισάγοντας και άλλες παραμέτρους, όπως περιβαλλοντικό κόστος, κόστος αποκατάστασης από πλημμυρικά επεισόδια, καθώς και λοιπές τεχνικές της θεωρίας παιγνίων (δημοπρασίες, διαπραγματεύσεις κλπ).

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Εκφράζονται ευχαριστίες στην Κτηματική Υπηρεσία Ηλείας για την παροχή στοιχείων και στο Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών για την χορήγηση υποτροφίας στην κ. Ποδηματά Μαριάνθη και υποστήριξη εκπόνησης της Διδακτορικής της Διατριβής.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Brown, A.V., Lyttle, M.M., Brown, K.B. (1998) Impacts of Gravel Mining on Gravel Bed Streams. Transactions of the American Fisheries Society 127:979–994.
- Kondolf, M.G.(1997) Hungry Water: Effects of Dams and Gravel Mining on River Channels. Environmental Management 21(4):533–551.
- Madani, K. (2010) Game theory and water resources. Journal of Hydrology 381:225–238.
- McKelvey, R.D., McLennan, A.M., Turocy, T.L. (2010). Gambit: Software Tools for Game Theory, Version 0.2010.09.01. <http://www.gambit-project.org>.
- United States Fish and Wildlife Service (USFWS) (2006) Sediment removal from active stream channels in OREGON: Considerations for Federal Agencies for the Evaluation of Sediment Removal Actions from Oregon Streams (<http://www.fws.gov/oregonfwo/ExternalAffairs/Topics/Documents/GravelMining-OSC.19Feb08.pdf>).
- Αλιμπραντής, Χ.Δ., Chakrabarti, S.K. (2004) Παίγνια και Λήψη Αποφάσεων. Ελληνική Μαθηματική Εταιρεία (εκδ.), Αθήνα 2004.
- Γιαννόπουλος, Π.Χ., Μαναριώτης Ι.Δ. (2005) Επιπτώσεις στην Υδρομορφολογία του Αλφειού Ποταμού από Έργα Υποδομής και Αμμοχαλικοληψίες. Πρακτικά του Συνεδρίου με θέμα Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Πόρων, Ξάνθη, 06-09/04/2005 (εκδ. Τσιχριντζής, Β.Α.): 275-281.
- Δημητρακόπουλος, Α.Κ., Καλέρης, Β.Κ., Δήμας Α.Α., Χορς, Γ.Μ., Ζεληλίδης, Α., Γιαννόπουλος, Π.Χ. (2010) Διερεύνηση επιπτώσεων και ιδιαίτερος επί της στερεομεταφοράς εκ δυνητικών απολήψεων στους ποταμούς Αλφειό και Ερύμανθο, Τεχνική Έκθεση, Arion Kleos CJV.
- Χαπιζάνης, Π. (2007) Κοινόχρηστη Δημόσια Περιουσία (Αιγιαλός - Όχθη) αρμοδιότητας Υπουργείου Οικονομικών & Διαδικασία Αμμοληψίας (http://library.tee.gr/digital/kma/kma_m1418/kma_m1418_xapizanis.pdf).

ΠΡΩΤΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΥΠΟΛΟΓΙΑΣ ΠΟΤΑΜΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ ΒΑΣΕΙ ΒΙΟΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΙ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ

Πάνος Παναγόπουλος¹, Γιώργος Χατζηνικολάου²

¹ ECOS Μελετητική Α.Ε., Μακεδόνων 10, 11521 Αθήνα

² Ινστιτούτο Θαλάσσιων Βιολογικών Πόρων και Εσωτερικών Υδάτων, Ελληνικό Κέντρο Θαλασσίων Ερευνών, Τ.Θ. 712, 19013 Ανάβυσσος

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρακολούθηση των υδάτων της Ελλάδας, στην Οδηγία Πλαίσιο για τα Ύδατα, εξαρτάται από την ύπαρξη τυπολογίας των υδάτινων σωμάτων. Μέχρι σήμερα δεν υπάρχει εθνικό σύστημα τυπολογίας των ποταμών συμβατό με τις απαιτήσεις της ΟΠΥ. Η επισκόπηση ιχθυολογικών δεδομένων και η εφαρμογή οικολογικών θεωριών ποταμολογίας στις υδραυλικές απαιτήσεις των ποτάμιων οργανισμών, παρήγαγε μια τέτοια τυπολογία. Συγκεράσθηκαν τυπολογικοί παράγοντες του Συστήματος Β της ΟΠΥ, η ανάγκη για διαχειρίσιμο αριθμό τύπων και η οικολογικά ερμηνεύσιμη διάκριση τους. Έγινε χρήση 4 κριτηρίων: βιο-περιφέρεια, ενδεικτική θεωρητική απορροή, υψόμετρο και κλίση. Με αυτό τον τρόπο προέκυψαν 36 δυνητικοί τύποι. Ο έλεγχος έδειξε πως στην Ελλάδα υπάρχουν 21 τέτοιοι τύποι ποταμών.

FIRST ASSESSMENT OF GREEK RIVER TYPOLOGY BASED ON BIOLOGICAL AND HYDRAULIC CRITERIA

P. Panagopoulos¹, Y. Chatzinikolaou

¹ ECOS Consulting S.A. 10 Macedonon st., 11521 Athens

² Institute of Marine and Inland Biological Resources, Hellenic Centre for Marine Research, POB 712, 19013 Anavissos

ABSTRACT

Freshwater monitoring of Greece, under the Water Framework Directive, depends on the existence of a water body typology. Until today, there is no Greek national system of river typology compatible to the WFD requirements. A review of ichthyology data and the application of potamological ecology theories on hydraulic requirements of river organisms produced such a typology. There has been an effort to merge the various typological factors of the WFD System B, the need for a reduced number of types and the ecologically distinguishable sound interpretation of the produced types. 4 criteria were used: bio-region, indicative theoretical runoff, altitude and channel slope. In this way, 36 potential types emerged. When tested, 21 such types of rivers were found in Greece.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

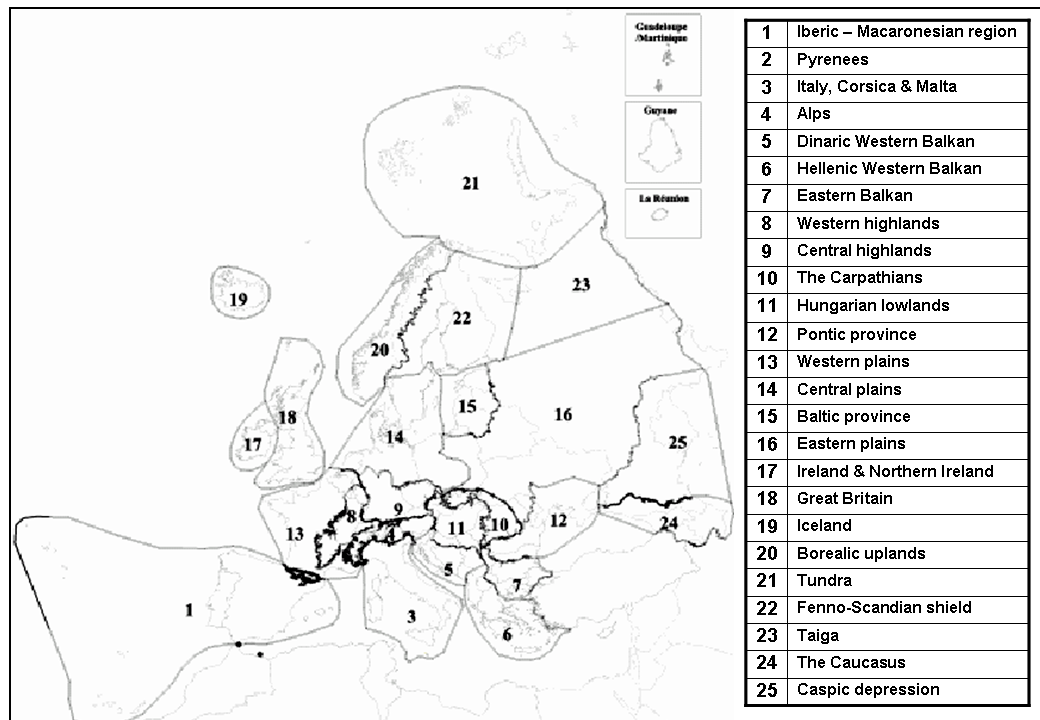
Συστήματα κατηγοριοποίησης, όπως η τυπολογία, χρησιμοποιούνται για να ομαδοποιήσουν συναφή μέλη σε τύπους με κοινά ιδιαίτερα χαρακτηριστικά. Σύμφωνα με τον Bailey (1994), η τυπολογία στηρίζεται σε *a priori* κρίσεις βάσει ορισμού των κλάσεων και των ορίων τους. Αν και η τυπολογία έχει βρει ευρεία εφαρμογή στις επιστήμες του περιβάλλοντος, οι Naiman *et al.* (1992) έδειξαν πως 20 έτη πριν, η τυπολογία των ποταμών βρισκόταν σε στάδιο διαμόρφωσης. Αυτό, γιατί αφενός οι ποταμοί αναγνωρίστηκαν ως οικοσυστήματα σχετικά πρόσφατα και αφετέρου, γιατί είναι πολύπλοκες οι δυναμικές αλλαγές που συμβαίνουν σε ευρεία χωρική και χρονική κλίμακα. Πλέον, η αλματώδης αύξηση στην παραγωγή τυπολογικών κατηγοριοποιήσεων συμπεριλαμβάνει τη χρήση τους στη διαχείριση των υδάτινων πόρων. Η τυπολογία αποτελεί, σήμερα, ένα καίριο συστατικό πολλών προσεγγίσεων στη βιώσιμη διαχείριση και προστασία των ποταμών.

Ως τυπολογία εννοείται ο χαρακτηρισμός των ποταμών σε μη τροποποιημένες συνθήκες. Η εκτίμηση της κατάστασης των ποταμών στηρίζεται στη σύγκριση μεταξύ των συνθηκών αναφοράς, δηλαδή εκείνων που αναμένονται σε απουσία ή ελάχιστη ανθρωπογενή επίπτωση, και της υφιστάμενης κατάστασης. Είναι εξαιρετικά σημαντικό οι συνθήκες αναφοράς κάθε ποταμού να προσδιοριστούν βάσει τύπων ποταμών, καθώς οι συνθήκες π.χ. στους ορεινούς ποταμούς είναι διαφορετικές από τους πεδινούς. Έτσι, οι περιγραφείς-κριτήρια της τυπολογίας αφορούν αποκλειστικά σε παράγοντες που δεν επηρεάζονται από ανθρωπογενείς παράγοντες, καθώς σε διαφορετική περίπτωση θα ήταν αδύνατο να εκτιμηθεί η απόκλιση της κατάστασης των ποταμών από την φυσική τους κατάσταση, που αποτελεί το ζητούμενο. Στην Οδηγία 2000/60/EK παρέχονται στα Κράτη Μέλη δύο μεθοδολογικά εργαλεία, ως προς την παραγωγή τυπολογίας ποταμών. Τα δύο συστήματα τυπολογικής προσέγγισης που προσφέρουν τέτοια κριτήρια είναι τα Α, τα χαρακτηριστικά του οποίου είναι καθορισμένα στην Οδηγία, και Β, τα χαρακτηριστικά του οποίου καθορίζονται από τα κράτη-μέλη. Η λειτουργική διαφορά των συστημάτων έγκειται στη διαθέσιμη γνώση που υπάρχει σχετικά με τη βιολογία των ποταμών, δηλαδή αν οι ποταμοί-μέλη ενός τύπου μπορούν να υποστηρίξουν παρόμοια κοινότητα οργανισμών, π.χ. ψαριών, φυτών. Έτσι, το σύστημα Β είναι προτιμητέο στις περιπτώσεις χωρών όπου υπάρχει σημαντική έρευνα και διαθέσιμη σχετική γνώση, ενώ στην αντίθετη περίπτωση προτιμάται το σύστημα Α. Τα Κράτη-Μέλη στη πλειονότητά τους υιοθέτησαν το σύστημα Β (European Commission, 2003).

Τα βασικά κριτήρια στο σύστημα Α αφορούν για την Ελλάδα: (α) σε δύο οικοπεριοχές, όπως προκύπτουν από το παράρτημα ΧΙ της Οδηγίας (Σχ. 1), (b) σε 4 κλάσεις μεγέθους της λεκάνης απορροής, (c) σε 3 κλάσεις του υψόμετρου και (d) σε 2 από τις 3 κατηγοριοποιήσεις της γεωλογίας που προτείνονται, αν θεωρηθεί πως στην Ελλάδα η γεωλογία οργανικού τύπου αντιπροσωπεύει ένα εξαιρετικά περιορισμένο ποσοστό επί του συνόλου.

Τα κριτήρια στο σύστημα Β αφορούν υποχρεωτικά: στο υψόμετρο, στη γεωλογία, στο μέγεθος της λεκάνης απορροής, στις συντεταγμένες, κατά κρίση σε όποιους άλλους φυσικούς ή χημικούς παράγοντες επιδρούν με σημαντικό τρόπο στην οργάνωση των βιοκοινοτήτων στους ποταμούς και σε προαιρετικές παραμέτρους προς επιλογή. Σε αντίθεση με το σύστημα Α, στο Β δεν υπάρχουν περιορισμοί στον αριθμό των κλάσεων για κάθε κριτήριο, και κάθε Κράτος Μέλος είναι υπεύθυνο για τα όρια διαχωρισμού των κλάσεων.

Είναι κρίσιμο να τονιστεί, πως τα Κράτη Μέλη θα καταλήξουν το καθένα σε μια εθνική τυπολογία προκειμένου να αναφέρουν στην ΕΕ ή να την χρησιμοποιήσουν στα Σχέδια Διαχείρισης Λεκανών Απορροής (ΣΔΛΑΠ).



Σχήμα 1. Οι οικοπεριοχές για τους ποταμούς και λίμνες της Ευρώπης. Παράρτημα XI, Οδηγία 2000/60/ΕΚ.

Η χρήση διαφορετικών συστημάτων τυπολογιών μεταξύ των Υδατικών Διαμερισμάτων (ΥΔ) θα προκαλούσε ασάφειες, α) στην οριοθέτηση των Υδάτινων Σωμάτων (ΥΣ) και β) στην εκτίμηση της κατάστασης των ΥΣ, που θα έθεταν σε κίνδυνο τόσο το εθνικό σύστημα αξιολόγησης, όσο και τα διαχειριστικά μέτρα.

Άλλα συστήματα τυπολογίας που ενυπάρχουν σε αυτήν ή δημιουργήθηκαν για την εφαρμογή της Οδηγίας 2000/60/ΕΚ αφορούν: α) στην κατηγοριοποίηση των Υδάτινων Σωμάτων σε ποταμούς, λίμνες, μεταβατικά και παράκτια ύδατα, β) στην διάκριση των Υδάτινων Σωμάτων σε βαρέως τροποποιημένα ή φυσικά/ημιφυσικά και γ) στην τυπολογία που δημιουργήθηκε προκειμένου να καταστεί εφικτή η σύγκριση δειγμάτων μεταξύ περιοχών της Ευρώπης για την διεξαγωγή της Άσκησης Διαβαθμονόμησης. Στην τελευταία τυπολογία, η Ελλάδα, η Ισπανία, η Πορτογαλία, η Σλοβενία, η Κροατία, η Μάλτα και η Κύπρος δεν συμμετείχαν με δείγματα ποταμών, οπότε η τυπολογική διάκριση των δειγμάτων για τους μεσογειακούς ποταμούς –που αφορούν την Ελλάδα- στηρίζεται αποκλειστικά σε ορισμένα δείγματα από την Γαλλία και την Ιταλία (Buffagni et al., 2005).

Στόχος της εργασίας είναι μια τυπολογία των ποταμών της Ελλάδας, που να συμβιβάζει τέσσερεις απαιτήσεις: α) αξιοπιστία, β) αντιπροσωπευτικότητα, γ) μικρότερος δυνατός αριθμός τύπων για τη διαχείριση, και δ) συμβατότητα με τις προδιαγραφές της Οδηγίας 2000/60/ΕΚ.

2. ΔΙΑΘΕΣΙΜΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

Προκειμένου για την παραγωγή τυπολογίας ποταμών θεωρήθηκε σκόπιμο να εξετασθούν οι πλέον πρόσφατες επιστημονικές εξελίξεις σε ότι αφορά τους ποταμούς, με έμφαση στην Ελλάδα. Η διαδικασία αυτή περιέλαβε, μόνον τα βενθικά μακροασπόνδυλα και τα ψάρια, καθώς για αυτά, υπάρχει στην Ελλάδα ικανός αριθμός ερευνών και μελετών (Πίν.1). Στόχος αυτής της βιβλιογραφικής ανασκόπησης και επισκοπικής ανάλυσης ήταν, με γνώμονα τις υδραυλικές συνθήκες, ο προσδιορισμός των κριτηρίων και των κλάσεων για κάθε κριτήριο, δηλαδή του αριθμού των υποδιαίρέσεων για κάθε κριτήριο. Συνεπώς, τα

κριτήρια και ο αριθμός των κλάσεων καθορίστηκαν εκ των προτέρων. Στη συνέχεια, δοκιμάστηκαν και ελεγχθήκαν τα κριτήρια. Για το μέγεθος ποταμού η δοκιμή/έλεγχος αφορούσε επισκοπική ανάλυση δορυφορικών εικόνων. Για το υψόμετρο έγινε δοκιμή για τον καθορισμό των ορίων και ακολούθως, έλεγχος επιβεβαίωσης της κατανομής των ειδών ενός ανεξάρτητου σετ δεδομένων. Για την κλίση υπήρξε μόνον έλεγχος επιβεβαίωσης της κατανομής των ειδών μιας ανεξάρτητης ομάδας δεδομένων.

Πίνακας 1. Μελέτες και αναφορές που συμπεριλήφθηκαν στην εξαγωγή του συστήματος τυπολογίας

Στοιχείο	Αναφορά
Αβιοτική τυπολογία	Κεμιτζόγλου, 2006. Καθορισμός των τύπων ποτάμιων συστημάτων της Βόρειας και Κεντρικής Ελλάδας
Αβιοτική τυπολογία	Skoulikidis et al., 2006. Analysis of factors driving stream water composition and synthesis of management tools—A case study on small/medium Greek catchments.
Ψάρια	Οικονόμου et al., 2007. Δημιουργία Ιχθυολογικού Πολυπαραμετρικού Δείκτη για την Εκτίμηση της Οικολογικής Κατάστασης Ορεινών Ρεμάτων και Ποταμών.
Ψάρια	Zogaris et al., 2009. Ecoregions in the Southern Balkans: Should their boundaries be revised?
Βενθικά μακροασπόνδυλα	Buffagni et al., 2005. Towards European Inter-Calibration for the Water Framework Directive: Procedures and Examples for Different River Types from the E.C. Project STAR.
Βενθικά μακροασπόνδυλα	Χατζηνικολάου, 2008. Επίδραση διαχειριστικών πρακτικών στην ποιότητα νερού και στην οικολογία των ποταμών της Ελλάδας. Ο Πηνειός (Θεσσαλίας) ως ειδική περίπτωση μελέτης.
Βενθικά μακροασπόνδυλα	Χατζηνικολάου, 2009. Επικαιροποιημένα δεδομένα σταθμών παρακολούθησης ποταμών (επιλογή σταθμών).

Τέλος, οι δυνητικοί τύποι ποταμών που προέκυψαν ελέγχθηκαν με Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών προκειμένου να καταδειχθεί πόσοι από αυτούς αντιπροσωπεύονται στην Ελλάδα. Δηλαδή, αφού οι ποταμοί της Ελλάδας διαχωρίστηκαν σε τμήματα μήκους 2,5 χλμ., αυτοί χαρακτηρίστηκαν με βάση τα παραπάνω κριτήρια. Στη συνέχεια ελέγχθηκε κατά πόσο αντιπροσωπεύονται στην Ελλάδα όλοι οι δυνητικοί τύποι ποταμών που προέκυψαν από το προτεινόμενο σύστημα.

3. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΥΠΟΛΟΓΙΑΣ

3.1. ΚΡΙΤΗΡΙΑ

Ως κριτήρια της προτεινόμενης τυπολογίας χρησιμοποιήθηκαν τα υποχρεωτικά κριτήρια του συστήματος Β της Οδηγίας 2000/60/ΕΚ, ως έχουν ή ενοποιημένα και ορισμένα από τα προαιρετικά. Συνοπτικά χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα κριτήρια:

α) Βιοπεριφέρειες. Προς αντικατάσταση των οικοπεριοχών κατά Πies του συστήματος Α. Κατά αυτό τον τρόπο οι συντεταγμένες μιας θέσης ποταμού (σύστημα Β) ορίζουν τον τυπολογικό χαρακτηρισμό της. **β)** Ενδεικτική μέση ετήσια απορροή, που θεωρήθηκε ως περισσότερο αντιπροσωπευτική του μεγέθους του ποταμού από την λεκάνη απορροής, δεδομένης αφενός της μεγάλης διαφοροποίησης των βροχοπτώσεων μεταξύ δυτικής και ανατολικής Ελλάδας και αφετέρου των μεγάλων διαφοροποιήσεων των ποσοστών κατείσδυσης μεταξύ ασβεστολιθικών/καρστικών σχηματισμών και των άλλων γεωλογικών σχηματισμών. **γ)** Υψόμετρο του ποταμού **δ)** Κλίση της κοίτης του ποταμού.

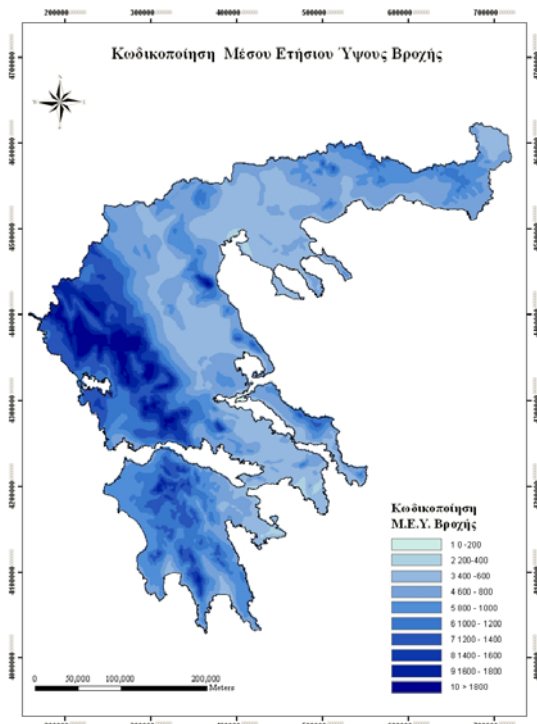
3.2. ΒΙΟΠΕΡΙΦΕΡΕΙΕΣ

Σε ότι αφορά στις οικοπεριοχές, η θεώρηση που αναφέρεται στο παράρτημα XI της Οδηγίας 2000/60/ΕΚ ανήκει στον Πies (1967/1978). Ειδικότερα στη νότια Βαλκανική,

υπάρχουν αιτιολογημένες ενστάσεις στο όριο που χρησιμοποιείται για τη διάκριση των οικοπεριοχών 6 και 7 (Σχ. 1). Ο Αξιός ποταμός αποτελεί αυτό το όριο και με πιστή εφαρμογή του χάρτη κάποιος μπορεί εσφαλμένα να καταλήξει πως οι ανατολικοί παραπόταμοι του Αξιού ανήκουν σε διαφορετική οικοπεριοχή από τους δυτικούς, ενώ βρίσκονται στην ίδια λεκάνη απορροής. Οι Zogaris et al. (2009) με βάση τα αποτελέσματα ερευνών και ιστορικών πληροφοριών για την ιχθυοπανίδα των επιφανειακών εσωτερικών υδάτων (π.χ. Εconoμου et al., 2007 και Koutsikos et al., 2012), κατέληξαν σε διαφορετική βιογεωγραφική ταξινόμηση του ελληνικού χώρου. Η προσέγγιση αυτή προτείνει τέσσερις βιοπεριφέρειες: νοτιοανατολική Αδριατική, Ιόνια, Ανατολικού Αιγαίου και Βόρειου Αιγαίου. Η νοτιοανατολική Αδριατική περιοχή, όμως, περιλαμβάνει στην ουσία μόνον τη λεκάνη του ποταμού Αώου. Εξαιτίας: α) της μικρής της έκτασης σχετικά με τις υπόλοιπες βιογεωγραφικές περιοχές που καταλαμβάνει, β) της προσπάθειας περιορισμού του αριθμού των τύπων και γ) των σημαντικών ομοιοτήτων που παρουσιάζει στα κλιματικά στοιχεία [βροχόπτωση (Σχ. 2), θερμοκρασία] με την Ιόνια βιογεωγραφική περιοχή αποφασίστηκε να συνενωθεί με την τελευταία. Το αποτέλεσμα της ενοποίησης των δύο βιοπεριφερειών, της νοτιοανατολικής Αδριατικής με την Ιόνια, διαμόρφωσε της διάκριση της Ελλάδας σε τρεις βιοπεριφέρειες: Ιόνια (I), Βορείου Αιγαίου (N) και Νοτίου Αιγαίου (S). Η κατανομή της Ελλάδας στις τρεις βιοπεριφέρειες παρουσιάζεται στο Σχ. 3.

3.3 ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΗ ΜΕΣΗ ΕΤΗΣΙΑ ΑΠΟΡΡΟΗ

Βασική παράμετρος που επηρεάζει τις συναθροίσεις των ποτάμιων οργανισμών και των λειτουργικών τους χαρακτηριστικών είναι η το μέγεθος της απορροής, που κατ' αρχήν εξαρτάται από το μέγεθος της λεκάνης απορροής. Όσο μεγαλύτερη είναι η έκταση που καταλαμβάνει μια λεκάνη απορροής, τόσο περισσότερα είδη ψαριών αποτελούν την ιχθυοκοινότητα του ποταμού (π.χ. Reyjol et al., 2007).



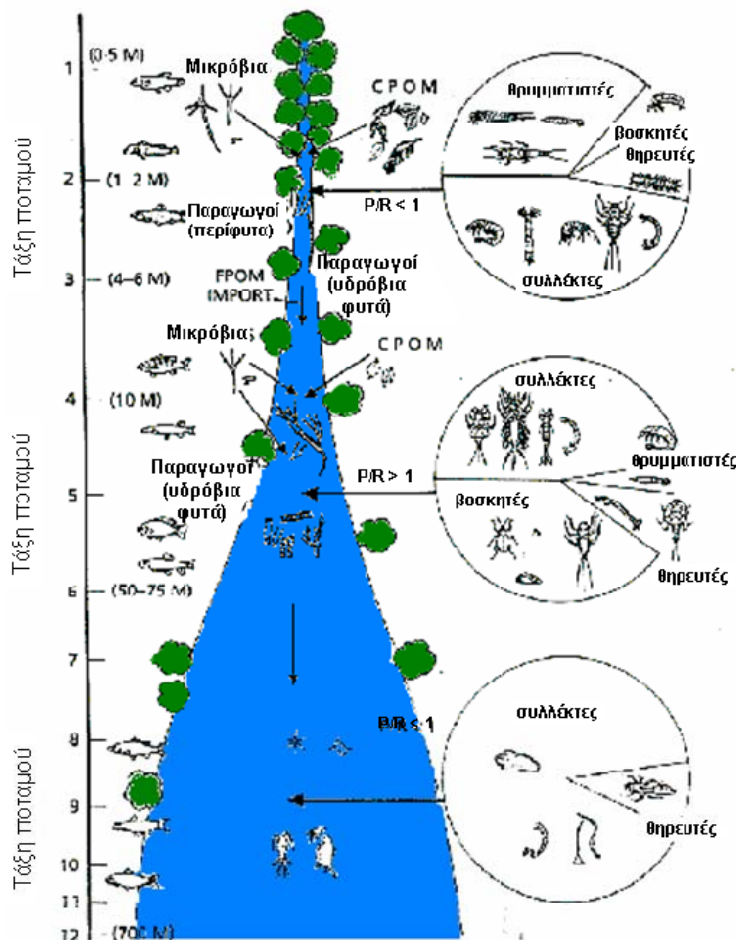
Σχήμα 2. Μέσο ετήσιο ύψος βροχόπτωσης (από Βολιώτη, 2009)



Σχήμα 3. Τα 14 Υδατικά Διαμερίσματα της Ελλάδας και οι βιοπεριφέρειες που αντικαθιστούν τις οικοπεριοχές που προτείνονται στην τυπολογία του συστήματος Α, στο παράρτημα XI της Οδηγίας 2000/60/ΕΚ

Το συμπέρασμα αυτό προκύπτει από την κλίση διαφορετικών γραμμικών παλινδρομήσεων που έγιναν μεταξύ της ποικιλότητας ειδών ψαριών και της έκτασης της λεκάνης απορροής για 5 διαφορετικές ευρωπαϊκές οικοπεριοχές. Οπότε, ακόμη κι αν η κλίση των παλινδρομήσεων μεταξύ διαφορετικών οικοπεριοχών σπάνια είναι η ίδια, ωστόσο, ισχύει ως κανόνας πως εντός κάθε οικοπεριοχής οι μεγαλύτερες λεκάνες απορροής υποστηρίζουν κοινότητες ψαριών με περισσότερα είδη. Η σχέση αυτή υφίσταται επειδή, όσο μεγαλύτερο είναι ένα σύστημα (λεκάνη απορροής, μήκος, παροχή ποταμού), τόσο περισσότερες ευκαιρίες ενδιαιτημάτων προσφέρει για μεγαλύτερη ποικιλία ειδών (Williams, 1964).

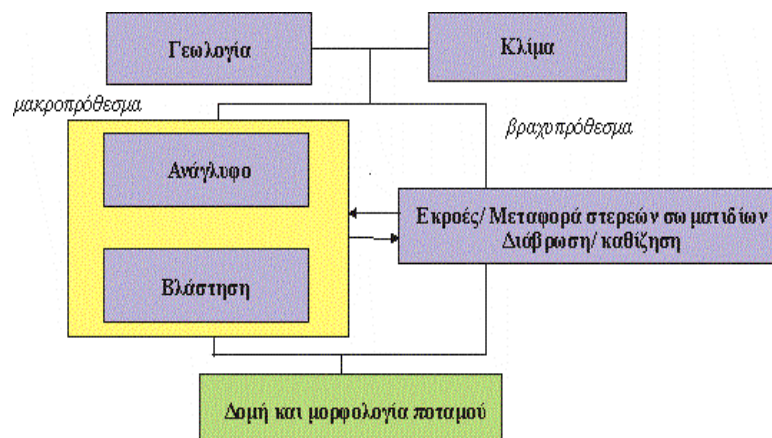
Η μέση ετήσια απορροή εκφράζει το μέγεθος ή την τάξη του ποταμού. Το μέγεθος του ποταμού ελέγχει τον τροφικό χαρακτήρα, δηλαδή, την προέλευση της βασικής οδού θρέψης στον ποταμό και συνεπακόλουθα τις βιοκοινότητες του ποταμού. Έτσι, σύμφωνα με τους Vannote et al. (1980) κάθε ποτάμιο σύστημα αποτελεί μια συνέχεια φυσικών διαβαθμίσεων και συνεπακόλουθων βιολογικών προσαρμογών. Στη θεωρία τους περί συνέχειας των ποταμών (River Continuum Concept, RCC), ο ποταμός απεικονίζεται ως ένα απλό κανάλι (Σχ. 4) αυξανόμενης τάξης ρέματος και πλάτους. Κοντά στις πηγές (τάξη Strahler 1-3) ο ποταμός εμφανίζεται να κυριαρχείται από παρόχθια βλάστηση με πλούσια σκίαση και εισροές υλών που συντελούν στο ετεροτροφικό ($P/R < 1$), δηλαδή όπου στη συνολική παραγωγικότητα των οργανισμών του ποτάμιου συστήματος κυριαρχούν όσοι εξαρτώνται από εξωτερικής προέλευσης ύλη.



Σχήμα 4. Γενικευμένο μοντέλο των εναλλαγών στις σχετικές αφθονίες των λειτουργικών ομάδων των μακροασπονδύλων κατά μήκος ενός συστήματος ποταμού από τις πηγές ως τις εκβολές, όπως προβλέπεται από την αρχή της συνέχειας των ποταμών (River Continuum Concept) (Vannote et al., 1980)

Στην ασπόνδυλη πανίδα κυριαρχούν οι θρυμματιστές που χρησιμοποιούν την εισροή αδρής οργανικής ύλης (CPOM) ως διαθέσιμη τροφή αφού έχει έρθει στην κατάλληλη μορφή από τους υδατικούς μικροοργανισμούς και τους συλλέκτες που τρέφονται με οργανική ύλη. Η παραγωγικότητα στα μεσαία τμήματα του ποταμού (τάξη 4 -6) εξαρτάται λιγότερο από την αλλόχθονη ύλη και περισσότερο από αυτήν που παράγεται επί τόπου. Σε αυτό συντελούν το αυξημένο πλάτος της κοίτης και ο επακόλουθος περιορισμός του ρόλου της παρόχθιας βλάστησης, ως προσφορά ύλης και σκίασης, οπότε το σύστημα γίνεται αυτότροφο ($P/R > 1$). Οι θρυμματιστές μειώνονται και οι βοσκητές γίνονται πιο σημαντικοί καθώς τα προσκολλημένα άλγη αφθονούν λόγω της μεγαλύτερης διαθεσιμότητας της ηλιακής ακτινοβολίας. Οι ακόμη μεγαλύτεροι ποταμοί εξαρτώνται από την ανάντη παραχθείσα λεπτή οργανική ύλη, που σε συνδυασμό με το αυξημένο βάθος συντελούν στη θολερότητα του νερού, και δρουν περιοριστικά στην εκμετάλλευση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Ως αποτέλεσμα, το σύστημα χαρακτηρίζεται πάλι ως ετερότροφο $P/R < 1$ (Cummins 1975). Είναι δόκιμη η αναφορά στην διαδοχή ετερότροφο – αυτότροφο - ετερότροφο σύστημα ποταμού στα δεδομένα των ελληνικών ποταμών, ως μικροί – μεσαίοι και μεγάλοι – πολύ μεγάλοι ποταμοί, καθώς η τάξη Strahler θα παραγνώριζε την ιδιομορφία του ελληνικού χώρου. Δηλαδή, ενώ στη Δ. Ελλάδα ένας ποταμός 3ης τάξης κατά κανόνα έχει μόνιμα νερό, στη ΝΑ ένας ποταμός 4ης τάξης σπάνια έχει μόνιμη παρουσία νερού.

Τα ενδαιτήματα του ποταμού που χαρακτηρίζουν αυτή την ακολουθία μεγέθους των ποταμών: μικρού – μεσαίου και μεγάλου – πολύ μεγάλου ποταμού, πέρα από το μέγεθος της λεκάνης απορροής καθορίζονται από γεωλογικούς και κλιματικούς παράγοντες μέσω βραχυπρόθεσμων και μακροπρόθεσμων διαδικασιών (Patt & Städler, 2000) (Σχ. 5). Εκτός του μεγέθους της λεκάνης απορροής, βασικές παράμετροι που επηρεάζουν την μέση ετήσια απορροή είναι: α) η ωφέλιμη βροχόπτωση, που ισούνται με την διαφορά της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης και της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής στην λεκάνη απορροής, και β) το ποσοστό της ωφέλιμης βροχόπτωσης που αντιστοιχεί στην επιφανειακή απορροή και εξαρτάται κυρίως από την γεωλογία. Το ποσοστό αυτό είναι περίπου ίσο με την μονάδα, εκτός εάν υπάρχουν σημαντικές ανεπίστρεπτες διαφυγές προς τον υπόγειο ορίζοντα, όπως συμβαίνει σε ασβεστολιθικούς σχηματισμούς που εκτονώνονται στην θάλασσα.



Σχήμα 5. Κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν τη διαμόρφωση της δομής των ενδαιτημάτων, δηλαδή της φυσιογνωμίας ενός ποταμού (από Patt & Städler, 2000)

Προκειμένου, αφενός να ενοποιηθούν οι παράγοντες του μεγέθους της λεκάνης απορροής και της γεωλογίας, να ενσωματωθούν νέοι παράγοντες ως κριτήρια, και αφετέρου να γίνει δυνατή η σύγκριση ποταμών από περιοχές με τελείως διαφορετικά κλιματικά και γεωλογικά χαρακτηριστικά, προτείνεται η χρήση της ενδεικτικής μέσης ετήσιας απορροής της λεκάνης που προκύπτει από την σχέση:

$$A = \frac{\Lambda \cdot (B - E) \cdot \alpha}{1.000} \quad (3.1)$$

όπου: A η ενδεικτική μέση ετήσια απορροή (hm^3), Λ : το μέγεθος της ανάντη λεκάνης απορροής (km^2), B: η μέση ετήσια βροχόπτωση (mm), E: η μέση ετήσια πραγματική εξατμισοδιαπνοή, α : δείκτης απορροής της λεκάνης απορροής ≤ 1.0 , που είναι το ποσοστό της ωφέλιμης βροχόπτωσης που αντιστοιχεί στην επιφανειακή απορροή.

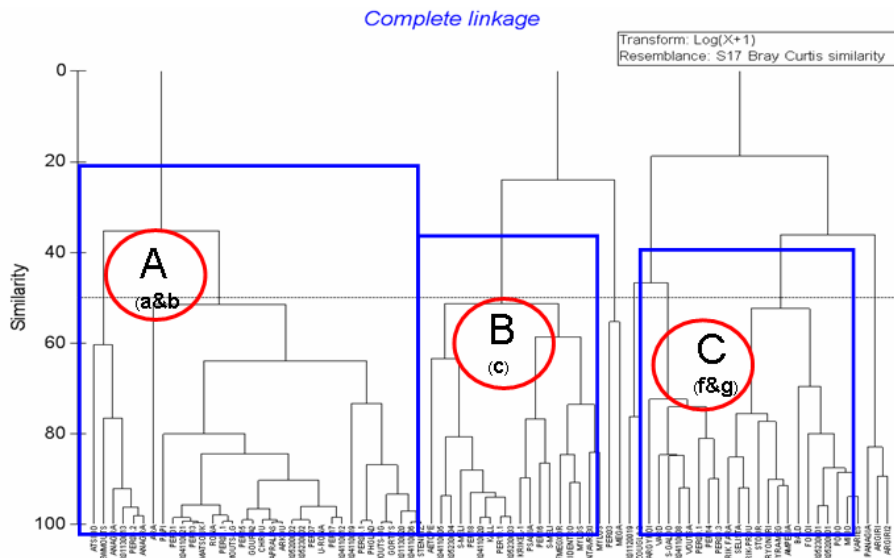
Στην προσπάθεια αναγνώρισης των κλάσεων που μπορούν να προκύψουν από τα μεγέθη των λεκανών απορροής, τόσο στα ψάρια, όσο και στα μακροασπόνδυλα παρατηρείται διακύμανση μεγάλου εύρους στις αντίστοιχες συναθροίσεις ειδών ή λειτουργικών χαρακτηριστικών. Ως αποτέλεσμα της ευρείας αυτής και κλιμακωτής διακύμανσης της βιολογικής σύστασης, αποφασίστηκε να διακριθούν μόνον τρεις κλάσεις ποταμών κατά αντιστοιχία με το RCC, ως προς το μέγεθος της ενδεικτικής μέσης ετήσιας απορροής τους: α) Κατηγορία s (small): $5 < A < 100$, που αντιστοιχεί σε μικρή παροχή, β) Κατηγορία m (medium): $100 \leq A < 2.000$, που αντιστοιχεί σε μέση και μεγάλη παροχή, και γ) Κατηγορία g (great): $2.000 \leq A$, που αντιστοιχεί σε πολύ μεγάλη παροχή.

Τα όρια αυτά προέκυψαν από συσχετισμούς των δοθέντων τυπολογικών ορίων για τη λεκάνη απορροής στο σύστημα A του παραρτήματος II της ΟΠΥ (10, 100, 1.000, 10.000 km^2) με τα παρατηρούμενα χαρακτηριστικά απορροής των ποταμών. Στην προσπάθεια αντιστοίχισης του συντελεστή A με το μέγεθος της λεκάνης απορροής που έγινε, λήφθηκε υπόψη η ιδιομορφία των ποταμών του ελληνικού χώρου με τη μεγάλη εποχιακή διακύμανση και την υψηλή μεταβλητότητα των υδρολογικών συνθηκών, από χρονιά σε χρονιά, εντός των τριών βιοπεριφερειών. Οπότε, κρίθηκε ικανή η αντιστοίχιση των 4 κλάσεων του συστήματος A σε 3 κλάσεις, που ανταποκρίνονται κατά προσέγγιση στη θεωρία της συνέχειας των ποταμών (Σχ. 4). Κρίσιμο είναι να τονιστεί πως η κατηγοριοποίηση κατά ενδεικτική απορροή σκοπό έχει να ξεπεράσει τις διαφορές μεταξύ των διαφορετικών Υδατικών Διαμερισμάτων και όχι εντός τους, δηλαδή από λεκάνη σε λεκάνη για καθένα ΥΔ. Αυτό διότι, αναμένονται σημαντικές αλλαγές στα γεωλογικά και κυρίως στα κλιματικά δεδομένα (Σχ. 2) από Δυτική σε Ανατολική και από Βόρεια σε Νότια Ελλάδα. Επομένως, όταν ένας ποταμός με λεκάνη απορροής μεσαίου-μεγάλου μεγέθους, που βρίσκεται στο Υδατικό Διαμέρισμα των Νησιών του Αιγαίου (Σχ. 3, ΥΔ 14), συγκριθεί με όρους ενδεικτικής απορροής με έναν ποταμό της Δ. Ελλάδας ίσης έκτασης σε μέγεθος λεκάνης, θα αντιστοιχεί σε μικρή ενδεικτική απορροή (A). Η κατηγοριοποίηση αυτή προφανώς δεν εξαντλεί την ποικιλότητα που υπάρχει στους ποταμούς της Ελλάδας, προσφέρει όμως μια συμβατική διάκριση με σαφές φυσικό νόημα.

3.4. ΥΨΟΜΕΤΡΟ

Η διεθνής βιβλιογραφία και τα διαθέσιμα ελληνικά στοιχεία από τα βιολογικά δεδομένα συνιστούν ξεκάθαρα ένα όριο μεταξύ της ανώτερης στην γεωγραφική ιεραρχία του ποταμού ζώνης της πέστροφας και όλων των υπόλοιπων κοινοτήτων ψαριών. Δηλαδή, η διακύμανση της κοινότητας των ψαριών παρουσιάζει μεγάλο εύρος από ποταμό σε ποταμό σε ότι αφορά τα υπόλοιπα ψάρια, πλην της πέστροφας. Πιο συγκεκριμένα, από ομαδοποίηση των καλύτερων από τα 203 δείγματα της περιόδου 2004-2006, από τις 164 θέσεις δειγματοληψίας για την κατασκευή βιολογικού δείκτη βάσει της ιχθυοκοινότητας στους ποταμούς της Δ. Ελλάδας (Οικονόμου κ.α., 2007) προέκυψαν 8 βιοτικές ομάδες (Σχ. 6).

Από τις 8 βιοτικές ομάδες των ψαριών οι e και h ήταν σπάνια εμφανιζόμενες στα δείγματα και θεωρήθηκαν ως μη αντιπροσωπευτικές, οπότε και παραλείφθηκαν στην ανάλυση που ακολούθησε. Οι υπόλοιπες ομάδες ενοποιήθηκαν σε 3 κλάσεις: A, B και C (Σχ. 6). Η κλάση A κυριαρχείται από την πέστροφα, η B από πέστροφα και μπριάννα και η C είναι η βιοτική κλάση των μεικτών κυπρινοειδών.



Σχήμα 6. Ιεραρχική ομαδοποίηση ομοιότητας κατά το κριτήριο Bary-Curtis σε δεδομένα σύστασης ιχθυοπανίδας στα δείγματα από τις καλύτερες (ελάχιστα διαταραγμένες) από το σύνολο των 164 θέσεων στη Δ. Ελλάδα (από Οικονόμου κ.α., 2007)

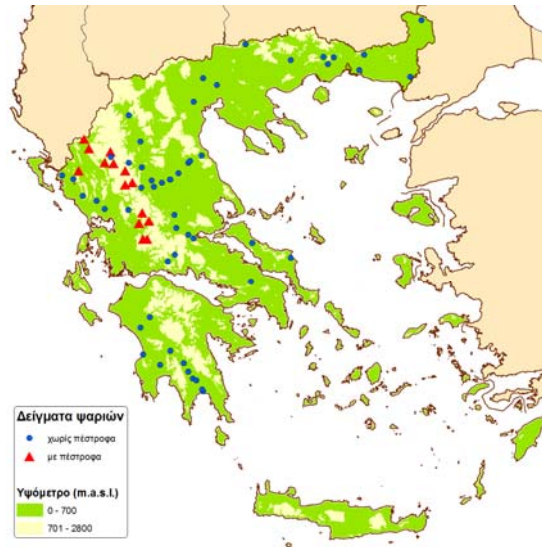
Από την κατανομή των δειγμάτων ψαριών ως προς τις βιοτικές τους κλάσεις A, B και C σε σχέση με τα υψόμετρα των θέσεων, προκύπτει πως το όριο των 700 m προσφέρει την καλύτερη δυνατή λύση καθώς διακρίνει με τον καλύτερο δυνατό τρόπο τις βιοτικές κλάσεις A και C, ενώ τη μεταβατική κλάση πέστροφας-μπριάνας τη διαμοιράζει με τρόπο ίσο ανάμεσα στους δύο τύπους (Πίν. 2). Στο υψόμετρο των 700 m.a.s.l. οι ποταμοί διαχωρίζονται βέλτιστα, δηλαδή με τρόπο που αθροιστικά οι περισσότεροι σταθμοί του τύπου της πέστροφας (A) και των μικτών κυπρινοειδών (C) κατατάσσονται σε διαφορετικούς τύπους. Το όριο που προέκυψε επιβεβαιώθηκε με νέα ανεξάρτητα δεδομένα, που αποτελείται από 67 δείγματα της περιόδου 2009 (Χατζηνικολάου, 2009) από την ηπειρωτική Ελλάδα (Σχ.7).

Πίνακας 2. Έλεγχος βέλτιστης κατανομής των καλύτερων ιχθυολογικών δειγμάτων, χαρακτηρισμένων ως προς την βιοτική ομάδα και κλάση που ανήκουν, σε διαφορετικά υψόμετρα

Υψόμετρο		>900	<900	>800	<800	>700	<700	>600	<600	>500	<500
Βιοτική ομάδα	a	2	3	2	3	4	1	4	1	4	1
	b	15	14	19	9	21	7	23	5	25	3
	c	3	13	3	13	8	8	10	6	13	3
	d	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0
	e	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2
	f	0	8	1	7	2	6	5	3	8	0
	g	0	14	0	14	0	14	1	13	2	12
	h	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2
Βιοτική κλάση	A	17	17	21	12	25	8	27	6	29	4
	B	3	13	3	13	8	8	10	6	13	3
	C	0	22	1	21	2	20	6	16	10	12

3.5. ΚΛΙΣΗ ΚΟΙΤΗΣ

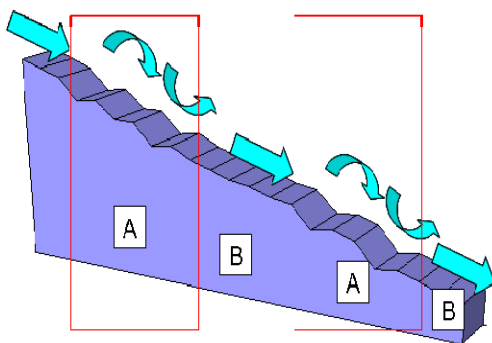
Μια διαφορετική τυπολογική προσέγγιση του Schumm (1977) αφορά στη γεωμορφολογία των ποταμών. Σε αυτή διακρίνονται 3 τύποι ποτάμιων υδρογεωμορφολογικών διαδικασιών: διάβρωσης, μεταφοράς και απόθεσης. Ο παράγοντας που διαφοροποιεί τον γεωμορφολογικό τύπο κατά Schumm είναι η τοπογραφία του ποταμού, και η περιβάλλουσα γεωλογία της λεκάνης.



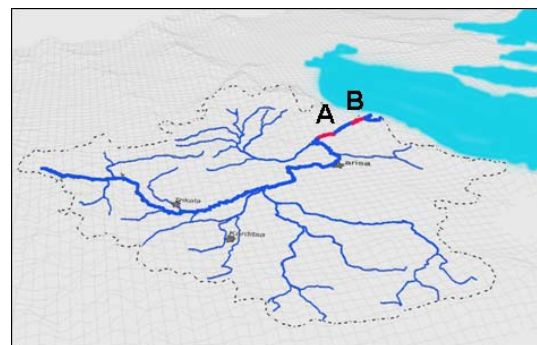
Σχήμα 7. Ύπαρξη πέστροφας στα 67 δείγματα ψαριών από θέσεις δειγματοληψίας

Η κλίση της κοίτης, όμως, επηρεάζει σημαντικά την ποτάμια πανίδα, καθώς ελέγχει την ταχύτητα του νερού (Hynes, 1970) και συνεπώς και σε μεγάλο βαθμό, το υπόστρωμα και την ανάπτυξη μακρόφυτων. Τα ψάρια, όπως και τα βενθικά μακροασπόνδυλα που απαντούν στα ταχύροα τμήματα ποταμών χαρακτηρίζονται ως ρεόφιλα, ενώ στα βραδύροα ως λιμνόφιλα. Η διάκριση της ταχύτητας ενδέχεται να σχετίζεται με την υδρολογική διάκριση της ροής σε γραμμική και μη γραμμική. Η κλίση της κοίτης ποταμού που θα επιτρέψει την ίση αντιπροσώπευση των ρεόφιλων έναντι της αποκλειστικής κυριαρχίας των λιμνόφιλων ειδών, θα επιτρέψει τον σχηματισμό της γεωμορφολογικής ακολουθίας ρηχών υφάλων (rifles)– μικρολιμνών (rools) (Dunne & Leopold, 1978) σε αυξημένη συχνότητα (Σχ. 8).

Για να προσδιοριστεί το όριο της κλίσης που θα διακρίνει τις δύο κλάσεις (γρήγορης και αργής ροής) ποταμών αρκεί να προσδιοριστεί το μικρότερο δυνατό κατώφλι τιμών κλίσης, πέραν του οποίου παρατηρείται αυτή η διάκριση. Από στοιχεία καταγραφής των ποτάμιων ενδιαιτημάτων με τη μέθοδο River Habitat Survey (RHS) (Raven et al., 1997 και UK Environmental Agency, 1997) σε 402 συνεχόμενες θέσεις στο πεδινό-ημιπεδινό τμήμα του Πηνειού Θεσσαλίας (Χατζηνικολάου 2008), δηλαδή από τις εκβολές ως την Καλαμπάκα, προέκυψε πως στο πεδινό του τμήμα τέτοιες «κυρτώσεις» της κοίτης παρατηρούνται σε τουλάχιστον 2 τμήματα: στα στενά των Τεμπών και στα στενά της Ροδιάς (Σχ. 9).



Σχήμα 8. Προσομοίωση ροής ποταμού με ακολουθίες ρηχών υφάλων– μικρολιμνών (A) και ήρεμων τμημάτων (B).



Σχήμα 9. Τα τμήματα του πεδινού Πηνειού όπου εμφανίζονται οι συχνότερες ακολουθίες ρηχών υφάλων – μικρολιμνών. Τα στενά της Ροδιάς (A) και τα στενά των Τεμπών (B).

Με χρήση χαρτών της ΓΥΣ 1:50.000 προσδιορίστηκε η κλίση στα διαφορετικά τμήματα του Πηνειού. Τα τελευταία προς το κατάντη ταχύροα τμήματά του (στενά Τεμπών και Ροδιάς) εμφανίζονται σε κλίση της κοίτης μεγαλύτερη από 1,2 ‰. Το όριο επιβεβαιώθηκε με τις συναθροίσεις των βενθικών μακροασπονδύλων που συλλέχθηκαν από τον Πηνειό σε 80 θέσεις, το 2002 (Χατζηνικολάου, 2007). Δηλαδή, ρεόφιλα μακροασπόνδυλα βρέθηκαν σε σημαντικά μεγαλύτερη συχνότητα στις θέσεις με κλίση μεγαλύτερη από 1,2 ‰, ενώ στις υπόλοιπες θέσεις κυριαρχούσαν τα λιμνόφιλα.

4 ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΥΠΟΛΟΓΙΑΣ

4.1. ΔΥΝΗΤΙΚΟΙ ΤΥΠΟΙ

Από τα τέσσερα κριτήρια και τις κλάσεις τους: 3 κλάσεις για την βιοπεριφέρεια, 3 κλάσεις για την θεωρητική ενδεικτική παροχή, 2 κλάσεις για το υψόμετρο και 2 για την κλίση, προκύπτουν 36 δυναμικοί τύποι ποταμών (Πίν. 3).

Πίνακας 3. Δυναμικοί τύποι ποταμών με βάση το προτεινόμενο σύστημα τυπολογίας

a/a	Τύπος	a/a	Τύπος	a/a	Τύπος	a/a	Τύπος	a/a	Τύπος	a/a	Τύπος
1.	IsH1	7.	ImL1	13.	SsH1	19.	SmL1	25.	NsH1	31.	NmL1
2.	IsH0	8.	ImL0	14.	SsH0	20.	SmL0	26.	NsH0	32.	NmL0
3.	IsL1	9.	IgH1	15.	SsL1	21.	SgH1	27.	NsL1	33.	NgH1
4.	IsL0	10.	IgH0	16.	SsL0	22.	SgH0	28.	NsL0	34.	NgH0
5.	ImH1	11.	IgL1	17.	SmH1	23.	SgL1	29.	NmH1	35.	NgL1
6.	ImH0	12.	IgL0	18.	SmH0	24.	SgL0	30.	NmH0	36.	NgL0

Σε κάθε τύπο ο πρώτος από τους τέσσερις χαρακτήρες αντιπροσωπεύει την βιοπεριφέρεια (I: Ιόνιο, S: Νότια Ελλάδα, N: Βόρειος Ελλάδα). Ο δεύτερος χαρακτήρας εκφράζει το μέγεθος του ποταμού, την μέση ετήσια απορροή του, (s: μικρή, m: μεσαία/μεγάλη, g: πολύ μεγάλη). Ο τρίτος χαρακτήρας προσβέει το υψόμετρο του τύπου (L: χαμηλό/μεσαίο υψόμετρο, H: μεγάλο υψόμετρο). Ο τέταρτος χαρακτήρας συμβολίζει την κλίση της κοίτης (1: ικανή κλίση/ταχύροα τμήματα, 0: με ικανή κλίση/αργής ροής τμήματα).

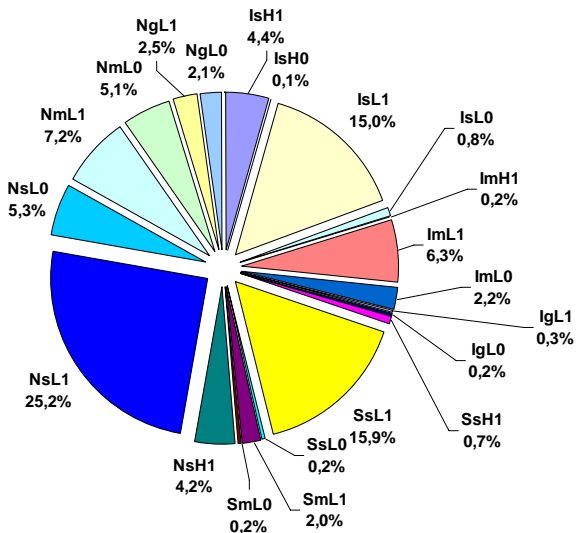
4.2 ΑΝΤΙΠΡΟΣΩΠΕΥΤΙΚΟΙ ΤΥΠΟΙ

Για την ανάγκη του ελέγχου της αντιπροσωπευτικότητας στην Ελλάδα των τύπων ποταμών που προέκυψαν ορίστηκε ένα ελάχιστο τμήμα μήκους των ποταμών ως βασική μονάδα. Η βασική μονάδα έχει σκοπό να καταστεί δυνατός ο χαρακτηρισμός όλων των τμημάτων (βασικών μονάδων) των ποταμών που αναφέρθηκαν από την Ελλάδα ως Υδάτινα Σώματα (ΥΣ) ποταμών στην Ε.Ε. (Κεντρική Υπηρεσία Υδάτων, 2008). Κατά αυτό τον τρόπο και ξεκινώντας από τον φυσικό αποδέκτη των ποταμών, όλα τα ΥΣ τμήθηκαν σε βασικές μονάδες μήκους 2,5 km και χαρακτηρίστηκαν ως προς τα 4 τυπολογικά κριτήρια.

Με τα τυπολογικά κριτήρια χαρακτηρίστηκαν 12.570 km ποταμών. Από τους 36 δυναμικούς τύπους στην Ελλάδα αντιπροσωπεύονται μόνο οι 21 (Σχ. 10). Από τους τύπους ποταμών που προέκυψαν, η πλειοψηφία των ποταμών της Ελλάδας αποτελείται από μικρής θεωρητικής απορροής, ταχύρους ποταμούς χαμηλού υψομέτρου (NsL1, SsL1, IsL1). Ενώ, οι 8 τύποι ποταμών που απαντώνται σπάνια (<1%) είναι οι: IsH0, IsL0, ImH1, IgL1, IgL0, SsH1, SsL0, SmL0.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η προτεινόμενη τυπολογία περιλαμβάνει 21 τύπους για το χαρακτηρισμό των ποταμών της Ελλάδας. Ως προς το μήκος, οι ποταμοί δεν μοιράζονται ισομερώς στους τύπους αυτούς, αλλά κυριαρχούν οι πεδινοί ταχύροοι μικροί ποταμοί. Η τυπολογία αυτή είναι συμβατή με τις απαιτήσεις της Οδηγίας 2000/60/ΕΚ, καθώς ακολουθεί το σύστημα Β.



I = Ιόνιος Βιοπεριφέρεια,
 N = Βορείου Αιγαίου Βιοπεριφέρεια
 S = Νοτίου Αιγαίου Βιοπεριφέρεια
 g = πολύ μεγάλοι ποταμοί
 m = μέτριοι-μεγάλοι ποταμοί
 s = μικροί ποταμοί
 H = ποταμοί άνω των 700 m.a.s.l.
 L = ποταμοί κάτω των 700 m.a.s.l.,
 1 = ποταμοί με κλίση κοίτης > 1,2 ‰
 0 = ποταμοί με κλίση κοίτης < 1,2 ‰

Σχήμα 10. Κατανομή των ποτάμιων ΥΣ της Ελλάδας στο τυπολογικό σύστημα των τεσσάρων κριτηρίων.

Ως κριτήρια έχουν ενσωματωθεί αυτούσια ή ενοποιημένα: το υψόμετρο, το μέγεθος της λεκάνης απορροής, η γεωλογία, οι βιοπεριφέρειες (συντεταγμένες), η κλίση της κοίτης, η βροχοπτώση, η εξατμισοδιαπνοή. Ο αριθμός των τύπων θα ήταν πολύ μεγαλύτερος αν αντί του κριτηρίου ενδεικτική μέση ετήσια απορροή χρησιμοποιούνταν ως ανεξάρτητα κριτήρια οι επιμέρους (υποχρεωτικοί και προαιρετικοί) παράγοντες που το αποτελούν. Η επιλογή των ορίων που διακρίνουν τις κλάσεις των κριτηρίων έγινε με βάση σύγχρονες οικολογικές προσεγγίσεις, και προσαρμογή υδραυλικών εννοιών στα αποτελέσματα της επισκόπησης βιολογικών δεδομένων από τους ποταμούς της Ελλάδας.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς ευχαριστούν την Ειδική Γραμματεία Υδάτων για την παροχή στοιχείων και εκθέσεων, τις κοινοπραξίες των αναδόχων των έργων εκπόνησης Σχεδίων Διαχείρισης Λεκανών Απορροής των ΥΔ Θεσσαλίας, Ηπείρου και Δυτ. Στερεάς Ελλάδας, των ΥΔ Πελοποννήσου, των ΥΔ Αττικής και Ανατ. Στερεάς Ελλάδας και των ΥΔ Ανατ. Μακεδονίας και Θράκης, για τη συνεισφορά τους στον τυπολογικό χαρακτηρισμό των ποτάμιων ΥΣ των περιοχών τους, και το ΕΛΚΕΘΕ για τη διάθεση των βιολογικών δεδομένων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Βολιώτη, Κ.Γ., 2009. *Ζωνοποίηση της επικινδυνότητας λόγω κατολισθήσεων στο χώρο της ηπειρωτικής Ελλάδας με χρήση συστημάτων γεωγραφικών πληροφοριών Απεικόνιση σε χάρτη μικρής κλίμακας*. Διπλωματική εργασία. Τομέας Έργων Υποδομής & Αγροτικής Ανάπτυξης, ΕΜΠ.
- Κεμιτζόγλου, Δ., 2006. *Καθορισμός των τύπων ποτάμιων συστημάτων της Βόρειας και Κεντρικής Ελλάδας*. Μεταπτυχιακή Διπλωματική εργασία. Τμήμα Βιολογίας, ΑΠΘ.
- Κεντρική Υπηρεσία Υδάτων, Υπουργείο Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων, 2008. Εφαρμογή Άρθρου 5 Οδηγίας-Πλαίσιο 2000/60/ΕΕ. ΥΔ 01-14.
- Οικονόμου, Α.Ν., Ζόγκαρης, Σ., Χατζηνικολάου, Γ., Τάχος, Β.Α., Γιακουμή, Σ., Κομματάς, Δ., Κούτσικος, Ν., Βαρδάκας, Λ., Blasel, K. & Dussling, U., 2007. *Δημιουργία Ιχθυολογικού Πολυπαραμετρικού Δείκτη για την Εκτίμηση της Οικολογικής Κατάστασης Ορεινών Ρεμάτων και Ποταμών*. Ελληνικό Κέντρο Θαλασσιών Ερευνών – Ινστιτούτο

- Εσωτερικών Υδάτων*. Υπουργείο Ανάπτυξης, Δ/ση Υδατικού Δυναμικού & Φυσικών Πόρων.
- Χατζηνικολάου, Γ., 2008. *Επίδραση διαχειριστικών πρακτικών στην ποιότητα νερού και στην οικολογία των ποταμών της Ελλάδας. Ο Πηνειός (Θεσσαλίας) ως ειδική περίπτωση μελέτης*. Διδακτορική διατριβή. Τμήμα Βιολογίας, ΑΠΘ.
- Χατζηνικολάου, Γ., 2009. *Επικαιροποιημένα δεδομένα σταθμών παρακολούθησης ποταμών (επιλογή σταθμών)*. Ελληνικό Κέντρο Θαλασσίων Ερευνών και Ελληνικό Κέντρο Βιοτόπων – Υγροτόπων. Ανάβυσσος και Θέρμη.
- Χατζηνικολάου, Γ. & Οικονόμου, Α.Ν., 2010. Η κατάσταση των ποταμών της Ελλάδας. *Η Φύση* 127: 21-25
- Bailey, K.D., 1994. *Typologies and Taxonomies. An introduction to Classification Techniques*. Sage, Thousand Oaks, CA.
- Buffagni, A., Erba, S., Birk, S., Cazzola, M., Feld, C., Ofenbock, T., Murray-Bligh, J., Furse, M.T., Clarke, R., Herring, D., Soszka, H. & Van de Bund, W., 2005. *Towards European Inter-Calibration for the Water Framework Directive: Procedures and Examples for Different River Types from the E.C. Project STAR*. Istituto di Ricerca Sulle Acque, Rome.
- Chatzinikolaou, Y., Dakos, V. & Lazaridou, M., 2006. *Longitudinal impacts of anthropogenic pressures on benthic macroinvertebrate assemblages in a large transboundary Mediterranean river during the low flow period*. *Acta hydrochim. hydrobiol.* 34 (5): 453-463.
- Chatzinikolaou, Y., Dakos, V. & Lazaridou, M., 2008. *Assessing the Ecological Integrity of a Major Transboundary Mediterranean River Based on Environmental Habitat Variables and Benthic Macroinvertebrates (Aos-Vjose River, Greece-Albania)*. *International Review of Hydrobiology* 93 (1): 73–87.
- Chaves, M. L., Costa, J.L., Chainho, P., Costa, M.J. & Prat, N., 2006. *Selection and validation of reference sites in small river basins*. *Hydrobiologia* 573: 133–154.
- Cummins, K.W., 1975. *The ecology of running waters; theory and practice*. In *Proceedings of the Sandusky River Basin Symposium, International Joint Commission, Great Lakes Pollution: 277–293*. Environmental Protection Agency, Washington D. C..
- Dunne, T. & Leopold, L.B., 1978. *Water in Environmental Planning*, 2nd edn. W.H. Freeman, San Francisco.
- Economou, A.N., Giakoumi, S., Vardakas, L., Barbieri, R., Stoumboudi, M. & Zogaris, S., 2007a. *The freshwater ichthyofauna of Greece: an update based on a hydrographic basin survey*. *Mediterranean Marine Science* 8(1):91–168
- European Commission, 2003. *Common Implementation Strategy for the Water Framework Directive (2000/60/EC). Guidance Document No 10. Rivers and lakes-typology, reference conditions and classification systems*. Produced by Working Group 2.3—REFCOND. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.
- Hynes, H.B.N., 1970. *The Ecology of Running Waters. Better Biological Monitoring*. Island Press, USA.
- Illies, J., 1967/1978. *Limnofauna Europaea*. Gustav Fisher Verlag, Stuttgart.
- Koutsikos, N., Zogaris, S., Vardakas, L., Tachos, V., Kalogianni, E., Šanda, R., Chatzinikolaou, Y., Giakoumi, S., Economidis, P.S. & Economou, A.N., 2012. *Recent distributional contributions to the freshwater ichthyofauna of Greece*. *The Mediterranean Marine Science Journal* 13 (2): (in press) .
- Naiman, R.J., Lonzarich, D.G., Beechie, T.J. & Ralph, S.C., 1992. *General principles of classification and the assessment of conservation potential in rivers*. In: P.J. Boon, P. Calow and G.E. Petts (Editors), *River Conservation and Management*. Wiley, Chichester.

- Patt, H. & Städtler, E., 2000. *Eigen dynamische entwicklung einer gewässerstrecke*. Wasser & Boden 52: 44-49.
- Raven, P.J., Fox, P., Everard, M., Holmes, N.T.H. & Dawson, F.H., 1997. *River habitat survey: a new system for classifying rivers according to their habitat quality*. – In: Boon, P.J. & Howell, D.L. (eds), *Freshwater Quality: Defining the Indefinable?* The Stationery Office, Edinburgh. pp. 215–234.
- Reyol, Y., Hugueny, B., Pont, D., Bianco, P.G., Beier, U., Caiola, N., Casals, F., Cowx, I., Economou, A., Ferreira, T., Haidvogel, G., Noble, R., De Sostoa, A., Vigneron, T. & Virbickas, T., 2007. *Patterns in species richness and endemism of European freshwater fish*. *Global Ecology and Biogeography* 16: 65–75.
- Schumm, S.A., 1977. *The Fluvial System*. Wiley, New York.
- Skoulikidis, N.Th., Amaxidis, Y., Bertahas, I., Laschou, S. & Gritzalis, K., 2006. *Analysis of factors driving stream water composition and synthesis of management tools—A case study on small/medium Greek catchments*. *Science of the Total Environment* 362: 205–241
- UK Environment Agency, 1997. *River Habitat Survey, 1997 Field Survey Guidance Manual*. Environment Agency. Bristol.
- Vannote, R.L., Minshall, G.W., Cummins, K.W., Sedell, J.R. & Cushing, E., 1980. *The river continuum concept*. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 37: 130 -137.
- Williams, C.B., 1964. *Patterns in the balance of nature*. Academic Press, London.
- Zogaris, S., Economou, A.N. & Dimopoulos P., 2009. *Ecoregions in the Southern Balkans: Should their boundaries be revised?* *Environmental Management* 43:682–697.

**ΚΡΙΣΙΜΑ ΘΕΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΗΣ ΟΔΗΓΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ
ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ**
**Π. Παναγόπουλος¹, Π. Παντελόπουλος², Μ. Γκίνη², Αν. Βαρβέρης¹,
Αικ. Τριανταφύλλου¹, Σπ. Τασόγλου², Θ. Πλιάκας², Π. Βλάχος¹,
Γ. Χατζηνικολάου³**

¹ ECOS Μελετητική Α.Ε., Μακεδόνων 10, Αθήνα, Τ.Κ. 11521

² Ειδική Γραμματεία Υδάτων, Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής, Κηφισίας 124 & Ιατρίδου 2, Αθήνα, Τ.Κ. 11526

³ Ινστιτούτο Θαλάσσιων Βιολογικών Πόρων και Εσωτερικών Υδάτων, Ελληνικό Κέντρο Θαλασσιών Ερευνών, Τ.Θ. 712, Ανάβυσσος, Τ.Κ. 19013

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Για την εφαρμογή της Οδηγίας 2000/60 ΕΚ στην Ελλάδα ανατέθηκαν (μέχρι την προετοιμασία της παρούσας) πέντε συμβάσεις μελετών για την κατάρτιση των Σχεδίων Διαχείρισης Λεκανών Απορροής για 12 εκ των 14 Υδατικών Διαμερισμάτων της χώρας. Για την εξασφάλιση αφενός της συμβατότητας με την Οδηγία και τα σχετικά Κατευθυντήρια Κείμενα και αφετέρου την επίτευξη ενός ενιαίου γενικού πλαισίου προσέγγισης στις διάφορες συμβάσεις, κρίθηκε αναγκαία η εξειδίκευση ορισμένων κρίσιμων θεμάτων, λαμβάνοντας υπόψη τις συνθήκες του Ελληνικού φυσικού περιβάλλοντος και την εμπειρία από την εφαρμογή της Οδηγίας σε άλλα Κράτη Μέλη. Τα κρίσιμα θέματα που πραγματεύεται η παρούσα εισήγηση αφορούν στον καθορισμό των επιφανειακών και υπογείων υδατικών σωμάτων, στην ταξινόμηση της κατάστασής τους, στην αξιολόγηση του κόστους του νερού και στον τρόπο διεξαγωγής της διαβούλευσης. Τέλος, εξετάζονται τα επόμενα βήματα για την εφαρμογή των Σχεδίων Διαχείρισης στην χώρα και την αξιοποίηση της εμπειρίας από την κατάρτισή τους για την αναθεώρησή τους στο μέλλον.

**CRITICAL ISSUES OF IMPLEMENTATION OF DIRECTIVE FOR
THE INTEGRATED WATER RESOURCES MANAGEMENT IN
GREECE**

**P. Panagopoulos¹, P. Pantelopoulos², M. Gini², A. Varveris¹,
C. Triantafyllou¹, S. Tasoglou², Th. Pliakas², P. Vlachos¹, G. Hatzinicolaou³**

ABSTRACT

For the implementation of Directive 2000/60/EC in Greece five contracts have been awarded (up to the time of preparation of this paper) for the preparation of River Basin Management Plans for 12 out of the 14 River Basin Districts of the country. In order to ensure the compliance with the Directive and the relevant Guidance Documents on the one hand and ensure a common approach in the various contracts, it was necessary to address certain critical aspects, taking into account the conditions of the Greek natural environment as well as the experience from the implementation of the Directive in other Member States. The critical aspects discussed in this paper concern the identification of surface and groundwater bodies, the classification of their status, the assessment of the cost of water and the setup of the public consultation. Finally, the future steps are discussed for the implementation of the Management Plans in the country and consolidating the experience gained from their preparation in view of their future revision.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η Οδηγία 2000/60/ΕΚ δίνει τις βασικές κατευθύνσεις για την ολοκληρωμένη διαχείριση των υδατικών πόρων, ενώ μια σειρά από Κατευθυντήρια Κείμενα και θυγατρικές Οδηγίες εξειδικεύουν τα διάφορα επιμέρους θέματα.

Βασικός στόχος της Οδηγίας είναι η διατήρηση και βελτίωση της ποιότητας των επιφανειακών νερών και υπογείων νερών στην Ευρώπη μέχρι το 2015, σε βαθμό μάλιστα που να προσεγγίζει την φυσική τους κατάσταση, με προβλέψεις για παρατάσεις και εξαιρέσεις υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις.

Η Οδηγία διακρίνει τα επιφανειακά υδατικά συστήματα σε φυσικά, ιδιαιτέρως τροποποιημένα και σε τεχνητά. Ως *ιδιαιτέρως τροποποιημένα* θεωρούνται εκείνα τα υδάτινα σώματα των οποίων ο χαρακτήρας έχει αλλάξει από μορφολογικές ή/και υδρολογικές παρεμβάσεις, ενώ ως *τεχνητά* τα υδάτινα σώματα που έχουν δημιουργηθεί σε περιοχές που δεν υπήρχε νερό. Οι αλλαγές αυτές πρέπει να είναι σημαντικές από πλευράς επιπτώσεων, μόνιμες και απαραίτητες, με την έννοια ότι ο σκοπός τους δεν μπορεί να επιτευχθεί κατ' άλλο περιβαλλοντικά καλύτερο τρόπο από τεχνικής πλευράς ή με λογικό κόστος.

Συγκεκριμένα, η Οδηγία στοχεύει κατ' αρχήν στην επίτευξη *καλής χημικής κατάστασης* για όλα τα (επιφανειακά και υπόγεια) υδάτινα σώματα, που επιτυγχάνεται όταν οι συγκεντρώσεις των ρύπων δεν υπερβαίνουν τα πρότυπα περιβαλλοντικής ποιότητας τα οποία ορίζονται στην Οδηγία καθώς και σε άλλα κοινοτικά νομοθετήματα που θεσπίζουν ποιοτικά περιβαλλοντικά πρότυπα (EQS) όπως η Οδηγία 2008/105/ΕΚ. Επίσης, προβλέπει για όλα τα υδάτινα συστήματα στην αποφυγή περαιτέρω υποβάθμισης, ανεξάρτητα της υφιστάμενης κατάστασής τους.

Για τα φυσικά επιφανειακά υδάτινα σώματα η Οδηγία στοχεύει επιπλέον στην επίτευξη *καλής οικολογικής κατάστασης* που ορίζεται ως η κατάσταση με μικρές αποκλίσεις από την φυσική. Για τα ιδιαιτέρως τροποποιημένα και τα τεχνητά υδάτινα σώματα η Οδηγία στοχεύει αντ' αυτής στην επίτευξη του *καλού οικολογικού δυναμικού* που ορίζεται ως αυτό που παρουσιάζει μικρή απόκλιση από την καλή οικολογική κατάσταση ενός παραπλήσιου φυσικού σώματος, λαμβανομένων υπόψη των τροποποιήσεων.

Για τα υπόγεια υδατικά συστήματα η Οδηγία προβλέπει την επίτευξη επιπλέον της *καλής ποσοτικής κατάστασης*, που συνίσταται στην απόληψη ποσότητας νερού συμβατής με τις μέσες ανανεούμενες ποσότητες. Έτσι, δεν προβλέπεται για τα υπόγεια νερά επαναφορά κοντά στις αρχικές «αδιατάρακτες» συνθήκες.

Μέσα στο παραπάνω πλαίσιο στοχεύεται η χρηστή διαχείριση των υδατικών πόρων, βάσει της αρχής ο ρυπαίνων πληρώνει, και ο περιορισμός της σπατάλης του νερού μέσω τιμολογιακής πολιτικής για την (μερική ή ολική) ανάκτηση του πραγματικού κόστους του νερού από όλες τις χρήσεις (κυρίως ύδρευση, άρδευση και βιομηχανία).

Αξιοσημείωτο πάντως είναι ότι η Οδηγία, πέραν του κατά τα ανωτέρω καθορισμού των βασικών στόχων, προδιαγράφει και τον τρόπο με τον οποίο θα επιτευχθούν, που περιλαμβάνει την σύνταξη και περιοδική επικαιροποίηση ολοκληρωμένων Σχεδίων Διαχείρισης, σε συνεργασία με τους κοινωνικούς εταίρους μέσω μιας συναινετικής διαδικασίας διαβούλευσης. Τα κύρια στάδια σύνταξης των Σχεδίων Διαχείρισης είναι:

- ο καθορισμός των επιφανειακών και υπογείων υδατικών συστημάτων
- η αξιολόγηση των πιέσεων καθώς και των σχετικών επιπτώσεων, για τον προσδιορισμό των υδάτινων σωμάτων που είναι πιθανό να μην πετύχουν τους στόχους της Οδηγίας λόγω των εφαρμοζόμενων σε αυτά πιέσεων
- η ταξινόμηση της κατάστασής τους
- ο προσδιορισμός του κόστους νερού και του βαθμού ανάκτησής του
- ο καθορισμός των περιβαλλοντικών στόχων και εξαιρέσεων για κάθε επιφανειακό και υπόγειο υδάτινο σώματα για την τρέχουσα διαχειριστική περίοδο, και
- η διαμόρφωση διορθωτικών μέτρων για την επίτευξη των στόχων αυτών.

Για την ανάπτυξη των εργαλείων διαχείρισης ανατέθηκαν από το ΥΠ.ΑΝ. το 2003 4 μελέτες που κάλυψαν όλα τα υδατικά διαμερίσματα της χώρας, ολοκληρώθηκαν το 2008 και εστιάστηκαν κυρίως στην ποσοτική διαχείριση των υδατικών πόρων. Επίσης, το 2005 υπεβλήθησαν στην Ευρωπαϊκή Κοινότητα τα βασικά στοιχεία που αφορούν στα χαρακτηριστικά των υδατικών διαμερισμάτων της χώρας και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από ανθρώπινες δραστηριότητες. Για την κατάρτιση των Σχεδίων Διαχείρισης λεκανών απορροής ανατέθηκαν την τελευταία διετία από την Ειδική Γραμματεία Υδάτων (ΕΓΥ) πέντε επί μέρους συμβάσεις μελετών και μια σύμβαση τεχνικού συμβούλου υποστήριξης της. Για την εξασφάλιση:

- της συμβατότητας με την Οδηγία και τα Κατευθυντήρια Κείμενα, και
 - ενός ενιαίου γενικού πλαισίου προσέγγισης των επιμέρους θεμάτων
- κρίθηκε αναγκαία η περαιτέρω εξειδίκευση των κατευθύνσεων της Οδηγίας και των Κατευθυντηρίων Κειμένων από την ΕΓΥ και τον τεχνικό σύμβουλο σε ορισμένα κρίσιμα θέματα μέσα στα παραπάνω πλαίσια, λαμβάνοντας υπόψη τις συνθήκες του Ελληνικού φυσικού περιβάλλοντος και την εμπειρία από την εφαρμογή της Οδηγίας σε άλλες χώρες.

Τα κρίσιμα θέματα που πραγματεύεται η παρούσα εισήγηση είναι:

- ο καθορισμός των επιφανειακών και υπογείων υδατικών συστημάτων
- η ταξινόμηση της κατάστασης των επιφανειακών και υπογείων νερών
- ο προσδιορισμός του κόστους του νερού, και
- ο τρόπος διεξαγωγής της διαβούλευσης.

2. ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

2.1. ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΑ ΥΔΑΤΙΚΑ ΣΩΜΑΤΑ

Ως επιφανειακά υδατικά σώματα νοούνται τα (σχετικά) ομοιογενή τμήματα ποταμών, οι λίμνες, τα μεταβατικά νερά (εκβολές και λιμνοθάλασσες) και τα παράκτια νερά. Οι χείμαρροι (με διαλείπουσα ροή) δεν λαμβάνονται υπόψη, όπως επίσης και τριτεύοντες παραπόταμοι (τάξης μικρότερης της 4ης κατά Strahler).

Ο καθορισμός των επιφανειακών υδατικών σωμάτων εξαρτάται κυρίως από:

- το υδρογραφικό τους δίκτυο
- την τυπολογία τους, δηλαδή τα βασικά τους φυσικά χαρακτηριστικά
- το μέγεθος των πιέσεων, που κυρίως αφορά στον βαθμό ρύπανσής τους, και
- το καθεστώς προστασίας τους, εάν υπάρχει.

Όσον αφορά στην τυπολογία των ποταμών, η Οδηγία παρέχει την δυνατότητα αξιοποίησης ενός τυποποιημένου συστήματος κριτηρίων (Α), που για την Ελλάδα περιλαμβάνει 2 οικοπεριοχές, 4 κλάσεις μεγέθους της λεκάνης απορροής, 3 κλάσεις του υψομέτρου, και 2 κατηγοριοποιήσεις γεωλογίας. Εναλλακτικά παρέχεται από την Οδηγία η δυνατότητα διαμόρφωσης ενός συστήματος (Β) από το κάθε Κράτος Μέλος, με βάση συγκεκριμένες όμως (τουλάχιστον) παραμέτρους.

Για την Ελλάδα κρίθηκε ότι το σύστημα Α δεν αντανακλά τον βασικό χαρακτήρα των υδατικών συστημάτων. Συγκεκριμένα:

- υπάρχουν αιτιολογημένες ενστάσεις για τα όρια των οικοπεριοχών της Οδηγίας
- κρίθηκε ότι η χρήση του κριτηρίου του μεγέθους της λεκάνης απορροής δεν αντανακλά το μέγεθος των ποταμών στην Ελλάδα, δεδομένης της μεγάλης διαφοροποίησης των βροχοπτώσεων μεταξύ δυτικής και ανατολικής Ελλάδας, και
- στα παραπάνω κριτήρια δεν περιλαμβάνεται η κλίση του ποταμού, που επηρεάζει την ορμητικότητα της ροής, η οποία με την σειρά της είναι καθοριστική της αναπτυσσόμενης πανίδας και του χαρακτήρα του τμήματος γενικότερα.

Έτσι αναπτύχθηκε από τον τεχνικό σύμβουλο ένα σύστημα Β κατάλληλο για τις επικρατούσες συνθήκες στην χώρα, το οποίο βασίστηκε σε όρια βιοπεριφερειών με βάση τα αποτελέσματα προηγούμενων ερευνών για την πανίδα των επιφανειακών εσωτερικών υδάτων (Zogaris et al., 2009) και εισήγαγε ως πρόσθετες παραμέτρους:

- την μέση ετήσια απορροή των ποταμών, που είναι αντιπροσωπευτική του μεγέθους τους και ενσωματώνει ορθολογικά την παράμετρο της γεωλογίας, η οποία επηρεάζει τα ποσοστά κατείδυσης στα υπόγεια νερά (Patt & Städler, 2000), και
- την κλίση της κοίτης του ποταμού (Hynes, 1970, Dunne & Leopold, 1978).

Η μέση ετήσια παροχή υπολογίζεται για τις ανάγκες της τυπολογίας κατά τρόπο απλουστευμένο και καλείται «ενδεικτική μέση ετήσια παροχή».

Κατά τα ανωτέρω, τα κριτήρια τυπολογίας που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα εξής:

- 3 βιοπεριφέρειες, που αντιστοιχούν στην βόρεια, δυτική και ανατολική Ελλάδα
- 3 κλάσεις ενδεικτικής μέσης ετήσιας απορροής των ποταμών (μεγάλη, μέτρια και μικρή), με όρια τα 100 hm³/έτος και τα 2.000 hm³/έτος αντίστοιχα,
- 2 κλάσεις υψομέτρου (χαμηλά και υψηλά τμήματα), με όριο τα 700 m, και
- 2 κλάσεις κλίσης της κοίτης (μικρές και μεγάλες), με όριο το 1,2 ‰ με βάση την καταγραφή των ποτάμιων ενδαιτημάτων σε 402 συνεχόμενες θέσεις στο πεδινό-ημιπεδινό τμήμα του Πηνειού Θεσσαλίας (Χατζηνικολάου 2008),.

Επίσης, λαμβάνοντας υπόψη ότι η Οδηγία εστιάζεται στα σημαντικά υδάτινα σώματα, δεν λαμβάνονται υπόψη σώματα με μέση ετήσια απορροή μικρότερη των 5 hm³/έτος, ενώ τα υδάτινα σώματα ορίζονται ώστε να έχουν μήκος τουλάχιστον 2,5 km.

Για τον καθορισμό των λιμναίων υδάτινων σωμάτων εξετάστηκαν σύμφωνα με την Οδηγία οι φυσικές και τεχνητές λίμνες με έκταση πάνω από 0,5 km². Διακρίθηκαν 4 τύποι φυσικών λιμνών και 3 τύποι ταμιευτήρων.

Τα μεταβατικά υδατικά συστήματα διακρίνονται σε 2 τύπους:

- οι περιοχές εκβολής των (κατά τα ανωτέρω) μεγάλων ποταμών, που περιλαμβάνουν τα τελευταία κατάντη υδατικά σώματα και μια περιοχή ακτίνας 500 m από τις εκβολές τους στην θάλασσα, και
- οι κύριες λιμνοθαλάσσεις, με κριτήριο την έκταση και σημασία τους.

Τέλος, ως παράκτια υδάτινα σώματα ορίζονται τα τμήματα θάλασσας που βρίσκονται σε απόσταση μέχρι 1 ναυτικό μίλι από την στεριά (με εξαίρεση τα μεταβατικά κατά τα ανωτέρω) καθώς και οι κλειστοί κόλποι και αυτά θεωρείται ότι ανήκουν όλα σε έναν τύπο.

2.2. ΥΠΟΓΕΙΑ ΥΔΑΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Διακρίνονται εννοιολογικά τα εξής:

- **υδροφορέας** είναι υπόγειο στρώμα με πορώδες και διαπερατότητα τέτοια που να επιτρέπουν είτε σημαντική ροή είτε σημαντική απόληψη νερού, και
- **υπόγειο υδατικό σύστημα** είναι διακριτός όγκος υπόγειων νερών μέσα σε έναν ή περισσότερους υδροφορείς.

Για τον ορισμό των υδροφορέων πρέπει να προσδιοριστούν οι έννοιες «**σημαντικής ροής**» και «**σημαντικής απόληξης**» σύμφωνα με την Οδηγία. Η σημαντικότητα της ροής τεκμαίρεται από την ενδεχόμενη επιρροή των υπόγειων σωμάτων σε επιφανειακά νερά και όχι από το μέγεθος της ροής, εάν δεν επηρεάζονται επιφανειακά νερά. Ως σημαντική απόληψη ορίζεται αυτή που αφορά ύδρευση και είναι πάνω από 10 m³/ημέρα ή εξυπηρετεί πάνω από 50 άτομα. Σημειώνεται σχετικά ότι, από υδρογεωλογικής πλευράς, η κατά τα ανωτέρω απόληψη είναι αμελητέα, έχει όμως προβλεφτεί λόγω της σημασίας της για τον άνθρωπο. Στις σημαντικές απολήψεις κατά τα ανωτέρω κρίθηκε σκόπιμο να προστεθούν οι εκτεταμένες απολήψεις για άρδευση, με ιδιαίτερη αναφορά σε αυτές που βρίσκονται σε

ευάλωτες σε νιτρορρύπανση περιοχές και είναι προστατευόμενες, προκειμένου να είναι δυνατή η λήψη μέτρων.

Ο καθορισμός των υπόγειων υδατικών συστημάτων γίνεται με βάση αφενός τον βασικό τους χαρακτήρα, και αφετέρου το μέγεθος των πιέσεων, που κυρίως αφορά στον βαθμό ρύπανσής τους.

Ο βασικός χαρακτήρας των υπόγειων υδατικών συστημάτων διακρίνεται σε α) καρστικά, β) ρωγμώδη και πορώδη, και γ) λοιπά με υδροφορία τοπικής σημασίας και χαμηλής παραγωγικότητας - που πρέπει να ληφθούν υπόψη εφόσον γίνεται από αυτά σημαντική απόληψη ύδρευσης, ή μπορεί να επηρεάσουν επιφανειακά νερά.

3. ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

3.1. ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΑ ΥΔΑΤΙΝΑ ΣΩΜΑΤΑ

Για τα επιφανειακά υδατικά σώματα απαιτείται σύμφωνα με την Οδηγία:

- ο καθορισμός των τυπο-χαρακτηριστικών συνθηκών αναφοράς, δηλαδή των συνθηκών αναφοράς που αντιστοιχούν περίπου στην φυσική κατάσταση για κάθε τύπο επιφανειακού υδάτινου σώματος, και
- η ταξινόμηση της κατάστασής τους, με βάση τον λόγο της υφιστάμενης κατάστασής του με αυτήν που εκτιμάται ότι αντιστοιχεί στις τυπο-χαρακτηριστικές συνθήκες αναφοράς (Λόγος Οικολογικής Ποιότητας, EQR).

Για τους ποταμούς η αξιολόγηση της κατάστασης γίνεται κατά την Οδηγία με βάση την σύνθεση και αφθονία της χλωρίδας (φυτοπλαγκτόν, βενθικά διάτομα και μακροφύκη), των βενθικών ασπονδύλων και της ιχθυοπανίδας, λαμβάνοντας υπόψη το υδρολογικό καθεστώς, τις μορφολογικές συνθήκες και φυσικοχημικά στοιχεία και ειδικούς ρύπους. Για τα λοιπά είδη επιφανειακών υδατικών συστημάτων η αξιολόγηση γίνεται ανάλογα.

Εκ των παραπάνω, διαθέσιμα δεδομένα για επιφανειακά νερά σε επίπεδο χώρας υπάρχουν για:

- βενθικά ασπόνδυλα για ποτάμια και παράκτια νερά (ΕΛΚΕΘΕ)
- μακροασπόνδυλα για μεταβατικά νερά (ΕΛΚΕΘΕ)
- φυτοπλαγκτόν: συνολικός βιοόγκος & ποσοστό κυανοβακτηρίων για λίμνες (ΕΚΒΥ)
- χλωροφύλλη για λίμνες και παράκτια (ΕΚΒΥ και ΕΛΚΕΘΕ),
- μακροφύκη για μεταβατικά και παράκτια (ΕΛΚΕΘΕ), και
- φυσικοχημικές παραμέτρους (Γενικό Χημείο του Κράτους)

οπότε η ταξινόμηση βασίσθηκε κυρίως σε αυτά, λαμβάνοντας και κατά τόπους πρόσθετα στοιχεία που διατέθηκαν στην ΕΓΥ.

Η αξιολόγηση της οικολογικής κατάστασης των ποταμών γίνεται με τα εξής δύο συστήματα στην Ελλάδα:

- τον δείκτη HES (Hellenic Evaluation System) (Artemiadou & Lazaridou, 2005, όπως συμπληρώθηκε από τους Chatzinikolaou et al., 2006), και
- τον δείκτη ICMi (Buffagni et al., 2005), όπως περιλαμβάνεται στην Απόφαση της Ευρωπαϊκής Επιτροπής 2008/915 για την άσκηση διαβαθμονόμησης των εθνικών δεικτών, για τους τύπους ποταμών (R-M1, R-M2 και R-M4).

Για τον υπολογισμό των τιμών των παραπάνω δεικτών, που εκτιμάται ότι αντιστοιχούν στις τυπο-χαρακτηριστικές συνθήκες αναφοράς, χρησιμοποιούνται δεδομένα από αδιατάρακτους σταθμούς, δηλαδή θέσεις ανάντη των οποίων οι ανθρωπογενείς παρεμβάσεις είναι αμελητέες ή, αν δεν υπάρχουν, κατά κρίση ειδικού επιστήμονα.

Η οικολογική ταξινόμηση γίνεται τελικά:

- για τα ποτάμια σώματα που περιλαμβάνουν σταθμούς που εμπίπτουν στους τύπους RM1, RM2 και RM4 με τον δείκτη των ICMi, για λόγους συγκρισιμότητας με την κατάσταση άλλων υδατινών σωμάτων στην Μεσόγειο, και
- για όλα τα ποτάμια σώματα με το HES, για λόγους συγκρισιμότητας μεταξύ τους.

Για την αξιολόγηση της οικολογικής κατάστασης των λιμνών αποφασίσθηκε για την παρούσα φάση η εφαρμογή στην Ελλάδα των παρακάτω δεικτών:

- το φυτοπλαγκτόν με δείκτες το συνολικό βιοόγκο και το ποσοστό κυανοβακτηρίων,
- η συγκέντρωση χλωροφύλλης-α.

Για την οικολογική αξιολόγηση των παράκτιων, που όπως προαναφέρθηκε θεωρήθηκε ότι ανήκουν όλα σε ένα τύπο, αποφασίσθηκε η εφαρμογή στην Ελλάδα:

- του δείκτη BENTIX (Simboura & Zenetos, 2002)
- της συγκέντρωσης χλωροφύλλης-α, και
- του δείκτη EEI οικολογικής ποιότητας για τα μακροφύκη.

Για την οικολογική αξιολόγηση των μεταβατικών, που όπως προαναφέρθηκε διακρίνονται σε 2 τύπους, αποφασίσθηκε η εφαρμογή στην Ελλάδα:

- του δείκτη κατανομής μεγεθών για τα μακροασπόνδυλα ISD, και
- του δείκτη EEI για τα μακροφύκη ο οποίος είναι ίδιος με τα παράκτια για τις περιοχές εκβολής των ποταμών

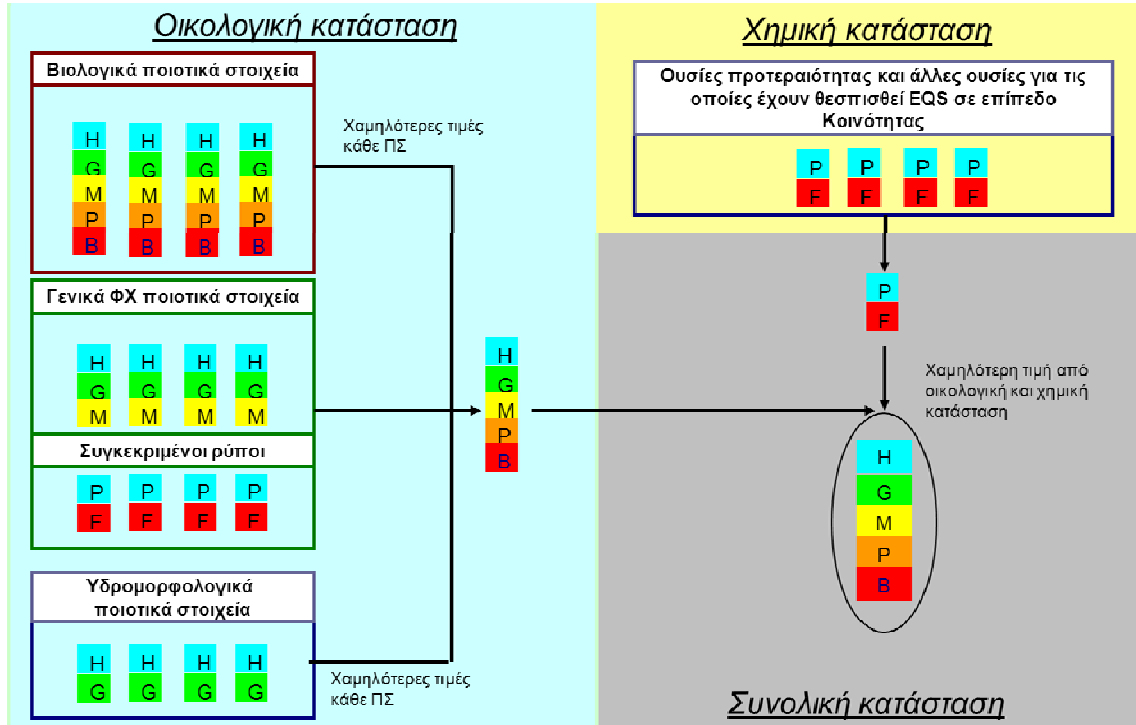
Όπως προαναφέρθηκε για την ταξινόμηση λαμβάνονται επίσης υπόψη, πέραν της κατά τα ανωτέρω αξιολόγησης των βιολογικών ποιοτικών στοιχείων, και φυσικοχημικές παράμετροι όπου υπάρχουν, οι ειδικοί ρύποι [KYA 51354/2641/E103/8.12.2010] και μορφολογικά στοιχεία.

Στον πίνακα που ακολουθεί σημειώνονται με το σύμβολο «**x**» οι φυσικοχημικές παράμετροι οι οποίες θα ληφθούν υπόψη στη διαδικασία ταξινόμησης της οικολογικής κατάστασης των υδατινών σωμάτων στην Ελλάδα. Σημειώνεται ότι στον πίνακα συμπεριλαμβάνεται και η παράμετρος της χλωροφύλλης (για λίμνες, παράκτια και μεταβατικά), η οποία ανήκει στους βιολογικούς δείκτες.

Κατηγορία	Παράμετρος	Παράμετροι που προτείνεται να λαμβάνονται υπόψη στην ταξινόμηση της οικολογικής κατάστασης			
		Ποτάμια	Λίμνες	Παράκτια	Μεταβατικά
Διαφάνεια	Δίσκος Secchi		x	x	
Συνθήκες οξυγόνωσης	Διαλυμένο οξυγόνο	x	x	x	x
Συνθήκες οξυγόνωσης	BOD5	x			
Κατάσταση Οξίνισης	pH	x	x	x	x
Θρεπτικές ουσίες	Ολικός φώσφορος	x	x		
Θρεπτικές ουσίες	αμμωνιακό άζωτο	x	x	x	x
Θρεπτικές ουσίες	νιτρικό άζωτο	x		x	
Θρεπτικές ουσίες	νιτρώδες άζωτο	x	x		
Βιολογική παράμετρος	Χλωροφύλλη-α		x	x	

Με δεδομένο ότι η διαθέσιμη πληροφορία στην Ελλάδα δεν επαρκεί για τον ορισμό τυποχαρακτηριστικών ορίων ταξινόμησης για τις φυσικοχημικές παραμέτρους, προβλέφθηκε να ληφθούν για τις παραμέτρους αυτές ενιαίες τιμές ανά κατηγορία υδατινών σωμάτων και για όλους τους σχετικούς τύπους. Οι σχετικές τιμές καθορίστηκαν από την Ειδική Γραμματεία Υδάτων και παρουσιάζονται στο Παράρτημα.

Η συνολική κατάσταση των υδάτινων σωμάτων για κάθε υδάτινο σώμα προκύπτει από τον συνδυασμό της οικολογικής και χημικής κατάστασης, που γίνεται δια σύγκρισης με τα όρια ποιότητας περιβάλλοντος για τις ουσίες προτεραιότητας, και παρουσιάζεται σε πενταβάθμια κλίμακα σύμφωνα με το ακόλουθο σχήμα



Το Εθνικό Δίκτυο Παρακολούθησης της χώρας, που θεσμοθετήθηκε με την ΚΥΑ 140384/2011, προβλέπει 616 σταθμούς μέτρησης της ποιότητας των επιφανειακών νερών και τις παραμέτρους που θα παρακολουθούνται. Προβλέπεται ελεύθερη διάθεση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων.

3.2. ΥΠΟΓΕΙΑ ΥΔΑΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Ο χαρακτηρισμός των υπόγειων υδατικών συστημάτων γίνεται:

- από πλευράς ποσοτικής, με βάση την στάθμη του υπόγειου ορίζοντα, και
- από χημικής πλευράς, με βάση την αλατότητα και τα κριτήρια της «θυγατρικής» Οδηγίας 2006/118/ΕΚ των υπογείων νερών

Κατά την Οδηγία αυτή, τα κριτήρια για την αξιολόγηση της χημικής κατάστασης είναι:

α) Πρότυπα ποιότητας, που προβλέπονται στο Παράρτημα V και είναι:

Ρύπος	Ποιοτικά πρότυπα
Νιτρικά άλατα	50 mg/l
Δραστικές ουσίες φυτοφαρμάκων (συμπεριλαμβάνονται αντίστοιχοι μεταβολίτες, προϊόντα αποικοδόμησης και αντιδράσεων)	0,1 µg/l 0,5 µg/l (συνολικό)

Σημ. Ως «συνολικό», νοείται το άθροισμα όλων των επιμέρους φυτοφαρμάκων

β) Ανώτερες αποδεκτές τιμές (ΑΑΤ) που ορίζουν τα κράτη-μέλη και οριοθετούν την καλή από την κακή ποιότητα.

Σε εθνικό επίπεδο συστηματικές μετρήσεις έχουν γίνει από το ΙΓΜΕ. Οι παράμετροι που έχουν παρακολουθηθεί για το διάστημα 2000-2008 είναι:

- στάθμη νερού
- φυσικο-χημικές: pH, αγωγιμότητα, νιτρικά (NO₃), χλωριόντα, και θειικά, και
- μέταλλα: Ag, Al, As, B, Ba, Cd, Co, Cr, F, Fe, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Se και Zn

Το Εθνικό Δίκτυο Παρακολούθησης που θεσμοθετήθηκε με την ΚΥΑ 140384/2011 προβλέπει 1.392 θέσεις μετρήσεων, τις παραμέτρους που προβλέπεται να παρακολουθούνται στα υπόγεια νερά. Προβλέπεται ελεύθερη διάθεση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων.

Παράλληλα, με την ΥΑ 1811/2011 ορίστηκαν οι ΑΑΤ σε εθνικό επίπεδο. Κατά την Οδηγία 2006/118/ΕΚ, ο καθορισμός πρόσθετων ή αυστηρότερων ΑΑΤ είναι απαραίτητος για εκείνες τις παραμέτρους για τις οποίες παρατηρούνται ή αναμένονται υπερβάσεις των ορίων ποιότητας που σχετίζονται με τις χρήσεις. Ως χρήση εννοείται τόσο η ανθρώπινη όσο και η περιβαλλοντική, που περιλαμβάνει:

- την αποφυγή επιβάρυνσης των επιφανειακών νερών, σε βαθμό που δεν θα μπορέσουν να επιτύχουν τους περιβαλλοντικούς στόχους, και
- την αποφυγή σημαντικής υποβάθμισης των χερσαίων οικοσυστημάτων που εξαρτώνται άμεσα από τα υπόγεια.

Η αξιολόγηση αυτή πρέπει να λαμβάνει υπόψη τις τάσεις των τελευταίων ετών, εφόσον αυτές μπορεί να διαφανούν από τα διαθέσιμα δεδομένα.

Επίσης, για υπόγεια υδατικά συστήματα στα οποία παρατηρούνται συγκεντρώσεις που είναι μεγαλύτερες των παραπάνω ορίων και οφείλονται τεκμηριωμένα σε αυξημένες φυσικές τιμές υποβάθρου, είναι δυνατός ο καθορισμός ΑΑΤ που αντιστοιχούν στις αυξημένες αυτές φυσικές τιμές υποβάθρου.

Για τον χαρακτηρισμό της ποιότητας των υπογείων υδατικών συστημάτων ουσιαστικά συγκρίνονται οι τιμές των μετρήσεων με τα πρότυπα ποιότητας και τις ΑΑΤ.

4. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΝΕΡΟΥ

4.1. ΓΕΝΙΚΑ

Αντικείμενο των σχεδίων διαχείρισης είναι ο προσδιορισμός του επιπέδου ανάκτησης του (συνολικού) κόστους των υπηρεσιών ύδατος από τις διάφορες χρήσεις.

Ως **χρήσεις νερού** θεωρούνται όλες οι δραστηριότητες που έχουν σημαντική επίπτωση στην κατάσταση των υδάτινων σωμάτων, όπως:

- ύδρευση, συμπεριλαμβανομένου του τουρισμού
- γεωργία, συμπεριλαμβανομένης της κτηνοτροφίας
- βιομηχανία (συχνά είναι συνυφασμένη με την ύδρευση)
- ενέργεια, και
- αναψυχή.

Ως **υπηρεσίες ύδατος** θεωρούνται οι υπηρεσίες παροχής του νερού με έργα (έργα απόληψης, αποθήκευσης, διανομής συλλογής, επεξεργασίας και διάθεση νερού). Κύριοι πάροχοι είναι ΓΟΕΒ/ΤΟΕΒ, ΕΥΔΑΠ, ΕΥΑΘ & ΔΕΥΑ, ΟΤΑ.

Τα στοιχεία που συνθέτουν το συνολικό κόστος των υπηρεσιών νερού είναι:

- το χρηματοοικονομικό κόστος
- το περιβαλλοντικό κόστος, και
- το κόστος πόρου.

4.2. ΧΡΗΜΑΤΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ

Το χρηματοοικονομικό κόστος συντίθεται από το κόστος κεφαλαίου, το κόστος λειτουργίας, και το κόστος συντήρησης.

Το κόστος κεφαλαίου συνίσταται από το κόστος των έργων κεφαλής (έργων συλλογής και μεταφοράς νερού στο δίκτυο διανομής) και τα λοιπά πάγια στοιχεία των υπηρεσιών ύδατος. Το κόστος έργων κεφαλής που αφορούν περισσότερες υπηρεσίες ύδατος ή/και χρήσεις επιμερίζεται σε αυτά ανάλογα με την διατιθέμενη ετήσια ποσότητα.

Το κόστος λειτουργίας αφορά κυρίως σε αμοιβές προσωπικού, υλικά, ενέργεια και λοιπά γενικά έξοδα, ενώ το κόστος συντήρησης αφορά στη συντήρηση των έργων υποδομής, περιλαμβανομένης της αντικατάστασης αντλιών.

Μερικές επισημάνσεις:

- οι ΔΕΥΑ συνήθως αντιμετωπίζουν τις υπηρεσίες ύδρευσης και αποχέτευσης ενιαία, οπότε κατ' ανάγκη είναι ενιαία η αντιμετώπισή τους και στα Σχέδια Διαχείρισης,
- το ειδικό τέλος για την μελέτη και κατασκευή έργων ύδρευσης και αποχέτευσης που είναι 80% και επιβάλλεται στο καταναλισκόμενο νερό [N.1069/2980], αποτελεί αναπόσπαστο μέρος της τιμής που χρεώνεται στον χρήστη και κατά συνέπεια λαμβάνεται υπόψη ως έσοδο
- το ποσοστό ανάκτησης του κόστους, λογαριάζεται από τον λόγο των εσόδων προς τις τιμολογούμενες ποσότητες και όχι προς τις διατιθέμενες στην αρχή του δικτύου, δεδομένου ότι υπάρχουν απώλειες κατά την μεταφορά και διανομή
- στον βαθμό που οι δαπάνες επένδυσης αποτελούν «δωρεάν επιδότηση» από το Κράτος, δεν τίθεται θέμα ανάκτησής τους από τις υπηρεσίες, οπότε η επιδότηση αφαιρείται από την δαπάνη μελέτης και κατασκευής και αποσβέννεται το υπόλοιπο
- στις περιπτώσεις ιδιωτικών αντλήσεων καθώς και των έργων της ΔΕΗ ή των μικρών ΥΕ το χρηματοοικονομικό κόστος θεωρείται ότι ανακτάται από τον ιδιοκτήτη.

Από τις σχετικές αναλύσεις του χρηματοοικονομικού κόστους προκύπτει ότι αυτό διαφέρει από υπηρεσία σε υπηρεσία. Αυτό οφείλεται:

- στον διαφορετικό βαθμό ευκολίας πρόσβασης στο νερό και την ποιότητά του, και
- στις διαφορές στην αποδοτικότητα και αποτελεσματικότητα μεταξύ των υπηρεσιών.

4.3. ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ

Ως περιβαλλοντικό κόστος ορίζεται το κόστος της περιβαλλοντικής ζημιάς λόγω της υποβάθμισης που προκαλείται από μια χρήση (απόληψη νερού ή ρύπανση). Η περιβαλλοντική ζημία συνίσταται:

- στην υποβάθμιση του (επιφανειακού ή υπόγειου) υδατικού πόρου (έναντι της υγιούς του κατάστασης) - ανεξάρτητα από την ανθρώπινη χρήση του, και
- στην οικονομική επίπτωση στους σημερινούς και μελλοντικούς χρήστες του πόρου (π.χ. ύδρευση, αλιεία, άρδευση).

Ζημιά θεωρείται ότι υπάρχει όταν υπάρχει διαφορά μεταξύ:

- της σημερινής κατάστασης, και
- της στοχευόμενης κατάστασης, π.χ. της καλής οικολογικής και χημικής κατάστασης προκειμένου για επιφανειακούς υδατικούς πόρους.

Η αξιόπιστη εκτίμηση του περιβαλλοντικού κόστους είναι δυσχερής. Μπορεί να προσεγγιστεί από την προθυμία της κοινωνίας να πληρώσει για να αποκαταστήσει την περιβαλλοντική ζημιά ή εναλλακτικά από την προθυμία της κοινωνίας να αποδεχτεί αποζημίωση για την περιβαλλοντική ζημιά. Οι μέθοδοι αυτές βασίζονται σε επιτόπια δειγματοληψία απόψεων και ως εκ τούτου δεν θεωρήθηκαν χρονικά εφικτές στα πλαίσια των τρεχουσών συμβάσεων.

Το περιβαλλοντικό κόστος μπορεί επίσης να προσεγγιστεί από το κόστος των μέτρων που θα μπορούσαν να ληφθούν για την προστασία των υδατικών πόρων που περιλαμβάνει κυρίως:

- το κόστος των εγκαταστάσεων επεξεργασίας για τον περιορισμό της ρύπανσης
- το κόστος των μέτρων περιορισμού των απωλειών ή/και μείωσης της κατανάλωσης για τον περιορισμό της απόληξης, και
- το κόστος συστημάτων αποκατάστασης της οικολογικής επικοινωνίας σε φράγματα/ρουφράκτες, για τον περιορισμό των μορφολογικών παρεμβάσεων.

Έτσι, το περιβαλλοντικό κόστος από την διάθεση στραγγισμάτων άρδευσης προσεγγίστηκε από το κόστος κατασκευής και λειτουργίας τεχνητού υγροτόπου απομείωσης θρεπτικών. Το κόστος αυτό έχει εκτιμηθεί σε 1,3 €/στρ/έτος ή 0,003 €/m³ για ένα τέτοιο υγρότοπο στην Κάρλα και προσαρμόζεται ανάλογα για άλλες περιοχές. Για οικολογικές καλλιέργειες το περιβαλλοντικό κόστος θα είναι μηδέν, ενώ για καλλιέργειες που εφαρμόζουν στην πράξη κώδικες ορθής γεωργικής παραγωγής θα είναι μειωμένο π.χ. 30-50%.

Σημειώνεται ότι μέτρα που έχουν ήδη ληφθεί για την προστασία του περιβάλλοντος (π.χ. μια ΕΕΛ που λειτουργεί) ενσωματώνονται στο χρηματοοικονομικό κόστος και κατά συνέπεια δεν περιλαμβάνονται και στο περιβαλλοντικό κόστος.

Παρά την ως άνω (εν δυνάμει) επεξεργασία μπορεί να υπάρχει υπολειμματική ρύπανση, π.χ. από εναπομείναντα θρεπτικά συστατικά ή φυτοφάρμακα που δεν αφαιρούνται από τον τεχνητό υγρότοπο. Σε περίπτωση που απαιτείται απομείωση της υπολειμματικής αυτής ρύπανσης λόγω οικολογικής ευαισθησίας του υδάτινου συστήματος ή ευαίσθητων κατόντη χρήσεων π.χ. στην περίπτωση που απαιτείται επεξεργασία νερού λόγω χρήσης του για ύδρευση κατόντη, προστίθεται στο περιβαλλοντικό κόστος της ανάντη πηγής ρύπανσης το κόστος κατασκευής και λειτουργίας της σχετικής κατόντη εγκατάστασης επεξεργασίας του νερού.

Το περιβαλλοντικό κόστος από τον περιορισμό της παροχής π.χ. στο τμήμα ποταμού κατόντη ενός φράγματος σχετίζεται με:

- το μέγεθος της φυσικοποιημένης παροχής
- τον βαθμό απομείωσης της παροχής έναντι της φυσικοποιημένης, και
- την φυσική αξία του κατόντη διαταραχθέντος οικοσυστήματος.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι, στο πλαίσιο των προτεινόμενων μέτρων, κρίθηκε ότι η υλοποίηση μικρών υδροηλεκτρικών έργων μπορεί να αποκλειστεί από ορισμένα υδάτινα σώματα με κατόντη οικοσυστήματα ιδιαίτερης αξίας, προκύπτει ότι το περιβαλλοντικό κόστος από την εκτροπή νερού μπορεί να εκτιμηθεί από το προσδοκώμενο όφελος από έργα αυτά. Με βάση τα σχετικά οικονομικά στοιχεία, μια πρώτη προσέγγιση του περιβαλλοντικού κόστους από τον περιορισμό της παροχής σε οικοσύστημα ιδιαίτερης αξίας είναι ίση με 2 m€/έτος.

Λαμβάνοντας υπόψη:

- την αρχή «ο ρυπαίνων πληρώνει»
- το γεγονός ότι υποβάθμιση του περιβάλλοντος υπάρχει πάντα όταν υπάρχει ρύπανση, έστω και εάν η περιβαλλοντική ζημιά είναι περιορισμένη, δηλαδή η κατάσταση του υδάτινου σώματος είναι καλή

• την σκοπιμότητα ισονομίας όσον αφορά τους ρυπαίνοντες
κρίθηκε σκόπιμο στην Ελλάδα να καταλογίζεται σε όλους τους χρήστες νερού το περιβαλλοντικό κόστος που αντιστοιχεί στον καθαρισμό των αποβλήτων τους.

4.3. ΚΟΣΤΟΣ ΠΟΡΟΥ

Ως κόστος πόρου ορίζεται το κόστος ευκαιρίας της χρήσης νερού. Έτσι, το κόστος πόρου ισούται με την διαφορά μεταξύ:

- του καθαρού οφέλους (συνολικά οφέλη μείον συνολικές ζημίες) από την παρούσα ή μελλοντική χρήση νερού, όπως απόληψη νερού ή ως αποδέκτη ρύπανσης, και
- του καθαρού οφέλους από άλλη εναλλακτική χρήση του νερού μέσα στον χώρο και τον χρόνο (περιλαμβανομένης π.χ. της κατάντη εναλλακτικής αξιοποίησης του νερού ή της αξιοποίησής του άλλη εποχή ή στο μέλλον)

εφόσον το δεύτερο είναι μεγαλύτερο του πρώτου. Έτσι, το κόστος πόρου αντανακλά ουσιαστικά την αναποτελεσματική αξιοποίηση νερού ή διάθεση ρύπανσης.

Η ύπαρξη κόστους πόρου προϋποθέτει την αδυναμία κάλυψης τόσο της υφιστάμενης χρήσης όσο και της εξεταζόμενης εναλλακτικής και κατά συνέπεια θεωρείται ότι γεννάται (μόνο) σε συνθήκες ανεπάρκειας.

Η αποτίμηση του κόστους πόρου μπορεί να γίνει είτε από τις διαφυγούσες ωφέλειες ως άνω, είτε από το κόστος για την απόκτηση του νερού που υπολείπεται.

Το παραπάνω κόστος συνιστά το λεγόμενο οικονομικό κόστος πόρου. Ειδική περίπτωση αποτελεί η άντληση από μη ανανεώσιμα αποθέματα υπόγειων νερών, οπότε υπάρχει «φυσικό κόστος πόρου». Το φυσικό κόστος πόρου είναι διαφορετικό ανά χρήση και μπορεί να εκτιμηθεί από το κόστος για τον περιορισμό της ζήτησης από τα αποθέματα αυτά ή το κόστος αύξησης της προσφοράς νερού. Έτσι:

(α) Στην άρδευση, το κόστος πόρου είναι το κόστος του περιορισμού της (πέραν των ανανεώσιμων πόρων) κατανάλωσης. Έτσι το μοναδιαίο κόστος πόρου, που θα εφαρμοστεί στην υπερβάλλουσα ζήτηση νερού, αντιστοιχεί στην ζημιά από την μετάπτωση των αρδευόμενων από αυτό καλλιεργειών από αρδευόμενες σε ξηρικές ή εναλλακτικά από το κόστος μεταφοράς της ελλείπουσας ποσότητας νερού από άλλο (επιφανειακό ή υπόγειο) υδατικό πόρο.

(β) Στην ύδρευση, το μοναδιαίο φυσικό κόστος πόρου μπορεί να αντιστοιχιστεί στο κόστος αφαλάτωσης, προκειμένου για παράκτιες και νησιωτικές περιοχές. Προκειμένου για άλλες περιοχές, το μοναδιαίο κόστος πόρου που εφαρμόζεται στην υπερβάλλουσα ζήτηση, μπορεί να προσεγγιστεί από την απαιτούμενη διαφορά τιμής για τον περιορισμό της ζήτησης ή εναλλακτικά από το κόστος μεταφοράς νερού από άλλο (επιφανειακό ή υπόγειο) υδατικό πόρο.

Γενικά το κόστος πόρου μπορεί να προστεθεί στο περιβαλλοντικό κόστος όπου συνυπάρχουν. Στις περιπτώσεις όμως όπου ως εναλλακτική χρήση του νερού θεωρείται αυτή που αντιστοιχεί στην καλή του κατάσταση, το περιβαλλοντικό κόστος και το κόστος πόρου έχουν εννοιολογική επικάλυψη, οπότε δεν μπορεί να αθροιστούν.

5. ΤΡΟΠΟΣ ΔΙΑΞΕΛΩΓΗΣ ΔΙΑΒΟΥΛΕΥΣΗΣ

Όπως προαναφέρθηκε, ιδιαίτερο στοιχείο της Οδηγίας 2000/60 ΕΚ είναι η διαμόρφωση του Σχεδίου Διαχείρισης σε συνεργασία με τους ενδιαφερόμενους φορείς ,Μ.Κ.Ο. και χρήστες μέσω μιας διαδικασίας διαβούλευσης.

με ελάχιστο χρονικό διάστημα διαβούλευσης τους 6 μήνες για καθένα από αυτά.

Για την διεξαγωγή της διαβούλευσης στην Ελλάδα:

- τα Σχέδια Διαχείρισης και οι επιμέρους εκθέσεις αναρτήθηκαν στο σύνολό τους στο διαδίκτυο, με δυνατότητα ηλεκτρονικής υποβολής παρατηρήσεων από καθένα διεξάγονται ημερίδες σε κάθε υδατικό διαμέρισμα με τα παραπάνω αντικείμενα, και
- οργανώθηκε μια διαδικασία συγκέντρωσης και επεξεργασίας των παρατηρήσεων που υποβάλλονται ηλεκτρονικά στο διαδίκτυο, στις ημερίδες αλλά και δια αλληλογραφίας.

Κατά την διαδικασία προέκυψαν αρκετά χρήσιμα στοιχεία και παρατηρήσεις, παρατηρήθηκαν όμως και σημαντικές αδυναμίες, οι κυριότερες των οποίων είναι:

- οι περιορισμένες δυνατότητες των φορέων, Μ.Κ.Ο. και χρηστών για την μελέτη και σχολιασμό των Σχεδίων Διαχείρισης (που χαρακτηρίζονται από μεγάλο όγκο πληροφορίας και προϋποθέτουν λεπτομερή μελέτη της Οδηγίας)
- το έλλειμμα εμπειρίας για την διεξαγωγή συγκροτημένου διαλόγου, με την ανταλλαγή τεκμηριωμένων προτάσεων και απόψεων σε ανοιχτές συζητήσεις, και
- η δυσπιστία όσον αφορά στις προθέσεις των κεντρικών υπηρεσιών για συνδιαμόρφωση των Σχεδίων Διαχείρισης μέσω της διαβούλευσης.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΤΑ ΕΠΟΜΕΝΑ ΒΗΜΑΤΑ

Ο πρώτος κύκλος κατάρτισης των Σχεδίων Διαχείρισης οδεύει προς ολοκλήρωση. Από την μέχρι τώρα εφαρμογή της Οδηγίας 2000/60/ΕΚ και των Κατευθυντήριων Οδηγιών προέκυψε – τόσο στην Ελλάδα όσο και σε Ευρωπαϊκό επίπεδο - ότι:

- υπάρχουν σημαντικές δυσκολίες στην αξιολόγηση της κατάστασης των επιφανειακών και υπόγειων νερών, κυρίως λόγω έλλειψης δεδομένων
- ο στόχος της άμεσης και σημαντικής βελτίωσης της ποιότητας των επιφανειακών πόρων είναι υπερβολικά φιλόδοξος, ιδίως στην παρούσα εποχή κρίσης, και
- υπάρχουν σημαντικές δυσκολίες στην αξιολόγηση του περιβαλλοντικού κόστους και του κόστους πόρου.

Για την εφαρμογή των Σχεδίων Διαχείρισης στην χώρα απαιτείται:

- η έγκρισή τους από τους Γ.Γ. της Αποκεντρωμένης Διοίκησης μετά από γνώμη των Περιφερειακών Συμβουλίων Υδάτων
- η ενσωμάτωσή τους στις Κανονιστικές Διατάξεις των Περιφερειών
- η οριζόντια αξιοποίησή τους στις σχετικές διαδικασίες αδειοδοτήσεων, όπως π.χ. στην περιβαλλοντική αδειοδότηση
- η υλοποίηση των προβλεπόμενων σε αυτές διοικητικών και άλλων μέτρων, με την αξιοποίηση κυρίως Ευρωπαϊκών πόρων κατά την περίοδο 2014-2020.

Τα Σχέδια Διαχείρισης έχουν αξιολογήσει από πλευράς επιπτώσεων στην κατάσταση των υδάτων τα υφιστάμενα και προγραμματιζόμενα μεσαία και μεγάλα έργα και δραστηριότητες, στον βαθμό που έχουν μελετηθεί επαρκώς. Δεν ήταν όμως ούτε δυνατόν ούτε σκόπιμο να αξιολογήσουν όλα τα προβλεπόμενα έργα. Επίσης είναι φυσικό μετά από την έγκρισή των Σχεδίων Διαχείρισης και μέχρι την αναθεώρησή τους να προκύψουν παρεμβάσεις που δεν είχαν μελετηθεί κατά την διάρκεια της κατάρτισής τους. Για τους λόγους αυτούς, τα Σχέδια Διαχείρισης δεν πρέπει να αξιοποιηθούν περιοριστικά, με την έννοια ότι θα επιτρέπεται η υλοποίηση μόνο εκείνων των παρεμβάσεων που έχουν προβλεφτεί ονομαστικά σε αυτά. Απαραίτητη όμως είναι η αξιολόγηση κατά περίπτωση της συμβατότητας με το εγκεκριμένο Σχέδιο Διαχείρισης της κάθε προτεινόμενης παρέμβασης.

Σημαντικό είναι επίσης να αξιοποιηθεί η εμπειρία από την κατάρτιση των σχεδίων αυτών και να γίνουν οι απαιτούμενες προετοιμασίες για την επικαιροποίηση των σχεδίων μετά το 2015 όπως απαιτείται από την Οδηγία. Στο πλαίσιο αυτό κρίνονται απαραίτητα:

- η απρόσκοπτη εκτέλεση των μετρήσεων στο Εθνικό Δίκτυο Παρακολούθησης επιφανειακών και υπογείων νερών
- η επεξεργασία μιας κατάλληλης τιμολογιακής πολιτικής του νερού για τον περιορισμό της σπατάλης του νερού μέσω της (μερικής ή ολικής) ανάκτησης του πραγματικού κόστους του νερού από όλους τους χρήστες του, και
- η συμμετοχή της χώρας στην διαδικασία αξιολόγησης από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή της εφαρμογής της Οδηγίας για την βελτίωσή της και την επικαιροποίηση και συμπλήρωση των Κατευθυντήριων Κειμένων για την ορθή εφαρμογή της.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Χατζηνικολάου, Γ., 2008. *Επίδραση διαχειριστικών πρακτικών στην ποιότητα νερού και στην οικολογία των ποταμών της Ελλάδας. Ο Πηνειός (Θεσσαλίας) ως ειδική περίπτωση μελέτης*. Διδακτορική διατριβή. Τμήμα Βιολογίας, ΑΠΘ.
- Artemiadou V. & Lazaridou M., 2005, *Evaluation Score and Interpretation Index for the Ecological Quality of Running Waters in Central and Northern Hellas*, Environmental Monitoring and Assessment, 110: 1-40
- Buffagni, A., Erba, S., Birk, S., Cazzola, M., Feld, C., Ofenbock, T., Murray-Bligh, J., Furse, M.T., Clarke, R., Herring, D., Soszka, H. & Van de Bund, W., 2005. *Towards European Inter-Calibration for the Water Framework Directive: Procedures and Examples for Different River Types from the E.C. Project STAR*. Instituto di Ricerca Sulle Acque, Rome.
- Chatzinikolaou Y., Dakos V. & Lazaridou M., 2006. *Longitudinal impacts of anthropogenic pressures on benthic macroinvertebrate assemblages in a large transboundary Mediterranean river during the low flow period*, Acta hydrochim. hydrobiol., 34 (5): 453-463
- Dunne, T. & Leopold, L.B., 1978. *Water in Environmental Planning*, 2nd edn. W.H. Freeman, San Francisco.
- Hynes, H.B.N., 1970. *The Ecology of Running Waters. Better Biological Monitoring*. Island Press, USA. Patt, H. & Städtler, E., 2000. *Eigen dynamische entwicklung einer gewässerstrecke*. Wasser & Boden 52: 44-49.
- Simboura N. & Zenetos A., 2002, *Benthic indicators to use in Ecological Quality Classification of Mediterranean soft bottom marine ecosystems, including a new Biotic Index*, Mediterranean Marine Science, Vol. 3.2, 77-111
- Zogaris, S., Economou, A.N. & Dimopoulos P., 2009, *Ecoregions in the Southern Balkans: Should their boundaries be revised?* Environmental Management 43:682–697.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: ΟΡΙΑ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ ΜΕΤΑΞΥ ΚΑΛΗΣ ΚΑΙ ΜΕΤΡΙΑΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥΣ

Ποτάμια

Παράμετρος	Όριο καλής / μέτριας κατάστασης
Διαλυμένο Οξυγόνο	> 70% για 90% δειγμάτων ¹
B.O.D ₅	μέση ετήσια < 4 mg/l
Συγκέντρωση σε ιόντα υδρογόνου pH	μέση ετήσια 6-9
Ολικός φώσφορος	μέση ετήσια < 200 µg/l P
Αμμώνιο	μέση ετήσια < 1 mg/l NH ₄ ⁺
Νιτρικά	μέση ετήσια < 25 mg/l NO ₃ ⁻
Νιτρώδη	μέση ετήσια < 0.05 mg/l NO ₂ ⁻

Ειδικά για την λεκάνη απορροής Ασωπού, για τα όρια κατάταξης μεταξύ καλής και μέτριας κατάστασης, ισχύουν οι τιμές του Πίνακα 3 του Παραρτήματος Α της ΚΥΑ 20488/2010, όπου ορίζονται και μέγιστες επιτρεπτές συγκεντρώσεις.

Λίμνες

Παράμετρος	Όριο καλής / μέτριας κατάστασης
Διαλυμένο Οξυγόνο	μέση θερινή > 4 mg/l στο υπολίμνιο
Συγκέντρωση σε ιόντα υδρογόνου pH	μέση ετήσια 6-9
Δίσκος Secchi	μέση θερινή > 2.5 m
Ολικός φώσφορος	μέση ετήσια < 30 µg/l
Ολικό άζωτο	μέση ετήσια < 1 mg/l
Αμμώνιο	μέση ετήσια < 0.5 mg/l
Νιτρώδη	μέση ετήσια < 0.05 mg/l
Χλωροφύλλη-a (για φυσικές λίμνες)	μέση θερινή < 10 µg/l ^[1]
Χλωροφύλλη (για ταμειυτήρες)	μέση θερινή για τύπους L-M5/7 < 9.5 µg/l μέση θερινή για τύπο L-M8 < 6.0 µg/l

Παράκτια

Παράμετρος	Όριο καλής / μέτριας κατάστασης
Διαλυμένο Οξυγόνο	> 80% για το 90% των δειγμάτων
Συγκέντρωση σε ιόντα υδρογόνου pH	μέση ετήσια 6-9
Δίσκος Secchi	μέση ετήσια > 15 m
Αμμώνιο	μέση ετήσια < 40 µg/l
Νιτρικά	μέση ετήσια < 50 µg/l
Χλωροφύλλη-a	για 90% των δειγμάτων του τύπου III E < 0.4 µg/l

Μεταβατικά

Παράμετρος	Όριο καλής / μέτριας κατάστασης
Διαλυμένο Οξυγόνο	> 80% για το 90% των δειγμάτων
Συγκέντρωση σε ιόντα υδρογόνου pH	μέση ετήσια 6-9
Αμμώνιο	μέση ετήσια < 1 µg/l

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΤΩΝ ΠΟΣΟΤΙΚΩΝ
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΕΝΟΣ ΠΑΡΑΚΤΙΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΟΥ ΣΕ
ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΜΑΚΡΟΧΡΟΝΙΑΣ ΥΠΕΡΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ ΚΑΙ
ΕΠΕΙΣΟΔΙΩΝ ΞΗΡΑΣΙΑΣ**

Ευάγγελος Γαλαζούλας*, Χρήστος Πεταλάς

Εργαστήριο Οικολογικής Μηχανικής και Τεχνολογίας, Τμήμα Μηχανικών
Περιβάλλοντος, Δ.Π.Θ., 67100, Ξάνθη

*Στοιχεία επικοινωνίας: egalazou@env.duth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία διερευνώνται διαχρονικά τα στάδια εξέλιξης της ποσοτικής υποβάθμισης ενός παράκτιου υδροφόρου συστήματος και αναλύεται η επίδραση διάφορων παραγόντων όπως οι περίοδοι ξηρασίας, οι αρδευτικές πρακτικές και η έλλειψη εναλλακτικών διαχειριστικών σεναρίων. Ο δείκτης ξηρασίας SPI εφαρμόστηκε για την καταγραφή των επεισοδίων ξηρασίας και της έντασης τους, ενώ πραγματοποιήθηκε συσχέτιση μεταξύ των χρονοσειρών βροχόπτωσης, πιεζομετρικής στάθμης και αντλητικών εκροών. Τα αποτελέσματα φανερώνουν την ανισοβαρή αύξηση των αντλήσεων σε σχέση με τις αρδευτικές βροχοπτώσεις στις αρχές της δεκαετίας του 1990 και την εξομάλυνση του φαινομένου μετά το 2005, εξαιτίας της αλλαγής των γεωργικών πρακτικών.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: περίοδοι ξηρασίας, υπερ-εκμετάλλευση υπογείων υδάτων

**SURVEY ON THE EVOLUTION OF QUANTITY
CHARACTERISTICS OF A COASTAL AQUIFER UNDER LONG-
TERM OVEREXPLOITATION AND DROUGHT EVENTS**

Evangelos Galazoulas*, Christos Petalas

Laboratory of Ecological Engineering and Technology, Department of
Environmental Engineering, Democritus University of Thrace,
67100 Xanthi, Greece

*Corresponding author: egalazou@env.duth.gr

ABSTRACT

The present study investigates the historical evolutionary trends of quantitative degradation in a coastal multilayered aquifer. Specifically, the effect of various parameters is analyzed, including drought events, groundwater abstraction patterns and the lack of water resources alternatives. The Standardized Precipitation drought Index (SPI) is used to identify drought events and their intensity, while correlation between rainfall, piezometric level and groundwater abstraction time series was performed. Results show the unequal increase of abstractions in contrast to rainfall heights during the irrigation period, at the beginning of the 1990 decade and the piezometric balance achieved after 2005, due to the change in agricultural water practices.

KEY WORDS: drought events, groundwater over-exploitation

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα αποθέματα υπόγειων υδάτων υπόκεινται σε πιέσεις εξαιτίας μετεωρολογικών και ανθρωπογενών επιδράσεων. Η επίδραση αυτών των παραγόντων στους υδατικούς πόρους έχει μελετηθεί εκτενώς από πολλούς συγγραφείς (Chen and Osadetz, 2002; Lewis, 1989). Η αυξημένη ζήτηση σε αρδευτικό, πόσιμο και βιομηχανικής χρήσης νερό σε συνδυασμό με τις περιορισμένες βροχοπτώσεις οξύνουν το πρόβλημα της εξάντλησης των διαθέσιμων υδατικών πόρων και επιβάλλουν την ανάπτυξη διαχειριστικών εργαλείων και μεθόδων. Ιδιαίτερα η μελέτη της διακύμανσης των διαθέσιμων υδατικών πόρων σε σχέση με την βροχόπτωση αποτελεί ένα πολύ σημαντικό κεφάλαιο στη βιώσιμη ανάπτυξη των υπόγειων αποθεμάτων (Aflatoon, 2011).

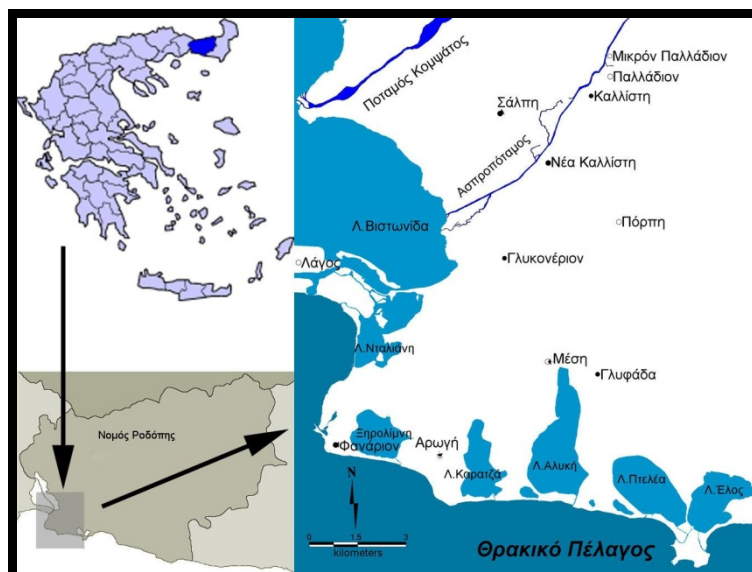
Η ανάλυση μακροχρόνιων χρονοσειρών δεδομένων μετεωρολογικών παραμέτρων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μελλοντική διαχείριση των αποθεμάτων νερού. Η έγκαιρη καταγραφή και ο εντοπισμός επεισοδίων ξηρασίας καθώς και η μελέτη των επιπτώσεων τους στους υδατικούς πόρους στο παρελθόν, αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για μια ορθολογική αντιμετώπιση του προβλήματος. Ο δείκτης ξηρασίας SPI έχει χρησιμοποιηθεί για αυτόν το σκοπό με επιτυχία (Wu et al., 2007; Cancelliere et al., 2007), επιτρέποντας την ανάλυση περιόδων ξηρασίας μόνο με τη χρήση βροχομετρικών δεδομένων. Η ανάλυση της πιεζομετρικής εξέλιξης χαρακτηριστικών γεωτρήσεων βοηθά στην κατανόηση της τάσης των υπόγειων υδάτων και στη χωρική της κατανομή. Επίσης η αναγνώριση λανθασμένων γεωργικών αρδευτικών πρακτικών στο παρελθόν και η κατανόηση των αποτελεσμάτων τους σήμερα, επιτρέπουν την ανάπτυξη βιώσιμων αγροτικών πολιτικών.

Επομένως, είναι απαραίτητο να καταλάβουμε και να διαχειριστούμε τη σημασία της κλιματικής αλλαγής στα αποθέματα υπόγειων υδάτων και τους πιθανούς κινδύνους που μπορεί να προκύψουν κάτω από διάφορα κλιματικά σενάρια. Ως περιοχή μελέτης επιλέχθηκε το υπόγειο παράκτιο υδροφόρο σύστημα στο νοτιοδυτικό άκρο της Περιφερειακής Ενότητας Ροδόπης, το οποίο υπόκειται σε καθεστώς ποσοτικής και ποιοτικής υποβάθμισης τα τελευταία 35 χρόνια, εξαιτίας της ανθρώπινης υπερεκμετάλλευσης και των μετεωρολογικών συνθηκών. Είναι χαρακτηριστικό ότι σήμερα υπάρχουν ελάχιστα αποθέματα πόσιμου νερού στην περιοχή ενώ σε αρκετές περιπτώσεις το νερό κρίνεται ακατάλληλο και για άρδευση. Σκοπός της έρευνας είναι η μελέτη της διαχρονικής εξέλιξης της υποβάθμισης της παραπάνω περιοχής, η αναγνώριση των συνθηκών που οδήγησαν σε αυτό το φαινόμενο, η ταυτοποίηση των σταδίων που διανύθηκαν μέχρι τη διαμόρφωση της σημερινής κατάστασης και η ποσοτικοποίηση των παραμέτρων που περιγράφουν το μέγεθος της.

2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΕΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

2.1. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η περιοχή μελέτης τοποθετείται στο νοτιοδυτικό άκρο του Νομού Ροδόπης και αποτελεί τμήμα του ευρύτερου πεδινού και παράκτιου υδροφόρου συστήματος του Νομού (Σχήμα 1). Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της περιοχής αποτελεί η παρουσία ενός σημαντικού αριθμού λιμνοθαλασσών. Η μεγαλύτερη από τις λιμνοθάλασσες, η Βιστωνίδα, βρίσκεται στα δυτικά και στα όρια των νομών Ξάνθης και Ροδόπης και αποτελεί τον αποδέκτη των δύο κύριων ποταμών, Κομψάτου και Ασπροπόταμου, στα ανατολικά. Γεωμορφολογικά η περιοχή χωρίζεται στο λοφώδες ανάγλυφο με ομαλές κλίσεις που κυριαρχεί στο νότιο τμήμα της, ενώ το βόρειο τμήμα χαρακτηρίζεται από πολύ πιο ήπιο, πεδινό ανάγλυφο.



Σχήμα 1. Τοποθεσία περιοχής μελέτης

Οι Πεταλάς (1997) και Πεταλάς και Διαμαντής (1999) έχουν μελετήσει εκτενώς την υδρογεωλογία της περιοχής. Η εξέταση γεωλογικών, υδρογεωλογικών και υδροχημικών δεδομένων έδειξε την ύπαρξη ενός πολύπλοκου υδροφόρου συστήματος Άνω-Μειοκαινικής ηλικίας. Δύο είναι οι κύριοι υδροφόροι που εντοπίζονται στην περιοχή. Ένας επιφανειακός μερικώς υπό πίεση υδροφόρος ο οποίος αποτελείται από εναλλαγές χαλαρών ψαμιτών, ιλυών και αργίλων και ένας βαθύτερος υπό πίεση υδροφόρος, αποτελούμενος από χονδρόκοκκα ιζήματα. Μεταξύ των δύο υδροφόρων συστημάτων υπάρχει ένα παχύ αργιλικό στρώμα. Στη βάση του βαθύτερου κύριου υδροφόρου εμφανίζεται ένας ορίζοντας πράσινης αργίλου, που διαχωρίζει τα δύο παραγωγικά υδροφόρα συστήματα από τις υποκείμενες αποθέσεις. Το βάθος αυτού του στρώματος εντοπίζεται περίπου στα 100 μέτρα κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας.

2.2. ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΕΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν χρονοσειρές μετεωρολογικών δεδομένων, πιεζομετρικής στάθμης και αρδευτικών αντλήσεων. Η μελέτη των κατακρημνισμάτων βασίστηκε σε ημερήσια στοιχεία του βροχομετρικού σταθμού Πόρπης που βρίσκεται στο κέντρο της περιοχής μελέτης (Σχ.1) και λειτουργεί αδιάλειπτος από το 1954 μέχρι σήμερα. Τα δεδομένα θερμοκρασίας προέρχονται από τον μετεωρολογικό σταθμό του Αμπελουργικού Φυτωρίου Κομοτηνής, που βρίσκεται κοντά στον Αίγειρο. Μετρήσεις πιεζομετρικής στάθμης έχουν πραγματοποιηθεί σε διμηνιαία βάση από τον Απρίλιο του 1990 μέχρι και τον Απρίλιο του 2011, καθώς επίσης έχει καταγραφεί και η αρχική στάθμη ορισμένων γεωτρήσεων κατά την περίοδο ανόρυξης τους. Στις περιπτώσεις κατά τις οποίες η αρχική στάθμη αναφέρεται στην δεκαετία του 1970, θεωρούμε ότι η τιμή αυτή αντιπροσωπεύει την αρχική κατάσταση ισορροπίας του υδροφόρου συστήματος, καθώς εκείνη τη περίοδο υπήρχαν ελάχιστες παραγωγικές γεωτρήσεις σε λειτουργία. Ο υπολογισμός των αρδευτικών αντλήσεων έγινε με βάση την κατανάλωση κάθε γεώτρησης σε ενέργεια (kWh) και την μετατροπή αυτής της τιμής σε κυβικά μέτρα μέσω συντελεστών ενεργειακής κατανάλωσης και μετρήσεων της παροχής τους στο πεδίο. Τα στοιχεία υπάρχουν σε ετήσια βάση για περιορισμένο αριθμό γεωτρήσεων την περίοδο από το 1985 μέχρι και το 2011 και με συχνότητα διμήνου κατά την διάρκεια της αντλητικής περιόδου (Απρίλιος – Σεπτέμβριος) από το 2008 μέχρι και το 2011.

3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

3.1. ΔΕΙΚΤΕΣ ΞΗΡΑΣΙΑΣ–ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΟΣ ΔΕΙΚΤΗΣ ΞΗΡΑΣΙΑΣ

Τα αποτελέσματα ενός επεισοδίου ξηρασίας στο περιβάλλον και την οικονομία μπορεί να είναι καταστροφικά και επομένως είναι απαραίτητη η ανάπτυξη εργαλείων πρόβλεψης και έγκαιρης καταγραφής του. Τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί ένας μεγάλος αριθμός δεικτών ξηρασίας (Percent of Normal, Palmer Drought Severity Index (PDSI), Surface Water Supply Index (SWSI), Standard Precipitation Index (SPI)), έτσι ώστε να είναι δυνατή η αναγνώριση των χαρακτηριστικών και η αξιολόγηση του φαινομένου. Ανάμεσα τους ο κανονικοποιημένος δείκτης κατακρημνισμάτων (SPI), που δημιουργήθηκε από τους McKee et al., (1993), γνωρίζει ευρεία αποδοχή στην πρόσφατη βιβλιογραφία. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα του αποτελούν πρώτον η απλότητα του υπολογισμού του (απαιτούνται μόνο χρονοσειρές δεδομένων βροχόπτωσης) και δεύτερον η ευέλικτη μεταβλητή χρονική κλίμακα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί (Quiring, 2009). Σύμφωνα με τους Hayes et al., (1999) μία μικρή χρονική κλίμακα (1-3 μήνες) σχετίζεται περισσότερο με την αρδευτική ξηρασία ενώ μεγαλύτερες χρονικές κλίμακες (>9 μήνες) σχετίζονται περισσότερο με την υδρολογική ξηρασία, δηλαδή με τους υδάτινους πόρους.

Ο υπολογισμός του SPI βασίζεται σε σειρές αθροιστικών κατακρημνισμάτων για μια καθορισμένη χρονική κλίμακα ενδιαφέροντος (π.χ. 3, 6, 9, 12, 24 μήνες). Οι παραπάνω χρονοσειρές εφαρμόζονται πάνω σε μία πιθανοτική κατανομή, η οποία στην συνέχεια μετασχηματίζεται σε μια κανονική κατανομή, έτσι ώστε η μέση τιμή του δείκτη για μια συγκεκριμένη περιοχή και χρονική περίοδο να είναι μηδέν (Edwards and McKee, 1997). Ο δείκτης είναι αρνητικός για περιόδους ξηρασίας και θετικός για τις υγρές περιόδους, ενώ καθώς οι υγρές και οι ξηρές περιόδους γίνονται πιο έντονες, οι τιμές του αυξάνονται αντίστοιχα. Επειδή ο δείκτης είναι κανονικοποιημένος, υγρότερα και ξηρότερα κλίματα μπορούν να περιγραφούν με τον ίδιο τρόπο και οι υγρές περιόδους μπορούν και αυτές να μελετηθούν.

3.2. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΡΔΕΥΤΙΚΩΝ ΑΝΑΓΚΩΝ

Ο υπολογισμός των αρδευτικών αναγκών σε κάθε έτος υπολογίστηκε ως η διαφορά μεταξύ των αναγκών κάθε καλλιέργειας σε νερό και του τμήματος της βροχόπτωσης το οποίο είναι διαθέσιμο στα φυτά (αποτελεσματική βροχόπτωση) (FAO, 1978). Ο προσδιορισμός των αρδευτικών αναγκών έγινε με τη μέθοδο Blaney-Criddle (Blaney and Criddle 1950) η οποία έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία στο παρελθόν στην ευρύτερη περιοχή (Πισινάρας 2008). Η μέθοδος αυτή υπολογίζει την μέση μηνιαία δυνητική εξατμισοδιαπνοή μιας καλλιέργειας με μοναδικό μετεωρολογικό δεδομένο εισόδου την θερμοκρασία και υπολογίζεται ως εξής.

$$E_p = 0.254K_c p(32+1.8T_a) \quad (3.1)$$

όπου E_p η δυνητική εξατμισοδιαπνοή (mm/month), T_a η μέση θερμοκρασία του μήνα (°C), K_c ο συντελεστής καταναλωτικής χρήσης (φυτικός συντελεστής) και p το ποσοστό (%) των ωρών ημέρας του συγκεκριμένου μήνα σε σχέση με το σύνολο των ωρών ημέρας του έτους.

Ο φυτικός συντελεστής εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως το ύψος και η διάπλαση των φυτών, την επιφάνεια και αεροδυναμική τους αντίσταση και τις κλιματικές συνθήκες και οι τιμές του για μη δενδρώδεις καλλιέργειες δίνονται στην βιβλιογραφία για όλα τα βλαστικά στάδια των καλλιεργειών (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999). Ο υπολογισμός της αποτελεσματικής βροχόπτωσης (P_e) έγινε με

βάση τις εξισώσεις που προτείνει ο FAO (1978) για περιοχές με χαμηλή κλίση ανάλογα με την ποσότητα της συνολικής βροχόπτωσης P.

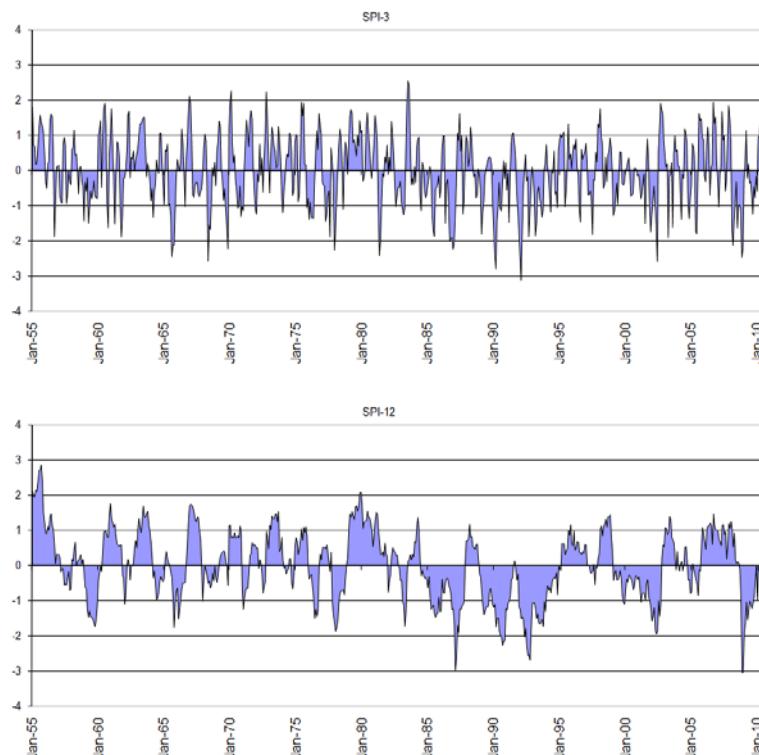
$$P_e = 0.8P - 25 \text{ για } P > 75 \quad (3.2)$$

$$P_e = 0.6P - 10 \text{ για } P < 75 \quad (3.3)$$

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

4.1. ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΟΣ ΔΕΙΚΤΗΣ ΞΗΡΑΣΙΑΣ

Τα αποτελέσματα της εφαρμογής του δείκτη (SPI) στα δεδομένα του βροχομετρικού σταθμού Πόρπης παρουσιάζονται στο Σχήμα 2. Χαρακτηριστική είναι η έντονη διαφοροποίηση που παρουσιάζει ο δείκτης SPI με την αλλαγή της χρονικής κλίμακας. Για το μικρό χρονικό κατώφλι των 3 μηνών η συχνότητα του δείκτη αυξάνει, ενώ η διάρκεια του μειώνεται. Δηλαδή για μικρή χρονική κλίμακα η ξηρασία εμφανίζεται συχνά αλλά διαρκεί για μικρότερο χρονικό διάστημα. Αντίθετα, για μεγάλα χρονικά κατώφλια 12-μηνών η ξηρασία δεν εμφανίζεται συχνά αλλά διαρκεί μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Η διαφοροποίηση αυτή εξηγείται με βάση την επίδραση που έχει κάθε μήνας στις μικρές χρονικές κλίμακες, με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται άμεσα η τιμή του δείκτη, ενώ σε μεγαλύτερες χρονικές κλίμακες, ο κάθε μήνας έχει μικρότερη επίδραση και έτσι ο δείκτης ανταποκρίνεται πιο αργά. Ο SPI 3-μηνών αναγνωρίζει τη μετεωρολογική ξηρασία, καθώς αυτή εμφανίζεται αμέσως μόλις παρατηρηθεί έλλειψη κατακρημνισμάτων. Ο SPI 12-μηνών σχετίζεται με τους υδάτινους πόρους (υπόγεια και επιφανειακά νερά) και ελέγχει την υδρολογική ξηρασία.



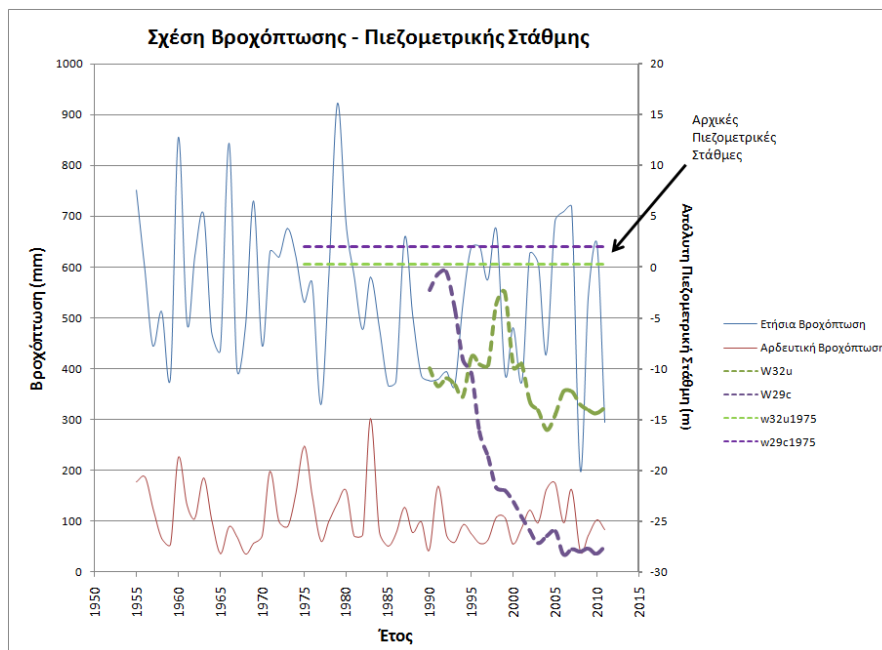
Σχήμα 2. SPI-3 μηνών (πάνω) και SPI-12 μηνών (κάτω) βροχομετρικού σταθμού Πόρπης.

Σύμφωνα με τον δείκτη SPI-12 μηνών, ο σταθμός της Πόρπης παρουσιάζει τρία εξαιρετικά επεισόδια ξηρασίας από το 1985 έως και το 1996 και ένα στο τέλος της

δεκαετίας του 2010. Μικρότερα επεισόδια λαμβάνουν χώρα το 1960, το 1976, και το 2002. Η διάρκεια των κύριων επεισοδίων $SPI < -2$ είναι μικρή αλλά παρουσιάζει υψηλή συχνότητα στο διάστημα 1985-1995. Γενικότερα για όλο αυτό το διάστημα ο δείκτης SPI παρουσιάζει αρνητικές τιμές (σε ελάχιστους μήνες θετικές) δείχνοντας ότι πρόκειται για μια περίοδο συνεχόμενης ξηρασίας με διαφορετικές εντάσεις.

4.2 ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΕΩΝ ΚΑΙ ΠΙΕΖΟΜΕΤΡΙΚΩΝ ΣΤΑΘΜΕΩΝ

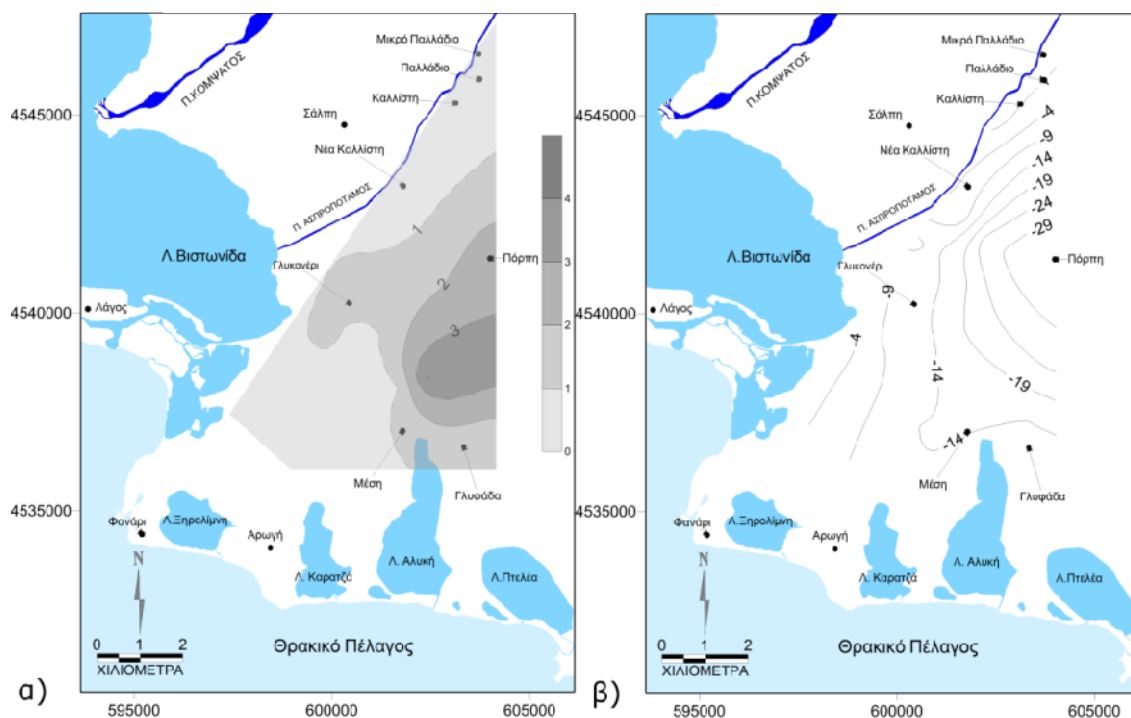
Στο Σχήμα 3 παρουσιάζεται η γραφική συσχέτιση μεταξύ των μέσων ετήσιων συνολικών και αρδευτικών κατακρημνισμάτων και της μέγιστης ετήσιας πιεζομετρικής στάθμης για δύο γεωτρήσεις. Ο όρος αρδευτικά κατακρημνίσματα αναφέρεται στο σύνολο της βροχόπτωσης κατά την διάρκεια της αρδευτικής περιόδου (Απρίλιος – Σεπτέμβριος). Από το διάγραμμα είναι εμφανές ότι η στάθμη της γεώτρησης w32u, που εντοπίζεται στο μερικώς υπό πίεση υδροφόρο, παρουσιάζει ανάλογη τάση με τη χρονοσειρά της ετήσιας βροχόπτωσης ενώ η στάθμη της γεώτρησης w29c, που αντλεί μόνο από τον βαθύτερο υπό πίεση υδροφόρο, δεν παρουσιάζει συσχέτιση. Η διαφορά οφείλεται στην άμεση τροφοδοσία της πρώτης γεώτρησης μέσω επιφανειακής κατείσδυσης, ενώ στη δεύτερη γεώτρηση δεν υπάρχει άμεση επικοινωνία και η μόνη επίδραση των κατακρημνισμάτων στη μέγιστη ετήσια πιεζομετρική στάθμη αφορά την διακοπή των αντλήσεων κατά την αρδευτική περίοδο (Απρίλιος-Σεπτέμβριος).



Σχήμα 3. Γραφική συσχέτιση μέσων ετήσιων συνολικών και αρδευτικών κατακρημνισμάτων για τον βροχομετρικό σταθμό Πόρπης και χρονοσειρών μέγιστης ετήσιας απόλυτης πιεζομετρικής στάθμης για 2 γεωτρήσεις.

Όπως φαίνεται, η γεώτρηση w29c παρουσιάζει καλύτερη ταύτιση τάσης με αυτή την χρονοσειρά καθώς ετήσια αρδευτική βροχόπτωση μικρότερη από 100 mm οδηγεί σε μεγάλο ρυθμό μείωσης της στάθμης. Η εμπειρική αυτή σχέση είναι ενδεικτική της σχέσης μεταξύ αρδευτικών κατακρημνισμάτων και πιεζομετρικής στάθμης του υπό πίεση υδροφόρου. Την τελευταία πενταετία το σύστημα δείχνει να επανέρχεται σε κατάσταση ισορροπίας καθώς ο αριθμός των αρδευτικών γεωτρήσεων έχει μειωθεί δραματικά λόγω της υποβάθμισης την ποιότητας των υπόγειων υδάτων στην περιοχή. Στο Σχήμα 4α παρουσιάζεται ο μέσος ρυθμός ετήσιας πτώσης πιεζομετρικής στάθμης

για τον κύριο υπό πίεση υδροφόρο κατά την περίοδο από το 1992 μέχρι και το 1997 καθώς και η πιεζομετρική στάθμη όπως αυτή μετρήθηκε κατά την περίοδο του Απριλίου του 2011 (Σχήμα 4β). Είναι εντυπωσιακός ο πολύ υψηλός ρυθμός πτώσης στάθμης στα νοτιοανατολικά της περιοχής όπου φτάνει μέχρι και τα 4 μέτρα ανά έτος. Στο διάγραμμα φαίνεται ότι στις περιοχές κοντά στις ζώνες τροφοδοσίας στα βορειοδυτικά και νοτιοδυτικά ο ρυθμός ήταν μικρότερος εξαιτίας της άμεσης τροφοδοσίας ενώ στα ανατολικά η υπερ-άντληση οδήγησε στην δημιουργία του κώνου πτώσης στάθμης όπως αυτός παρουσιάζεται σήμερα (Σχήμα 4β).

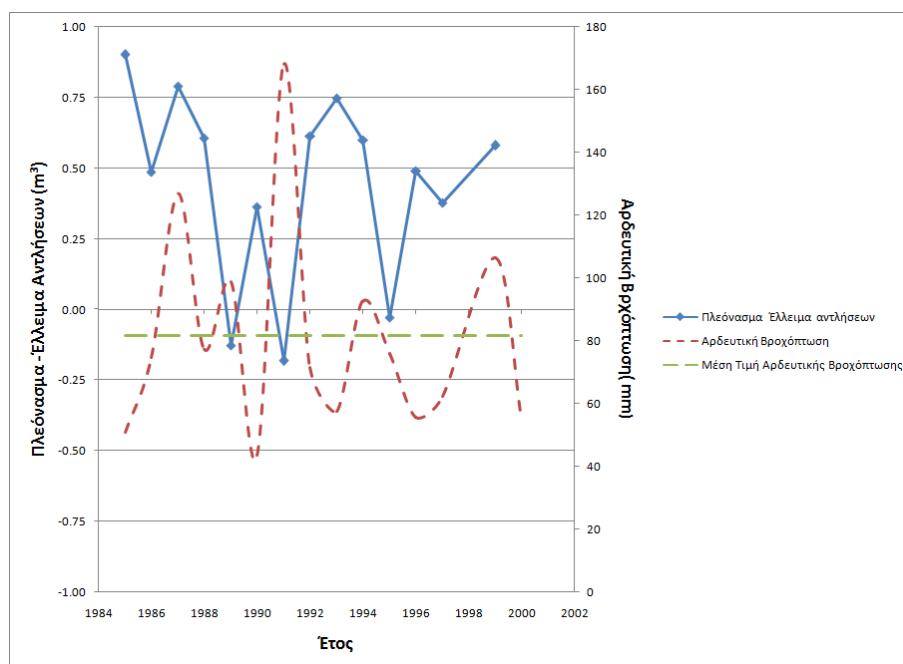


Σχήμα 4. α) Χωρική κατανομή ετήσιου ρυθμού πτώσης πιεζομετρικής στάθμης **β)** πιεζομετρική στάθμη Απριλίου 2011.

4.2. ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΑΡΔΕΥΤΙΚΩΝ ΑΝΑΓΚΩΝ ΚΑΙ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΕΩΝ

Οι ανάγκες ενός στρέμματος καλλιέργειας βαμβακιού σε νερό, εκτιμήθηκαν με την μέθοδο που προτείνει ο FAO 1978, για το διάστημα 1990-1997, με σκοπό να υπολογιστεί το πλεόνασμα ή έλλειμμα αρδευτικών αντλήσεων για το παραπάνω διάστημα. Ως γεώτρηση αναφοράς επιλέχθηκε η γεώτρηση w23u, επειδή αρδεύει τον ίδιο αριθμό στρεμμάτων και την ίδια καλλιέργεια (βαμβάκι) σε όλη την χρονική περίοδο. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 5, όπου φαίνεται ότι οι δύο χρονοσειρές παρουσιάζουν αντίστροφα αποτελέσματα. Ο κατακόρυφος άξονας αντιστοιχεί στο ετήσιο ποσοστό πλεονάσματος ή ελλείμματος, σε σχέση με τις αρδευτικές ανάγκες. Όσο λιγότερες είναι οι ετήσιες αρδευτικές βροχοπτώσεις τόσο μεγαλύτερο είναι το πλεόνασμα αντλήσεων που παρατηρείται. Η αντίστροφη αυτή διαδικασία δεν είναι ισοβαρής καθώς στις περιπτώσεις υψηλών ή μέσων βροχοπτώσεων ο μέσος όρος αντλήσεων συμφωνεί με τις υπολογισμένες τιμές ή μειώνεται κατά 10% το μέγιστο. Αντίθετα όταν οι αρδευτικές βροχοπτώσεις είναι μικρές παρατηρείται ένα μεγάλο πλεόνασμα αντλήσεων το οποίο μπορεί να φτάσει και το 85% της μέσης τιμής. Δηλαδή σε περιόδους αρδευτικής ξηρασίας παρατηρείται το φαινόμενο της άντλησης σχεδόν διπλάσιας ποσότητας νερού ανά στρέμμα. Από το Σχήμα 5 προκύπτει ότι για τα παρατηρείται υπεράντληση των γεωτρήσεων τα έτη 1985, 1987, 1993 και 1994, ενώ τα

έτη 1989, 1991 και 1995, οι αντλήσεις ήταν περίπου οι προβλεπόμενες. Η εμφάνιση μεγάλου ρυθμού πτώσης στάθμης μετά το 1992, όπως αυτός εμφανίζεται στο Σχήμα 2, ενώ η μέχρι τότε πτώση στάθμης ήταν μικρή, μπορεί να εξηγηθεί με βάση τη μεγάλη αύξηση του αριθμού των παραγωγικών γεωτρήσεων τη δεκαετία του 1990.



Σχήμα 5. Σχέση μεταξύ ετήσιου πλεονάσματος ή ελλείμματος αρδευτικών αντλήσεων και ετήσιας αρδευτικής βροχόπτωσης για την περίοδο 1985-2010.

Για να μελετηθεί η σχέση μεταξύ των αρδευτικών αντλήσεων και ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων κατά την διάρκεια της αντλητικής περιόδου υπολογίστηκαν οι αρδευτικές ανάγκες σε διμηνιαία βάση όπως αυτές μετρήθηκαν στο πεδίο και συγκρίθηκαν με την υπολογισμένη αρδευτική ανάγκη σε νερό για την κάθε περίοδο καθώς και με την αρδευτική και αποτελεσματική βροχόπτωση.

Πίνακας 1. Αθροιστική και αποτελεσματική βροχόπτωση, πραγματικές αντλήσεις και ποσοστό πλεονάσματος ή ελλείμματος αντλήσεων, σε διμηνιαία βάση για το διάστημα 2008-2011.

Περίοδος	P_a (mm)	P_e (mm)	Άντληση (m ³ /στρέμμα)	Πλεόνασμα ή Έλλειμμα (m ³ /στρέμμα)	%
Απριλ-Μαιος 2008	72.5	26.9	29.05	-14.81	-50
Ιουν-Ιουλ 2008	16.5	0	231.57	127.53	55
Αυγ - Σεπ 2008	17	0	154.38	39.89	26
Απριλ-Μαιος 2009	43	10.4	35.64	8.38	24
Ιουν-Ιουλ 2009	38	12.8	320.76	-41.92	-13
Αυγ - Σεπ 2009	18	0.8	39.60	10.34	26
Απριλ-Μαιος 2010	29.5	1.7	62.00	22.01	36
Ιουν-Ιουλ 2010	93	35.8	49.60	-24.42	-49
Αυγ - Σεπ 2010	15	0	167.40	21.06	13
Απριλ-Μαιος 2011	44	6.5	37.07	18.17	49
Ιουν-Ιουλ 2011	36.5	5.3	205.57	32.33	16
Αυγ - Σεπ 2011	22	1.4	94.36	13,85	15

Τα αποτελέσματα για τα διαστήματα των αρδευτικών περιόδων δείχνουν ότι στις περισσότερες περιπτώσεις το πλεόνασμα ή έλλειμμα αρδευτικών αναγκών είναι ανάλογο με τις βροχοπτώσεις της περιόδου. Την τελευταία δεκαετία η υποβάθμιση της ποιότητας των υπόγειων υδάτων οδηγεί τους γεωργούς στην αποφυγή των αντλήσεων μετά από επεισόδια βροχόπτωσης, καθώς το βρόχινο νερό βοηθά στον καθαρισμό του εδάφους από τα άλατα των υποβαθμισμένων υπόγειων υδάτων και ευνοεί την ανάπτυξη των καλλιεργειών. Επίσης η ανάγκη για περιορισμό του αρδευτικού κόστους έχει οδηγήσει σε πιο συνετή χρήση των γεωτρήσεων, σε επιλογή λιγότερο υδροβόρων καλλιεργειών αλλά και σε εγκατάλειψη πολλών αγροτεμαχίων.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ανάλυση του δείκτη SPI-12 του βροχομετρικού σταθμού Πόρπης δείχνει την ύπαρξη παρατεταμένων περιόδων σημαντικής και μικρότερων περιόδων εξαιρετικής ξηρασίας μεταξύ 1985 και 1995. Οι εξέλιξη της πιεζομετρικής στάθμης των επιφανειακών γεωτρήσεων παρουσιάζει καλή ταύτιση με τη χρονοσειρά βροχόπτωσης αλλά οι γεωτρήσεις του υπό πίεση κύριου υδροφόρου δεν ακολουθούν την ίδια πορεία. Ο μεγάλος ρυθμός πτώσης στάθμης μεταξύ 1992 και 1997 (μέχρι και 4 μέτρα ανά έτος στα ανατολικά) δεν συσχετίζεται αποκλειστικά με τις περιόδους ξηρασίας που αναγνωρίστηκαν, επειδή η μέγιστη στάθμη του έτους 1992 είναι πολύ κοντά με την αρχική στάθμη της περιόδου ισορροπίας. Οι αντλήσεις κατά την διάρκεια της αρδευτικής περιόδου δεν παρουσιάζουν υψηλή συσχέτιση με την αντίστοιχη αρδευτική βροχόπτωση. Μια εμπειρική σχέση που προκύπτει είναι ότι λιγότερα από 100 mm ετήσιας αρδευτικής βροχόπτωσης οδηγούν σε μεγάλο ρυθμό μείωσης της στάθμης. Το πλεόνασμα ή έλλειμμα αντλήσεων σε σύγκριση με τις μέσες τιμές βροχόπτωσης δείχνει ότι υπάρχει καλή συσχέτιση μεταξύ τους η οποία όμως είναι ανισοβαρής. Δηλαδή αυξημένες τιμές βροχόπτωσης δεν οδηγούσαν σε σημαντική μείωση των αντλήσεων (μέγιστο -10%), ενώ αντίθετα χαμηλές αρδευτικές βροχοπτώσεις προκαλούσαν μεγάλη αύξηση των αντλήσεων (μέχρι και 85%). Η ανισοβαρής αυτή κατανομή οδήγησε στους μεγάλους ρυθμούς πτώσης στάθμης της δεκαετίας του 1990. Σήμερα το φαινόμενο έχει εξομαλυνθεί και το σύστημα προσεγγίζει μια κατάσταση ισορροπίας. Αυτό οφείλεται στην υποβάθμιση της ποιότητας των υπόγειων υδάτων και στην ανάγκη περιορισμού του αρδευτικού κόστους.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Aflatoon, M. and Mardaneh, M., 2011. *Time series analysis of ground water table fluctuations due to temperature and rainfall change in Shiraz plain*. Int.J. Water Res. Environ. Eng., 3(9): 176-188
- Blaney, H.F. and Criddle, W.D., 1950. *Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data*. U.S. Soil Conservation Service Technical paper 96, 48 p.
- Cancelliere, A., Di Mauro, G., Bonaccorso, B. and Rossi, G., 2007. *Drought forecasting using the Standardized Precipitation Index*. Water Resour Manag., 21: 801–819.
- Chen, Z.S. and Osadetz, M.K., 2002. *Prediction of average annual groundwater levels from climate variables: An empirical model*. J. Hydrol., 260: 102-117.
- Edwards, C.D.C. McKee, T.B. Doesken, N.J. and Kleist, J., 1997. *Historical Analysis of Drought in the United States*. 77th AMS Annual Meeting, Long Beach, California, 2-7 February, pp. 129-139.

- F.A.O. 1978. *Effective rainfall in Agriculture. FAO irrigation and drainage paper*. <http://www.fao.org/docrep/X5560E/X5560E00.htm>
- Hayes, M.J., 1999. *Drought Indices. NDMC – Drought Happens, Drought Indices*. <http://enso.unl.edu/ndmc/enigma/indices.html>
- Κουτσογιάννης, Δ. και Ξανθόπουλος, Θ., 1999. *Τεχνική Υδρολογία* (Έκδοση 3). Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, Τομέας Υδατικών Πόρων, 418 σελ.
- Lewis, J.E., 1989. *Climate change and its effects on water resources for Canada: A review*. *Can. Water Resour. J.*, 14: 35-55.
- McKee, T.B. Doesken, N.J. and Kleist, J., 1993. *The relationship of drought frequency and duration to time scales*. *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, Anaheim, California, pp. 179-184
- Petalas, C. and Diamantis, I., 1999. *Origin and distribution of saline groundwaters in the Miocene aquifer system in coastal Rhodope area, Thrace - NE Greece*. *Hydrogeol. J.*, 7(3): 305-316.
- Πεταλάς, Χ., 1997. *Ανάλυση υδροφόρων συστημάτων στο ετερογενές και παράκτιο πεδίο Ν. Ροδόπης*. Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δ.Π.Θ., Ξάνθη, 288 σελ.
- Πισινάρας, Β., 2008. *Ανάπτυξη ενός πλαισίου ολοκληρωμένης διαχείρισης πολύπλοκων συστημάτων Υπόγειων Υδατικών Πόρων*. Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Δ.Π.Θ., Ξάνθη, 322 σελ.
- Quiring, S.M., 2009. *Monitoring Drought: An Evaluation of Meteorological Drought Indices*. *Geography Compass*, 3(1): 64-88.
- Wu, H. Svoboda, M.D. Hayes, M.J. Wilhite, D.A. and Wen, F., 2007. *Appropriate application of the Standardized Precipitation Index in arid locations and dry seasons*. *Int. J. Climatol.*, 27: 65-79.

Η ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΟΔΗΓΙΑΣ 2000/60/ΕΚ ΣΤΑ ΥΔΑΤΙΚΑ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑΤΑ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ

Σ. Μίχας¹, Κ. Νικολάου¹, Θ. Τσιάλας²,

¹ ΥΔΡΟΕΞΥΓΙΑΝΤΙΚΗ Λ.Σ.ΛΑΖΑΡΙΔΗΣ και ΣΙΑ Ε.Ε.

e-mail: info@hydroex.gr

² TEM A.E. ΤΕΧΝΙΚΗ ΕΤΑΙΡΕΙΑ ΜΕΛΕΤΩΝ

e-mail: thtsialas@temsa.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η σπουδαιότητα και ο ορατός κίνδυνος ανεπάρκειας του νερού οδήγησε στην κατάρτιση και ψήφιση από το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο της Οδηγίας 2000/60/ΕΚ. Η εφαρμογή της από τα κράτη μέλη υλοποιείται με ένα σύνολο δράσεων καταλήγοντας στην κατάρτιση των Σχεδίων Διαχείρισης (ΣΔ). Στην παρούσα εργασία εξετάζονται τα 3 Υδατικά Διαμερίσματα (ΥΔ) της Πελοποννήσου. Παρουσιάζονται συνοπτικά τα Υδατικά Συστήματα (ΥΣ) καθώς και οι προστατευόμενες περιοχές. Γίνεται ανάλυση των ανθρωπογενών πιέσεων και υλοποιείται η αξιολόγηση και ταξινόμηση της συνολικής κατάστασης των ΥΣ. Παρουσιάζονται τα προτεινόμενα μέτρα, αναδεικνύονται οι δυσκολίες εφαρμογής της Οδηγίας και αναφέρονται προτάσεις για δράσεις που πρέπει να γίνουν μέχρι την 1^η αναθεώρηση των ΣΔ το 2015.

IMPLEMENTATION OF THE DIRECTIVE 2000/60/EC IN THE RIVER BASIN DISTRICTS OF PELOPONNESE

S. Michas¹, K. Nikolaou¹, Th. Tsialas²

¹ HYDROEXIGIANTIKI L.S.LAZARIDES & CO,

e-mail: info@hydroex.gr

² TEM S.A. TECHNICAL STUDIES COMPANY

e-mail: thtsialas@temsa.gr

ABSTRACT

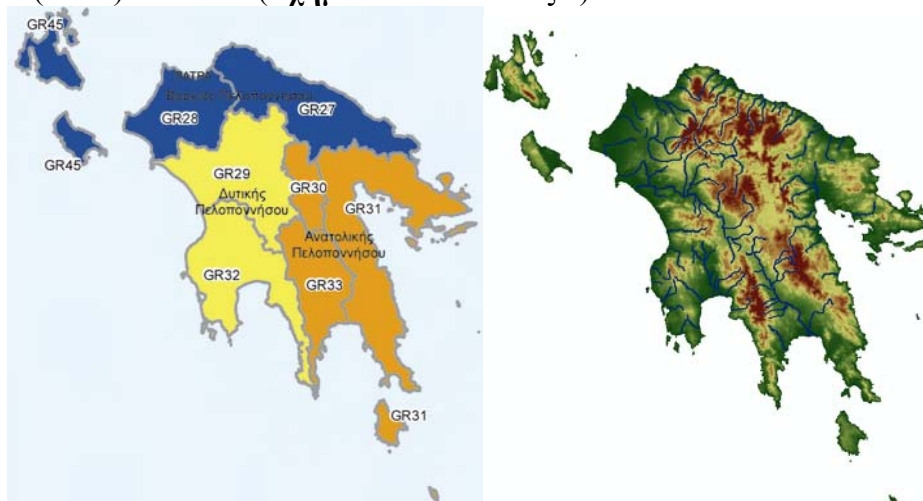
The importance and the visible danger of insufficiency of water led to the adoption from the European Parliament of Directive 2000/60/EC. The implementation of the Directive by the European member states takes place through a group of actions leading to the production of the corresponding River Basin Management Plans (RBMP). The area examined in the present study is the 3 River Basin Districts (RBD) of Peloponnese. The water bodies (WB) as well as the protected areas are concisely presented. The anthropogenic pressures are also identified and their impacts are assessed in order to classify the WB' status. The proposed measures, as incorporated in RBMP, are presented and the implementation difficulties of the Directive and the actions proposed to be taken until the first update of the RBMP in 2015 are described.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η σπουδαιότητα και ο ορατός κίνδυνος ανεπάρκειας του νερού σαν φυσικό αγαθό οδήγησε στην κατάρτιση και ψήφιση από το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο της Οδηγίας 2000/60/ΕΚ που αποτελεί ένα συνεκτικό και ολοκληρωμένο θεσμικό πλαίσιο, το οποίο είτε καταργεί είτε ενσωματώνει προηγούμενες οδηγίες. Θεμελιώδης στόχος της Οδηγίας είναι η προώθηση της μακροπρόθεσμης προστασίας των διαθέσιμων υδατικών πόρων μέσω της βιώσιμης διαχείρισης των υδάτων, επιτυγχάνοντας την καλή ποιότητα του υπόγειου και του επιφανειακού υδατικού δυναμικού. Ο στόχος αυτός μεταφράζεται σε μέτρα που αφενός θα εμποδίσουν την υποβάθμιση των υδατικών οικοσυστημάτων και αφετέρου θα αποκαταστήσουν εκείνα που ήδη έχουν υποβαθμισθεί. Η εφαρμογή της Οδηγίας από τα κράτη μέλη υλοποιείται με ένα σύνολο δράσεων σε κάθε λεκάνη απορροής ποταμού (ΛΑΠ) που ολοκληρώνονται και συνθέτουν τα Σχέδια Διαχείρισης τα οποία αναθεωρούνται ανά εξαετία. Η πρώτη εξαετία εφαρμογής των Σχεδίων Διαχείρισης λήγει το 2015 και ακολουθούν άλλες δύο αναθεωρήσεις με εξαετή χρονικό ορίζοντα για το 2021 και το 2027. Στην παρούσα, γίνεται εφαρμογή των διατάξεων της Οδηγίας 2000/60/ΕΚ στην Πελοπόννησο.

2. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΗΣ ΟΔΗΓΙΑΣ ΣΤΗΝ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟ

Σύμφωνα με την υπ' αρ. οικ. 706/2010 (ΦΕΚ Β1383/2-9-2010) απόφαση της Εθνικής Επιτροπής Υδάτων, η Πελοπόννησος χωρίστηκε σε 8 Λεκάνες Απορροής Ποταμών (ΛΑΠ) και 3 ΥΔ (Σχήμα 1 και Πίνακας 1).



Σχήμα 1. Οι 8 Λεκάνες Απορροής Ποταμών, τα 3 ΥΔ και το κύριο υδρογραφικό δίκτυο της Πελοποννήσου

Πίνακας 1. Στοιχεία των ΛΑΠ της Πελοποννήσου

Λεκάνη Απορροής	Κωδικός	ΥΔ	Έκταση (χλμ ²)
Αλφειού	GR29	01	3.810
Πάμισου – Νέδοντος – Νέδας	GR32	01	3.425
Ρεμάτων Β. Πελοποννήσου	GR27	02	3.685
Πείρου – Βέργα – Πηνειού	GR28	02	2.423
Κεφαλονιάς – Ιθάκης – Ζακύνθου (GR45)	GR45	02	1.289
Οροπεδίου Τρίπολης	GR30	03	907
Ρεμάτων Αργολικού Κόλπου	GR31	03	5.296
Ευρώτα	GR33	03	2.239

Οι αρμόδιες αρχές για θέματα διαχείρισης και προστασίας των υδατικών πόρων για την Κρατική Κεντρική Διοίκηση είναι η Ειδική Γραμματεία Υδάτων, για την Κρατική Αποκεντρωμένη Διοίκηση, η Διεύθυνση Υδάτων και για την Τοπική Αυτοδιοίκηση, η Διεύθυνση Περιβάλλοντος και Χωρικού Σχεδιασμού. Σύμφωνα με την Οδηγία, η Κρατική (Κεντρική και Αποκεντρωμένη) Διοίκηση επιφορτίζεται με την ευθύνη χάραξης της στρατηγικής προστασίας και διαχείρισης των υδάτων και η Τοπική Αυτοδιοίκηση (Περιφέρειες) κυρίως με την υλοποίηση του στρατηγικού σχεδιασμού. Τα αντικείμενα των προδιαγραφών της Οδηγίας 2000/60/ΕΚ, κατ' εφαρμογή του Ν. 3199/2003 και του ΠΔ 51/2007 συνοψίζονται παρακάτω:

2.1. ΜΗΤΡΩΟ ΠΡΟΣΤΑΤΕΥΟΜΕΝΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ

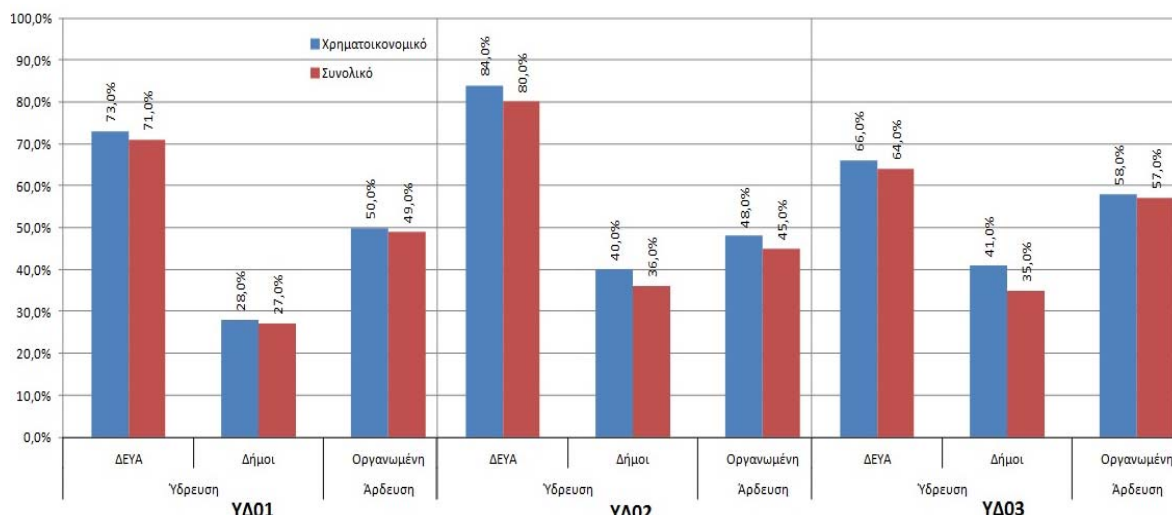
Στο Μητρώο Προστατευόμενων Περιοχών για τα 3 ΥΔ της Πελοποννήσου, συμπεριλήφθηκαν και καταγράφηκαν ΥΣ που χρησιμοποιούνται ή θα χρησιμοποιηθούν για ύδρευση (>10μ³/ημέρα ή εξυπηρέτησης >50 άτομα), περιοχές προστασίας υδρόβιων ειδών με οικονομική σημασία, ύδατα αναψυχής και κολύμβησης (Οδηγία 76/160/ΕΟΚ), περιοχές ευαίσθητες στην παρουσία θρεπτικών ουσιών (Οδηγία 91/271/ΕΟΚ), ευπρόσβλητες ζώνες σε νιτρορρύπανση (Οδηγία 91/676/ΕΟΚ), περιοχές που προορίζονται για την προστασία οικοτόπων ή ειδών, τόποι του προγράμματος «Φύση 2000» (92/43/ΕΟΚ και 79/409/ΕΟΚ) και περιοχές χαρακτηρισμένες ως χρήζουσες ειδικής προστασίας (Πίνακας 2).

Πίνακας 2. Πλήθος προστατευόμενων περιοχών στα ΥΔ της Πελοποννήσου

Είδος Προστατευόμενης περιοχής	ΥΔ01	ΥΔ02	ΥΔ03	Σύνολο
Υδατικά συστήματα υδροληψίας	5	5	4	14
Υδρόβια είδη οικονομικής σημασίας	6	6	4	16
Ύδατα αναψυχής	70	195	125	390
Ευαίσθητες περιοχές	0	0	0	0
Ευπρόσβλητες περιοχές	0	1	1	2
Προστατευόμενες φυσικές περιοχές	20	25	18	63

2.2. ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Μέσα από την αρχή της Οδηγίας «ο ρυπαίνων πληρώνει» διατυπώνεται ένας από τους πλέον βασικούς στόχους της Οδηγίας – η ανάκτηση του συνολικού κόστους των υπηρεσιών του νερού - που επηρεάζει όλους τους παραγωγικούς τομείς και όλες τις χρήσεις που συνδέονται με το νερό καθορίζοντας ταυτόχρονα τον τρόπο με τον οποίο το κόστος αυτό πρέπει να κατανεμηθεί στις χρήσεις και τους χρήστες. Η εκτίμηση του βαθμού ανάκτησης του κόστους συνίσταται στον προσδιορισμό των υπηρεσιών νερού, των φορέων παροχής, των χρηστών και των ρυπαντών, στον υπολογισμό του συνολικού κόστους των υπηρεσιών νερού, στον προσδιορισμό του μηχανισμού ανάκτησης του κόστους και κατανομής του στους χρήστες. Οι χρήσεις νερού περιλαμβάνουν το σύνολο των υπηρεσιών νερού καθώς και οποιοσδήποτε δραστηριότητες έχουν σημαντική επίπτωση στην κατάσταση του νερού. Στην εκτίμηση του βαθμού ανάκτησης του κόστους λαμβάνονται υπόψη το χρηματοοικονομικό και περιβαλλοντικό κόστος καθώς και το κόστος φυσικού πόρου. Παρακάτω παρουσιάζονται ανά ΥΔ Πελοποννήσου, διαπιστώσεις σε σχέση με την ανάκτηση κόστους στην ύδρευση και στην άρδευση (Σχήμα 2). Η συλλογή στοιχείων, τα οποία αξιολογήθηκαν και αναλύθηκαν, έγινε από ΔΕΥΑ, Δήμους, ΤΟΕΒ/ΓΟΕΒ και το ΥΠΑΑΤ.



Σχήμα 2. Ανάκτηση κόστους ανά είδος υπηρεσίας στα ΥΔ της Πελοποννήσου

2.3. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΤΥΠΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Τα ΥΣ διακρίνονται σε επιφανειακά (ποτάμια, λιμναία, μεταβατικά, παράκτια) και υπόγεια. Για τα ΥΔ Πελοποννήσου δίνονται στοιχεία ως προς το πλήθος, για κάθε κατηγορία ΥΣ (Πίνακας 3).

Πίνακας 3. Συνοπτικά στοιχεία ποτάμιων ΥΣ στα ΥΔ της Πελοποννήσου

Είδος Υδατικών Συστημάτων	ΥΔ01	ΥΔ02	ΥΔ03	Σύνολο
Ποτάμια	110	63	80	253
Λιμναία	2	6	1	9
Παράκτια	11	19	11	41
Μεταβατικά	5	9	6	20
Υπόγεια	26	26	27	79

Τα μεγαλύτερα ποτάμια στην Πελοπόννησο είναι ο Αλφειός, ο Πηνειός, ο Ευρώτας, ο Πάμισος, ο Πείρος, ο Νέδων, η Νέδα, ο Άρις, ο Ίναχος, ο Κράθις, ο Σελινούντας, ο Βουραϊκός και ο Ασωπός. Εκτός αυτών, υπάρχει και πλήθος άλλων μικρότερων ρεμάτων/ποταμών που διαχωρίστηκαν σε ένα ή περισσότερα ποτάμια ΥΣ.

Οι πιθανοί τύποι ποτάμιων ΥΣ της χώρας ανεξαρτήτως οικοπεριοχής είναι 12 (Πίνακας 4). Μπροστά από τον κωδικό του τύπου κάθε ποτάμιου ΥΣ, μπαίνει ένα λατινικό γράμμα που συμβολίζει την βιογεωγραφική περιοχή. Για τα ΥΔ01 και ΥΔ02 που ανήκουν στην οικοπεριοχή Ιονίου, τοποθετείται το Ι ενώ για το ΥΔ03 που ανήκει στην οικοπεριοχή Αιγαίου και Νότιας Ελλάδας τοποθετείται το S.

Πίνακας 4. Πιθανοί τύποι ποτάμιων ΥΣ της χώρας και οι κωδικοί τους

Κατά μήκος κλίση	Υψόμετρο α	Μικρή απορροή (<100hm ³) «s»	Μεσαία απορροή (100~2000hm ³) «m»	Μεγάλη απορροή (>2000hm ³) «g»
Ήπια (≤1,2‰) «0»	H≤700 μ «L»	sL0	mL0	gL0
	H>700μ «H»	sH0	mH0	gH0
Έντονη (>1,2‰) «1»	H≤700 μ «L»	sL1	mL1	gL1
	H>700μ «H»	sH1	mH1	gH1

Στα ΥΔ της Πελοποννήσου εμφανίζονται 6 τύποι ποτάμιων ΥΣ ανεξαρτήτου βιογεωγραφικής οικοπεριοχής (Πίνακας 5):

Πίνακας 5. Συνοπτικά στοιχεία ποτάμιων ΥΣ στα ΥΔ της Πελοποννήσου

Τύποι Ποτάμιων ΥΣ	ΥΔ 01	ΥΔ 02	ΥΔ 03	Σύνολο
μεσαίας απορροής, μικρής κλίσης, χαμηλού υψομέτρου (mL0)	10	2	3	15
μεσαίας απορροής, μεγάλης κλίσης, χαμηλού υψομέτρου (mL1)	17	6	8	31
μικρής απορροής, μεγάλης κλίσης, χαμηλού υψομέτρου (sH0)	1	1	0	2
μικρής απορροής, μεγάλης κλίσης, μεγάλου υψομέτρου (sH1)	14	12	12	38
μικρής απορροής, μικρής κλίσης, χαμηλού υψομέτρου (sL0)	9	5	6	20
μικρής απορροής, μεγάλης κλίσης, χαμηλού υψομέτρου (sL1)	59	37	51	147

Τα 9 λιμναία ΥΣ των ΥΔ της Πελοποννήσου αποτελούν οι φυσικές λίμνες Στυμφαλίας και Λάμιας, οι τεχνητές λίμνες Τάκας, Πηνειού, Φενεού και Λάδωνα και οι υπό κατασκευή ταμιευτήρες Φιλιατρινού, Αστερίου και Ασωπού που κατατάσσονται σε 2 κατηγορίες φυσικών και τεχνητών λιμναίων ΥΣ αντίστοιχα, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους (Πίνακας 6).

Πίνακας 6. Συνοπτικά στοιχεία λιμναίων ΥΣ στα ΥΔ της Πελοποννήσου

Τύποι Λιμναίων ΥΣ	ΥΔ 01	ΥΔ 02	ΥΔ 03	Σύνολο
Ταμιευτήρες, βαθιοί, μεγάλοι, ασβεστολιθικοί, λεκάνες απορροής (L-M8)	2	3	1	6
Ταμιευτήρες, βαθιοί, μεγάλοι, πυριτικοί, σε «υγρές» περιοχές, με λεκάνες απορροής < 20.000χλμ ² (L-M5/7W)	0	1	0	1
Μεσαίου-μεγάλου υψομέτρου, μεγάλης επιφάνειας, μέσου βάθους (B)	0	1	0	1
Χαμηλού υψομέτρου, μεγάλης επιφάνειας, μέσου βάθους >3μ και <6μ, πολυμεικτικού τύπου, ημίξηρης περιοχής (Γ)				

Οι τύποι των παράκτιων ΥΣ που εμφανίζονται στα ΥΔ της Πελοποννήσου είναι (Πίνακας 7):

Πίνακας 7. Συνοπτικά στοιχεία παράκτιων ΥΣ στα ΥΔ της Πελοποννήσου

Τύποι Παράκτιων ΥΣ	ΥΔ01	ΥΔ02	ΥΔ03	Σύνολο
Βραχώδεις ρηχές ακτές (C1)	0	13	1	14
Βραχώδεις βαθιές ακτές (C2)	5	0	8	13
Ιζηματικές ρηχές ακτές (C3)	0	3	1	4
Ιζηματικές βαθιές ακτές (C4)	5	3	1	9
Πολύ προστατευόμενοι Κόλποι (C5)	1	0	0	1

Η ανωτέρω τυπολογία κατά τη 2^η φάση διαβαθμονόμησης διαπιστώθηκε ότι αφενός δεν εναρμονιζόταν με τις συνθήκες αναφοράς των δεικτών, αφετέρου δημιουργούσε μεγάλο αριθμό ΥΣ. Κατά την κατάρτιση των Σχεδίων Διαχείρισης τα παράκτια ΥΣ κατηγοριοποιήθηκαν σε ένα τύπο (C1). Για λόγους πληρότητας αναφέρεται και η αρχική τυπολογία. Οι τύποι των μεταβατικών ΥΣ που εμφανίζονται στα ΥΔ Πελοποννήσου είναι οι Λιμνοθάλασσες (TW1) και οι εκβολές ποταμού (TW2).

Πίνακας 8. Συνοπτικά στοιχεία μεταβατικών ΥΣ στα ΥΔ της Πελοποννήσου

Τύποι Παράκτιων ΥΣ	ΥΔ01	ΥΔ02	ΥΔ03	Σύνολο
TW1	2	5	5	12
TW2	3	4	1	8

2.4. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΕΧΝΗΤΩΝ (ΤΥΣ) ΚΑΙ ΙΔΙΑΙΤΕΡΩΣ ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ (ΙΤΥΣ)

Τα ΥΣ που λόγω ανθρώπινης δραστηριότητας, έχουν μεταβάλει τα αρχικά τους χαρακτηριστικά και τα καθιστούν κατά μια έννοια ιδιαίτερα, εξετάζονται με ξεχωριστό τρόπο από την Οδηγία και ονομάζονται ΙΤΥΣ. Αντίστοιχα, σε ορισμένες περιπτώσεις κατασκευάζονται με ανθρώπινη πρωτοβουλία έργα, που δημιουργούν ΥΣ σε σημεία όπου προηγουμένως δεν υπήρχαν. Τέτοια ΥΣ ονομάζονται ΤΥΣ. Η βήμα προς βήμα γενική μεθοδολογία προσδιορισμού των ΤΥΣ και ΙΤΥΣ για τα ΥΔ της Πελοποννήσου διαχωρίστηκε στον αρχικό προσδιορισμό-αναγνώριση και στον οριστικό προσδιορισμό τους, εφαρμόζοντας κριτήρια. Στην Πελοπόννησο οι κυριότερες αιτίες του οριστικού προσδιορισμού των ΥΣ ως ΤΥΣ ή ΙΤΥΣ ήταν οι διευθετήσεις (Αλφειός, Πάμισος, Άρις, Νέδων, Γλαύκος, Ποταμιά, Μαριόρρεμα, Δαφνών, Ίναχος, Ξεριάς, Δερβένη και Ευρώτας), οι εκτροπές (Αλφειός, Μαριόρρεμα), τμήματα των ΥΣ ποταμών κατάντη των φραγμάτων (Πηνείος, Φιλιατρινό), οι κατασκευασμένοι (Λάδωνα, Φενεού, Πηνείου) ή οι υπό κατασκευή ταμιευτήρες (Φιλιατρινού, Αστερίου, Ασωπού), οι τεχνητές λίμνες (Τάκα) καθώς και μεγάλα λιμάνια όπως της Πάτρας (**Πίνακας 9**).

Πίνακας 9. Συνοπτικά στοιχεία ΤΥΣ και ΙΤΥΣ στα ΥΔ της Πελοποννήσου

Τύποι ΥΣ	ΙΤΥΣ			ΤΥΣ			Σύνολο
	ΥΔ01	ΥΔ02	ΥΔ03	ΥΔ01	ΥΔ02	ΥΔ03	
Ποτάμια	15	4	9	2	0	1	31
Λιμναία	2	3	1	0	1	0	7
Παράκτια	0	1	0	0	0	0	1
Μεταβατικά	0	0	0	0	0	0	0

2.5. ΤΥΠΟΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ

Στην άσκηση διαβαθμονόμησης της Μεσογειακής Γεωγραφικής Ομάδας (Mediterranean GIG) τα ποτάμια ΥΣ κατατάχτηκαν σε 5 τύπους σύμφωνα με την 2008/915/ΕΚ. Οι συνθήκες αναφοράς για τους τύπους RM1, RM2 και RM4 χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των ορίων ταξινόμησης της οικολογικής κατάστασης που αναφέρονται στην Απόφαση 2008/915/ΕΚ. Στη χώρα μας τα όρια αυτά αφορούν μόνο τα Βιολογικά Ποιοτικά Στοιχεία (ΒΠΣ) των βενθικών μακροασπονδύλων. Ως προς τα ΤΥΣ-ΙΤΥΣ, η ταξινόμηση τους δεν βασίζεται σε συνθήκες αναφοράς αλλά στο Μέγιστο Οικολογικό Δυναμικό και τα ΒΠΣ που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση των ποτάμιων ΤΥΣ-ΙΤΥΣ θα πρέπει να είναι τα πλέον ευαίσθητα σε σχέση με τις υδρομορφολογικές συνθήκες τους.

Η αξιολόγηση της οικολογικής κατάστασης όλων των τύπων φυσικών λιμναίων ΥΣ (Τύποι Α, Β, Γ και Δ) αλλά και των τύπων L-M5/7W και L-M8 των λιμναίων ΤΥΣ-ΙΤΥΣ στη χώρα μας έγινε από την εξέταση παραμέτρων που έχουν χρησιμοποιηθεί για το φυτοπλαγκτό. Τα βιολογικά στοιχεία εκτίμησης της οικολογικής ποιότητας για τα παράκτια ύδατα είναι τα μακροασπόνδυλα, τα μακροφύκη, το αγγειόσπερμα και το φυτοπλαγκτόν. Οι βασικές περιγραφικές παράμετροι των υδρομορφολογικών στοιχείων των παρακτίων ΥΣ είναι το καθεστώς παλίρροιας και τα

μορφολογικά στοιχεία (διακύμανση βάθους, δομή, υπόστρωμα βυθού). Ο καθορισμός των τυπο-χαρακτηριστικών συνθηκών αναφοράς στα μεταβατικά ύδατα είναι σε αρκετά πρώιμο στάδιο και ως εκ τούτου τιμές αντίστοιχα έως ότου προκύψουν θεσμοθετημένες συνθήκες αναφοράς μετά την ολοκλήρωση της άσκησης διαβαθμονόμησης.

2.6. ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΝΘΡΩΠΟΓΕΝΩΝ ΠΙΕΣΕΩΝ

Ως ανθρωπογενείς πιέσεις στα ΥΣ, ορίζονται το σύνολο των ανθρώπινων δραστηριοτήτων που επηρεάζουν ή μπορούν να επηρεάσουν την κατάσταση των ΥΣ της περιοχής, στην οποία αναπτύσσονται. Τα είδη των πιέσεων που υπολογίστηκαν στα ΥΔ Πελοποννήσου είναι οι σημειακές και διάχυτες πηγές ρύπων (Πίνακας 10), οι απολήψεις νερού (Πίνακας 11), τα μέτρα ρύθμισης της ροής νερού, η πιθανή διείσδυση θαλασσινού νερού, ο τεχνητός εμπλουτισμός των υπογείων ΥΣ και άλλα είδη ανθρωπογενών πιέσεων. Στις πιέσεις τέθηκαν κριτήρια ταξινόμησης σε χαμηλή, μεσαία και υψηλή ένταση. Από το σύνολο των κριτηρίων κατατάχθηκαν τα ΥΣ σε σχέση με το εάν είναι πιθανό να πετύχουν ή όχι τους περιβαλλοντικούς στόχους.

Πίνακας 10. Ποσότητες ρύπων στα ΥΔ Πελοποννήσου (τόνοι/έτος)

ΥΔ	Είδος ρύπανσης	BOD	N	P
1	Διάχυτες	2.350	1.800	75
	Σημειακές	14.800	850	285
	Σύνολο ΥΔ01	17.150	2.650	360
2	Διάχυτες	5.850	3.200	135
	Σημειακές	6.300	1.250	340
	Σύνολο ΥΔ02	12.150	4.450	475
3	Διάχυτες	3.050	2.000	80
	Σημειακές	5.600	1.800	310
	Σύνολο ΥΔ03	8.650	3.800	390
Σύνολο Πελοποννήσου		37.950	10.900	1.225

Πίνακας 11. Απολήψεις νερού για κάλυψη αναγκών στα ΥΔ Πελοποννήσου (εκ.μ3)

ΥΔ	Υδρευση / Βιομηχανία	Άρδευση	Κτηνοτροφία	Συνολική απόληψη νερού
01	72,1	279,3	3,4	354,8
02	106,9	570,6	8,2	685,7
03	54,0	481,2	5,7	540,9
Σύνολο	233,0	1.331,1	17,3	1.581,4

2.7. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΙ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΠΟΙΟΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΥΣ

Η συνολική κατάσταση ενός επιφανειακού ΥΣ, εκτιμάται συνυπολογίζοντας την οικολογική και χημική του κατάσταση. Η ταξινόμηση της οικολογικής κατάστασης /δυναμικού στηρίζεται σε 4 κατηγορίες μετρούμενων παραμέτρων που είναι οι βιολογικές, φυσικοχημικές, υδρομορφολογικές και οι ειδικοί ρύποι. Για τις κατηγορίες επιφανειακών ΥΣ, η ταξινόμηση της οικολογικής κατάστασης εκφράζεται με τη χαμηλότερη τιμή των αποτελεσμάτων της βιολογικής και φυσικοχημικής παρακολούθησης των σχετικών ποιοτικών στοιχείων. Εν γένει, η χαμηλότερη τιμή μίας παραμέτρου δίνει την τελική κατάταξη. Ανάλογα με το βαθμό απόκλισης από τις

συνθήκες αναφοράς, η οικολογική κατάσταση για τα επιφανειακά ΥΣ διαβαθμίζεται σε μια 5βάθμια χρωματική κλίμακα (**Σχήμα 3**).

<u>Οικολογική Κατάσταση</u>		<u>Χημική Κατάσταση</u>	
H	Υψηλή Κατάσταση, (High)	P	Καλή Κατάσταση (Pass)
G	Καλή Κατάσταση, (Good)	F	Κακή Κατάσταση (Fail)
M	Μέτρια Κατάσταση, (Moderate)		
P	Ελλιπής Κατάσταση, (Poor)		
B	Κακή Κατάσταση, (Bad)		

Σχήμα 3. Διαβάθμιση οικολογικής και χημικής κατάστασης επιφανειακών ΥΣ

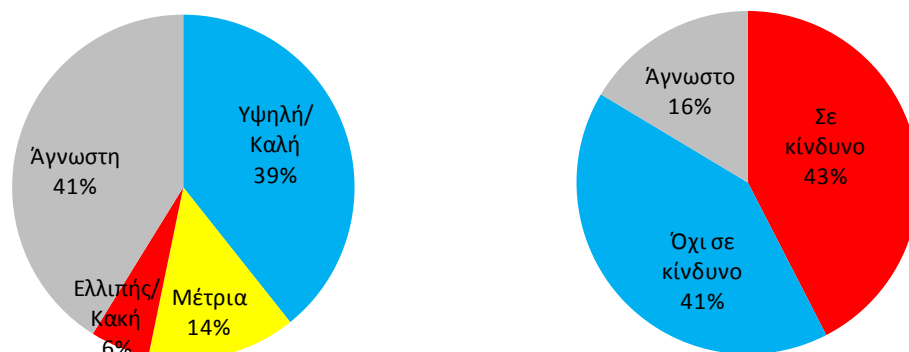
Σε σχέση με τη χημική κατάσταση, η Οδηγία ορίζει ως καλή χημική κατάσταση επιφανειακών ΥΣ, την κατάσταση στην οποία οι συγκεντρώσεις ρύπων δεν υπερβαίνουν τα Πρότυπα Περιβαλλοντικής Ποιότητας (ΠΠΠ) ΚΥΑ Η.Π. 51354/2641/Ε103. Αν τα αποτελέσματα του προγράμματος παρακολούθησης δείχνουν καλή οικολογική κατάσταση και δεν υπάρχουν υπερβάσεις στις συγκεντρώσεις ρύπων των ΠΠΠ, τότε η συνολική κατάσταση του σώματος αξιολογείται ως καλή. Στην περίπτωση που μια παράμετρος δεν είναι εντός των επιτρεπόμενων ορίων, τότε η κατάσταση του ΥΣ αξιολογείται ως μέτρια ή παρακάτω. Εκτός από την κατάσταση των ΥΣ, αντικείμενο εξέτασης αποτελεί και το αν τα ΥΣ βρίσκονται σε κίνδυνο να πετύχουν ή όχι τους περιβαλλοντικούς στόχους της Οδηγίας έως το 2015. Για την ταξινόμηση των επιφανειακών ΥΣ, έγινε αξιολόγηση των δεδομένων από τους σταθμούς παρακολούθησης των βιολογικών και χημικών στοιχείων. Επισημαίνεται ότι ικανοποιητική κάλυψη από σταθμούς και πληρότητα στοιχείων υπήρξε στις ΛΑΠ Ευρώτα και Πάμισου-Νέδοντος-Νέδα όπου είχαν εκπονηθεί εξειδικευμένες μελέτες μέσω του Life και από το ΕΛΚΕΘΕ αντίστοιχα ενώ στις υπόλοιπες περιοχές λόγω της έλλειψης στοιχείων μετρήσεων, όπου ήταν εφικτό, η αξιολόγηση έγινε και με τη βοήθεια γνώμης ειδικών εμπειρογνομόνων. Στατιστικά στοιχεία της κατάστασης και του κινδύνου επίτευξης των περιβαλλοντικών στόχων στα ΥΣ των ΥΔ Πελοποννήσου παρουσιάζονται στη συνέχεια (Πίνακας 12, **Πίνακας 13** και Σχήμα 4):

Πίνακας 12. Συνοπτικά στοιχεία κατάστασης επιφανειακών ΥΣ στην Πελοπόννησο

Είδος ΥΣ	Πλήθος ΥΣ	Υψηλή/καλή	Μέτρια	Ελλιπής/κακή	Άγνωστη
Ποτάμια	253	92 (36%)	37 (15%)	16 (6%)	108 (43%)
Λίμνες	9	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	9 (100%)
Παράκτια	41	33 (81%)	3 (7%)	0 (0%)	5 (12%)
Μεταβατικά	20	2 (10%)	5 (25%)	2 (10%)	11 (55%)
Σύνολο ΥΣ	323	127 (39%)	45 (14%)	18 (6%)	133 (41%)

Πίνακας 13. Συνοπτικά στοιχεία κατάστασης κινδύνου επίτευξης των περιβαλλοντικών στόχων στα επιφανειακά ΥΣ των ΥΔ Πελοποννήσου

Είδος ΥΣ	Πλήθος ΥΣ	Σε κίνδυνο	Όχι σε κίνδυνο	Άγνωστο
Ποτάμια	253	92 (36%)	37 (15%)	16 (6%)
Λίμνες	9	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)
Παράκτια	41	33 (81%)	3 (7%)	0 (0%)
Μεταβατικά	20	2 (10%)	5 (25%)	2 (10%)
Σύνολο ΥΣ	323	127 (39)	45 (14%)	18 (6%)

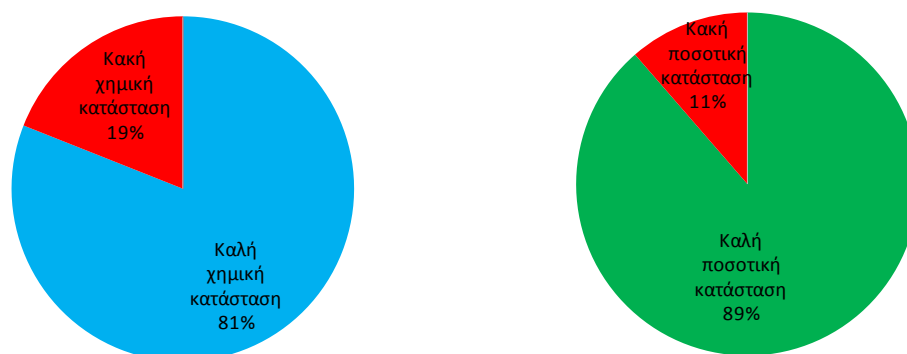


Σχήμα 4. Στατιστικά στοιχεία κατάστασης και κινδύνου επίτευξης των περιβαλλοντικών στόχων για τα επιφανειακά ΥΣ των ΥΔ Πελοποννήσου

Για τα υπόγεια ΥΣ εξετάζεται η χημική τους κατάσταση όπως και στα επιφανειακά ΥΣ καθώς και η καλή ή κακή ποσοτική τους κατάσταση. Επιπλέον συνυπολογίζεται εάν τα υπόγεια ΥΣ εμφανίζουν τάση αύξησης των ρύπων ή τάση πτώση της στάθμης τους με σκοπό να εκτιμηθεί η επίτευξη των περιβαλλοντικών στόχων των ΥΥΣ έως το 2015. (Πίνακας 14 και Σχήμα 5).

Πίνακας 14. Συνοπτικά στοιχεία κατάστασης υπόγειων ΥΣ στα ΥΔ Πελοποννήσου

Είδος ΥΣ	Πλήθος ΥΣ	Καλή Χημική κατάσταση	Τάση αύξησης ρύπων	Καλή Ποσοτική κατάσταση	Τάση Πτώσης στάθμης
Υπόγεια	79	64 (81%)	33 (42%)	70 (87%)	21 (27%)



Σχήμα 5. Στατιστικά στοιχεία χημικής και ποσοτικής κατάστασης υπογείων ΥΣ στα ΥΔ Πελοποννήσου

2.8. ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΕΝΑ ΝΕΑ ΕΡΓΑ

Για το σύνολο των προγραμματιζόμενων, μελετημένων ή υπό μελέτη έργων σχετικών με τους υδατικούς πόρους και σε σχέση με το ενδεχόμενο να επηρεάσουν την επίτευξη των περιβαλλοντικών στόχων των ΥΣ, αξιολογήθηκε η ωριμότητα υλοποίησης τους έως το 2015 και η σημαντικότητα ως προς τα κοινωνικοοικονομικά οφέλη που αναμένεται να αποδώσουν. Η ιεράρχηση των έργων για τα ΥΔ Πελοποννήσου έγινε με βάση τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους, την κατάσταση των ΥΣ που επηρεάζονται αλλά και με μια διαδικασία τεκμηρίωσης μη ύπαρξης εναλλακτικά καλύτερων λύσεων. Υπό αυτό το πρίσμα, εξετάστηκαν και έργα που μπορεί να μην έχουν υψηλό βαθμό ωριμότητας υλοποίησης έως το 2015 αλλά ενδεχόμενη κατασκευή τους θα έχει σημαντικές επιπτώσεις στην επίτευξη των περιβαλλοντικών στόχων των ΥΣ που θα επηρεασθούν. Αντίθετα δεν εξετάστηκαν έργα μικρής εμβέλειας/παρεμβάσεις (π.χ.

μικρά αρδευτικά δίκτυα) που δεν αναμένεται να επηρεάσουν την κατάσταση των ΥΣ ή που αναμένεται να έχουν θετική επίδραση, στην επίτευξη των περιβαλλοντικών στόχων των ΥΣ (ΕΕΛ, αποκαταστάσεις ΧΑΔΑ, αντικατάσταση δικτύων κλπ). Έργα τα οποία δεν προβλέπεται να ολοκληρωθούν μέχρι το 2015 ή άλλα νέα έργα, θα προταθούν, εξεταστούν και αξιολογηθούν ως προς τις επιπτώσεις τους σχετικά με τους στόχους της Οδηγίας, έτσι ώστε να ληφθούν υπ' όψη στις επόμενες αναθεωρήσεις των Σχεδίων Διαχείρισης. Τα σημαντικότερα από τον κατάλογο κύριων νέων έργων/δραστηριοτήτων για το ΥΔ01 είναι η επέκταση των έργων ύδρευσης από τον Ερύμανθο, το φράγμα Φιλιατρινού, τα έργα ενίσχυσης ύδρευσης Μεσσήνης από την πηγή Αγίου Παύλου και Καλαμάτας, Μεσσήνης, Δ. Μάνης από την πηγή Αγίου Φλώρου. Για το ΥΔ02, τα σημαντικότερα μέσα από τον κατάλογο των κύριων έργων είναι τα φράγματα Ασωπού και Αστερίου, τα έργα ύδρευσης Δ. Κορινθίων, η επέκταση διώρυγας Πηνειού και τα έργα ύδρευσης από ΤΛ Πηνειού. Στο ΥΔ03, αντίστοιχα με τα παραπάνω, είναι τα έργα ύδρευσης Τρίπολης από τις γεωτρήσεις Σάγκα και Α. Μάνης από πηγές της Αγίας Μαρίνας, τα έργα ύδρευσης και άρδευσης από την πηγή Κιβερίου (Ανάβαλος), τα φράγματα Κελεφίνας, Τάνου και Ρόρου Τζερετζελιάς, τα αρδευτικά δίκτυα Τάκας και ο αγωγός μεταφοράς νερού από Ευρώτα και πηγές Βασιλοποτάμου σε περιοχές Δ. Έλους, Μολάους και Ασωπού Λακωνίας. Τέλος, για όλα τα ΥΔ Πελοποννήσου προγραμματίζεται πλήθος μικρών υδροηλεκτρικών έργων.

2.9. ΒΑΣΙΚΑ ΚΑΙ ΣΥΜΠΛΗΡΩΜΑΤΙΚΑ ΜΕΤΡΑ

Στην μελέτη για τα ΥΔ της Πελοποννήσου συντάχθηκε το Πρόγραμμα μέτρων το οποίο αποτελεί τον μηχανισμό επίτευξης των περιβαλλοντικών στόχων στα ΣΔ. Η διάκριση τους σε βασικά και συμπληρωματικά διαμορφώνει δύο επίπεδα παρεμβάσεων. Στα βασικά μέτρα οργανώνονται οι ενέργειες εκείνες που προκύπτουν από την Κοινοτική νομοθεσία που σχετίζεται με την περιβαλλοντική προστασία, καθώς επίσης και οι βασικές ενέργειες που τεκμαίρονται από την Οδηγία. Στα συμπληρωματικά μέτρα εντάσσονται οι πρόσθετες ενέργειες που πρέπει να γίνουν για εκείνα τα ΥΣ που υπάρχει κίνδυνος μη επίτευξης των περιβαλλοντικών τους στόχων. Για τις δυο κατηγορίες μέτρων έγινε η ανάλυση κόστους σε σχέση με την αποδοτικότητά τους.

2.10. ΕΞΑΙΡΕΣΕΙΣ

Οι Εξαιρέσεις αποτελούν αναπόσπαστο μέρος των περιβαλλοντικών στόχων. Οι προθεσμίες για την επίτευξη τους μπορούν να παρατείνονται υπό την προϋπόθεση ότι δεν υποβαθμίζεται περαιτέρω η κατάσταση του πληττόμενου ΥΣ ή εφόσον τα κράτη μέλη διαπιστώνουν ότι δεν είναι ευλόγως δυνατόν να επιτευχθούν όλες οι απαιτούμενες βελτιώσεις της κατάστασης του ΥΣ εντός των προθεσμιών, για τεχνικούς, φυσικούς ή οικονομικούς λόγους. Οι παρατάσεις περιορίζονται σε δύο το πολύ περαιτέρω ενημερώσεις των ΣΔ (6+6 έτη), εκτός από περιπτώσεις που οι φυσικές συνθήκες είναι τέτοιες ώστε οι στόχοι να μην είναι δυνατόν να επιτευχθούν εντός της περιόδου αυτής όπως σε ορισμένα υπόγεια ΥΣ της Πελοποννήσου (**Πίνακας 15**):

3. ΔΙΑΒΟΥΛΕΥΣΗ

Πριν από την οριστική διαμόρφωση, τα προσχέδια διαχείρισης και τα κείμενα τεκμηρίωσής τους, η ΣΜΠΕ και το πρόγραμμα μέτρων της Πελοποννήσου τίθενται για 6 μήνες σε δημόσια διαβούλευση με σκοπό την ενημέρωση του κοινού και την υποβολή απόψεων από κάθε ενδιαφερόμενο.

Πίνακας 15. Συνοπτικά στοιχεία ΥΣ εξαιρέσεων στα ΥΔ Πελοποννήσου

Είδος ΥΣ	Πλήθος	Εξαιρέσεις ΥΔ01	Εξαιρέσεις ΥΔ02	Εξαιρέσεις ΥΔ03	Σύνολο
Ποτάμια	253	11	3	20	34
Λίμνες	9	0	0	0	0
Παράκτια	41	0	0	0	0
Μεταβατικά	20	0	1	1	2
Υπόγεια	79	2	4	9	15

Τα ανωτέρω αναρτήθηκαν στην διαδραστική ιστοσελίδα <http://wfd.opengov.gr/> από την Ειδική Γραμματεία Υδάτων του ΥΠΕΚΑ, η οποία σε συνεργασία με τις Αποκεντρωμένες Διοικήσεις της χώρας, έχει και την ευθύνη ως προς τη διαδικασία διαβούλευσης προκαλώντας ένα δημόσιο και διαφανή διάλογο. Σκοπός της δημόσιας διαβούλευσης των ΣΔ των ΥΔ της Πελοποννήσου είναι η ενημέρωση, διαβούλευση και η ενεργός συμμετοχή της μέγιστης δυνατής μερίδας των φορέων λήψης αποφάσεων και όλων εκείνων που έχουν ρόλο εφαρμογής στη διαχείριση των υδάτων. Στο πλαίσιο αυτό διοργανώθηκαν ημερίδες και σεμινάρια στις μεγαλύτερες πόλεις των ΥΔ της Πελοποννήσου, ανοικτά σε όλους τους εμπλεκόμενους φορείς και το ευρύτερο κοινό, για ενημέρωση και ανταλλαγή απόψεων. Τέλος στα πλαίσια της δημόσιας διαβούλευσης συντάχθηκαν και συμπληρώθηκαν ερωτηματολόγια για την διατύπωση παρατηρήσεων/προτάσεων/κρίσεων επί της διαδικασίας της διαβούλευσης, των σημαντικών ζητημάτων νερού και του προγράμματος μέτρων.

4. ΔΥΣΚΟΛΙΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΗΣ ΟΔΗΓΙΑΣ ΣΤΑ ΥΔ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ

Κατά την εφαρμογή της Οδηγίας στα ΥΔ της Πελοποννήσου παρουσιάστηκαν προβλήματα που έγκεινται τόσο στην έλλειψη ή την προβληματική παροχή δεδομένων και στοιχείων από φορείς σε τοπικό ή και εθνικό επίπεδο όσο και στην μη ολοκληρωμένη προσέγγιση ορισμένων ζητημάτων, από ομάδες εργασίας της ΕΕ, που σχετίζονται με την εφαρμογή της Οδηγίας. Τα προβλήματα που παρουσιάστηκαν σε εθνικό επίπεδο αλλά και ειδικότερα σε επίπεδο ΥΔ Πελοποννήσου ήταν τα παρακάτω:

- Προβληματικά, σε ορισμένες περιπτώσεις, όρια των ΛΑΠ και των ΥΔ
- Μικρή κάλυψη των ποτάμιων, μεταβατικών και παράκτιων ΥΣ από σταθμούς παρακολούθησης με λίγα δεδομένα οικολογικών και χημικών παραμέτρων. Στα λιμναία ΥΣ της περιοχής δεν υπήρχε κανένας σταθμός παρακολούθησης.
- Μη επαρκή κάλυψη ή ελλιπείς χρονοσειρές δεδομένων από μετεωρολογικούς, υδρομετρικούς και σταθμούς μέτρησης στάθμης σε ποτάμια και λιμναία ΥΣ.
- Δυσκολίες ως προς την πληρότητα συλλογής στοιχείων που θα συμπλήρωναν και θα τεκμηρίωναν σε μεγαλύτερο βαθμό, αντικείμενα που εξετάστηκαν στο πλαίσιο των απαιτήσεων της Οδηγίας όπως τα στοιχεία των πιέσεων.
- Μη διαθέσιμα πληθυσμιακά στοιχεία της απογραφής του 2011.
- Μικρή ανταπόκριση στη συμπλήρωση ερωτηματολογίων από πολίτες και φορείς
- Συγχωνεύσεις και αναδιοργάνωση υπηρεσιών για την μετάβασή τους στις απαιτήσεις του προγράμματος Καλλικράτη. Μη επαρκώς επανδρωμένα τμήματα.

Τα γενικά προβλήματα που σχετίζονται με την ελλιπή προσέγγιση ζητημάτων που σχετίζονται με την εφαρμογή της Οδηγίας από ομάδες εργασίας της ΕΕ είναι:

- Η πρώτη άσκηση διαβαθμονόμησης δεν ολοκληρώθηκε και εξελίσσεται η δεύτερη.
- Η ταξινόμηση των ποτάμιων ΥΣ ως προς τα ΒΠΣ γίνεται με τα Βενθικά Μακροασπόνδυλα, αφού για τα υπόλοιπα δεν είναι εφικτό να προσδιορισθούν τα όρια των κλάσεων ταξινόμησης.

- Καθυστερήσεις στον καθορισμό φυσικοχημικών και υδρομορφολογικών προτύπων με αποτέλεσμα να μην είναι εφικτός ο καθορισμός συνθηκών αναφοράς αλλά και τα όρια κλάσεων μεταξύ υψηλής, καλής κατάστασης κλπ.
- Για τα ΙΤΥΣ-ΤΥΣ ποτάμια ΥΣ δεν έχει γίνει καμία πρόοδος στον καθορισμό του μέγιστου οικολογικού δυναμικού από τις ομάδες διαβαθμονόμησης.
- Όπως και για τα ποτάμια έτσι και για τα λιμναία ΥΣ δεν έχουν καθοριστεί συνθήκες αναφοράς για τα φυσικοχημικά και υδρομορφολογικά χαρακτηριστικά.
- Δεν προβλέπεται κωδικοποίηση των λεκανών απορροής των ΥΣ

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Η πρώτη εφαρμογή της Οδηγίας λαμβάνοντας υπόψη τα Κατευθυντήρια Κείμενα της ΕΕ, την εμπειρία εφαρμογής άλλων κρατών μελών και τις κατευθύνσεις της Ειδικής Γραμματείας Υδάτων πέρα από το πρίσμα της εκπλήρωσης των υποχρεώσεών μας ως χώρας στην ΕΕ, αποτελεί τη βάση μιας ολοκληρωμένης διαχείρισης των υδατικών πόρων που εξορισμού εισάγει πολλές καινοτόμες αντιλήψεις και προσεγγίσεις.

Παράλληλα όμως, καταδεικνύει αδυναμίες και προβλήματα εφαρμογής για τα οποία θα πρέπει να υλοποιηθούν ενέργειες/δράσεις μέχρι την πρώτη αναθεώρηση των σχεδίων διαχείρισης (2015). Οι ενέργειες αυτές προτείνονται σε εθνικό και τοπικό επίπεδο μέσα από το πρόγραμμα βασικών και συμπληρωματικών μέτρων αντίστοιχα του ΣΔ. Εκτός του πλαισίου των μέτρων αυτών, η ολοκλήρωση δράσεων που βρίσκονται σε εξέλιξη όπως η διοικητική αναδιάρθρωση μέσω του Προγράμματος Καλλικράτη, η παροχή των πληθυσμιακών στοιχείων της απογραφής του 2011 από την ΕΣΥΕ, η εγρήγορση και ευαισθητοποίηση σε ζητήματα υδατικών πόρων και η ανταπόκριση κυρίως των αρμόδιων φορέων στη συλλογή στοιχείων που σχετίζονται με το νερό και τη διαχείρισή του, θα συμβάλλουν σε τοπικό και εθνικό επίπεδο στη πληρότητα των ΣΔ στην επόμενη διαχειριστική περίοδο. Παράλληλα σε κοινοτικό επίπεδο, η ολοκλήρωση από τις ομάδες εργασίας των ασκήσεων διαβαθμονόμησης, του καθορισμού συνθηκών αναφοράς για όλα τα ΥΣ και της κωδικοποίησης λεκανών απορροής θα αποτελέσουν σημαντικό παράγοντα στην αρτιότερη εφαρμογή των ΣΔ για την επόμενη διαχειριστική περίοδο (2015-2021).

Τέλος η εμπειρία που αποκτήθηκε στην εφαρμογή των απαιτήσεων της Οδηγίας θα αποτελέσει αρωγός για τη στοχευμένη και αποτελεσματική αντιμετώπιση προβλημάτων, που πιθανόν να προκύψουν στις αναθεωρήσεις των Σχεδίων Διαχείρισης.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Οδηγία 2000/60/ΕΚ . Οδηγία 2000/60/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 23^{ης} Οκτωβρίου 2000 για τη θέσπιση πλαισίου κοινοτικής δράσης στο τομέα της πολιτικής των υδάτων. Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο, Ευρωπαϊκή Επιτροπή

Guidance Documents 01-27. *Common Implementation Strategy for the Water Framework Directive (2000/60/EC)*. European Commission

Παρατήρηση: Η διαδικασία διαβούλευσης για τα 3 ΥΔ Πελοποννήσου βρίσκεται σε εξέλιξη έως το φθινόπωρο του 2012. Συνεπώς στοιχεία που παρουσιάζονται στη παρούσα, δύναται να επικαιροποιηθούν ή να τροποποιηθούν μέχρι την οριστικοποίηση των Σχεδίων Διαχείρισης.

Ε

**ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΓΡΩΝ ΚΑΙ ΣΤΕΡΕΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ ΥΔΑΤΩΝ
ΥΔΡΟΒΙΟΤΟΠΟΙ**

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΜΙΚΡΟΦΥΚΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΜΕΤΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΛΥΜΑΤΩΝ

Α.Φ. Αραβαντινού¹, Μ.Α. Θεοδωρακόπουλος², Ι.Δ. Μαναριώτης³

Εργαστήριο Τεχνολογίας του Περιβάλλοντος, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών
Πανεπιστήμιο Πατρών, 265 00 Πάτρα

e-mail: andriana.arvantinou@gmail.com¹, theodorakopoulosm@hotmail.com²,
idman@upatras.gr³

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία αρχικά πραγματοποιήθηκαν καλλιέργειες δέκα ειδών μικροφυκών που συναντώνται σε γλυκά και αλμυρά νερά. Τρία στελέχη που συναντώνται σε γλυκά νερά επιλέχθηκαν, με βάση το ρυθμό ανάπτυξης, για τη διεξαγωγή πειραμάτων διαλείποντος έργου σε συνθετικό υπόστρωμα, το *Scenedesmus rubescens* (SAG 5.95), το *Neochloris vigensis* (SAG 80.80) και το *Chlorococcum spec.* (SAG 22.83). Το *Scenedesmus rubescens* παρουσίασε το μεγαλύτερο ρυθμό ανάπτυξης. Η αφαίρεση φωσφόρου που παρατηρήθηκε, από συνθετικό υποστρώμα με αρχική συγκέντρωση φωσφόρου 6 -7 mg/L, ήταν 53, 25 και 11% για το *Neochloris vigensis*, το *Chlorococcum spec.* και το *Scenedesmus rubescens*, αντίστοιχα. Τέλος, η περιεκτικότητα των φυκών σε λιπίδια μεταβάλλεται με το χρόνο και οι μεγαλύτερες τιμές παρατηρήθηκαν σε 20 d από την έναρξη της καλλιέργειας.

INVESTIGATION OF MICROALGAE GROWTH DURING WASTEWATER POSTTREATMENT

A.F. Aravantinou¹, M.A. Theodorakopoulos², I.D. Manariotis³

Environmental Engineering Laboratory, Department of Civil Engineering,
University of Patras, Patras 26500, Greece.

e-mail: andriana.arvantinou@gmail.com¹, theodorakopoulosm@hotmail.com²,
idman@upatras.gr³

ABSTRACT

In the present study, ten microalgal species were cultured that inhabit in fresh and saline waters. Three freshwater strains were selected, based on their growth rate, for the batch experiments with synthetic substrate; the *Scenedesmus rubescens* (SAG 5.95), the *Neochloris vigensis* (SAG 80.80), and the *Chlorococcum spec.* (SAG 22.83). The greater growth rate was observed with *Scenedesmus rubescens*. Phosphorus removal with initial phosphate concentration 6-7 mg/L in the synthetic substrate, was 53, 25 and 11% for *Neochloris vigensis*, *Chlorococcum spec.*, and *Scenedesmus rubescens*, respectively. Finally, the highest values of the concentration of lipids in algae, were observed at the 20th day of cultivation.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η επεξεργασία λυμάτων με μικροφύκη έχει εξεταστεί αρκετά στο παρελθόν, σαν ένα σύστημα επεξεργασίας χαμηλού κόστους, ιδιαίτερα σε περιοχές που υπάρχει διαθέσιμη γη, ηλιοφάνεια και υψηλή θερμοκρασία περιβάλλοντος. Τα επεξεργασμένα λύματα περιέχουν υψηλές συγκεντρώσεις, θρεπτικών (άζωτο και φώσφορο) και ποικιλία ιχνοστοιχείων, όπως K, Ca, Mg, Fe, Cu, και Mn, απαραίτητα θρεπτικά συστατικά για την ανάπτυξη των μικροφυκών και το μεταβολισμό τους (Li *et al.*, 2011). Τα επεξεργασμένα λύματα, όπως είναι η εκροή από τη δευτεροβάθμια επεξεργασία, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως υπόστρωμα για την καλλιέργεια μικροφυκών (Hammouda *et al.*, 1995; Hoffmann, 1998). Η χρησιμοποίηση των μικροφυκών έχει προταθεί για την αφαίρεση θρεπτικών στα λύματα και έχει βρει ευρεία εφαρμογή τα τελευταία χρόνια στο στάδιο της τριτοβάθμιας επεξεργασίας λυμάτων (Kim *et al.*, 2003, Pizarro *et al.*, 2006, Khan and Yoshida, 2008).

Τελευταία, υπάρχει έντονο ερευνητικό ενδιαφέρον για την παραγωγή βιοκαυσίμων από τα φύκη λόγω της υψηλής τους περιεκτικότητας σε λιπίδια. Η παραγωγικότητα των φυκών σε λιπίδια είναι 15-300 φορές μεγαλύτερη από αυτήν των συμβατικών καλλιεργειών (Christi, 2008). Επίσης, η χρησιμοποίηση των φυκών πλεονεκτεί έναντι των βιοκαλλιεργειών που χρησιμοποιούνται για βιοκαύσιμα καθώς δεν απαιτούνται καλλιεργήσιμες εκτάσεις (Christi *et al.*, 2008, Hu *et al.*, 2008).

Προηγούμενες μελέτες έδειξαν την επιτυχία της επεξεργασίας με φύκη στον καθαρισμό αστικών λυμάτων τα οποία ήταν πλούσια σε αζωτούχες ενώσεις και φώσφορο (Li *et al.*, 2011; Zhou *et al.*, 2011). Σε συνδυασμό με την επεξεργασία λυμάτων, έχουν χρησιμοποιηθεί μόνο λίγα είδη μικροφυκών από την οικογένεια *Chlorella*, όπως *Chlorella pyrenoidosa* (Tam & Wong, 1989, 1990; Cheung & Wong, 1981), και *Chlorella vulgaris* (Lau *et al.*, 1995, 1998), ενώ άλλα γένη δεν έχουν μελετηθεί αρκετά. Αν και αυτά τα δοκιμασμένα στελέχη δείχνουν εξαιρετική προσαρμογή στα λύματα, η συγκέντρωση βιομάζας των φυκών και η περιεκτικότητα τους σε λιπίδια δεν είναι ικανοποιητικές για παραγωγή βιοκαυσίμου (Deng *et al.*, 2009; Mata *et al.*, 2009; Sialve *et al.*, 2009; Li *et al.*, 2008; Chisti, 2007). Για το λόγο αυτό, τα φύκη που θα χρησιμοποιηθούν πρέπει να πληρούν διάφορα κριτήρια όπως η ικανότητα επιβίωσης στα λύματα σε συνάρτηση με τη συγκέντρωση οργανικού υλικού, τη δυνατότητα καλλιέργειας σε υψηλή πυκνότητα κυτταρικού δυναμικού, την υψηλή περιεκτικότητα σε λιπίδια και την ικανότητα ανάπτυξης σε συνδυασμό με ετερότροφα. Η χρήση των λυμάτων στην καλλιέργεια φυκών θα μπορούσε να έχει διπλό ρόλο, αυτόν της μείωσης του ρυπαντικού φορτίου των λυμάτων και της αξιοποίησης των μικροφυκών για παραγωγής βιομάζας - ενέργειας.

Η εργασία αυτή θα παρουσιάσει τα αρχικά αποτελέσματα μίας ερευνητικής μελέτης που στοχεύει στη διερεύνηση της καλλιέργειας επιλεγμένων ειδών μικροφυκών με συνθετικό υπόστρωμα. Ειδικότερα, εξετάζεται η ανάπτυξη των μικροφυκών, η αφαίρεση θρεπτικών συστατικών και η παραγωγή λιπιδίων από τα μικροφύκη σε πειράματα διαλείποντος έργου. Επίσης, γίνεται αναγνώριση των μικροφυκών που υπάρχουν σε επεξεργασμένα λύματα.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.1 ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ ΚΑΙ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΜΙΚΡΟΦΥΚΩΝ

Στην παρούσα εργασία συλλέχθηκαν δείγματα από τη δευτεροβάθμια εκροή των Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ) του Πανεπιστημίου Πατρών και της Αμαλιάδας. Η λήψη των δειγμάτων και στις δυο ΕΕΛ πραγματοποιήθηκε τον Απρίλιο 2012. Τα δείγματα συλλέχθηκαν σε πλαστικά δοχεία των 500 mL, και

μεταφέρθηκαν στο εργαστήριο για ποιοτική ανάλυση. Η αναγνώριση των φυτοπλαγκτονικών οργανισμών πραγματοποιήθηκε με μικροσκοπική ανάλυση, η οποία έγινε σε οπτικό μικροσκόπιο Leica DMLB. Η ταξινόμηση των ειδών στηρίχθηκε στα ταξινομικά συγγράμματα των Canter-Lund & Lund (1996), και σε εργασίες ταξινομικού χαρακτήρα (Temponeras *et al.*, 2000).

2.2 ΕΠΙΛΟΓΗ ΜΙΚΡΟΦΥΚΩΝ

Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται βιβλιογραφικά στοιχεία για την περιεκτικότητα και το ρυθμό παραγωγής λιπιδίων αναφορικά με το είδος των μικροφύκων που συναντώνται σε γλυκά και αλμυρά ύδατα (Mata *et al.*, 2009). Παρατηρείται σημαντική διαφοροποίηση στην περιεκτικότητα σε λιπίδια ακόμα και στο ίδιο είδος. Με κύριο κριτήριο την παρουσία των μικροφυκών στα αστικά λύματα και την παραγωγή λιπιδίων επιλέχθηκαν για περαιτέρω μελέτη 10 διαφορετικά στελέχη μικροφυκών (Πίνακας 2). Τα 8 στελέχη ελήφθησαν από την τράπεζα SAG Culture Collection του University of Göttingen και 2 στελέχη από το Εργαστήριο Μικροβιολογίας, Τμήματος Βιολογίας του Πανεπιστημίου Πατρών.

Το κάθε μικροφύκος καλλιεργήθηκε σε αποστειρωμένες κωνικές φιάλες χωρητικότητας 1 L. Η κάθε καλλιέργεια αποτελείτο από 900 ml αποστειρωμένο συνθετικό υπόστρωμα και 100 ml προκαλλιέργειας φυκών. Το συνθετικό υπόστρωμα που χρησιμοποιήθηκαν στις καλλιέργειες των φυκών αντιστοιχεί σε λύματα από την εκροή μιας δευτεροβάθμιας ΕΕΛ και αποτελείτο από το θρεπτικό μέσο BG-11 (Feng *et al.*, 2011) με την εξής σύσταση: Na_2CO_3 (20 mg/L), NaNO_3 (1500 mg/L), $\text{Na}_2\text{Mg EDTA}$ (1 mg/L), Ferric ammonium citrate (6 mg/L), Citric acid· $1\text{H}_2\text{O}$ (6 mg/L), $\text{CaCl}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (36 mg/L), $\text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (75 mg/L), K_2HPO_4 (30,5 mg/L), H_3BO_3 (2,86 mg/L), $\text{MnCl}_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (1,81 mg/L), $\text{ZnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (0,222 mg/L), $\text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (0,079 mg/L), $\text{CoCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (0,050 mg/L), $\text{NaMoO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (0,391 mg/L). Οι προκαλλιέργειες των φυκών προέρχονταν από καλλιέργειες, οι οποίες βρίσκονταν στην εκθετική φάση ανάπτυξης. Οι φιάλες επωάστηκαν σε ελεγχόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες με θερμοκρασία $21\pm 2^\circ\text{C}$, ένταση φωτοσυνθετικής ακτινοβολίας $22 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (Lightscout, Quantum Light Meters), και συνεχή παροχή αέρα (αντλία αέρα, HP-400, Sunsun). Οι καλλιέργειες του κάθε φύκου πραγματοποιήθηκαν εις διπλούν. Η διάρκεια των πειραμάτων ήταν 30 d, όπου σε τακτά χρονικά διαστήματα γινόταν λήψη δειγμάτων, ώστε να γίνεται έλεγχος της φυτοπλαγκτονικής αύξησης των φυκών.

2.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΔΙΑΛΕΙΠΟΝΤΟΣ ΕΡΓΟΥ

Τα τρία στελέχη τα οποία επιλέχθηκαν για τη διεξαγωγή πειραμάτων διαλείποντος έργου σε συνθετικό υπόστρωμα ήταν το *Scenedesmus rubescens* (SAG 5.95), το *Neochloris vigensis* (SAG 80.80) και το *Chlorococcum spec.* (SAG 22.83). Το κάθε μικροφύκος καλλιεργήθηκε σε αποστειρωμένες κωνικές φιάλες χωρητικότητας 2 L. Η κάθε καλλιέργεια αποτελείτο από 1800 mL αποστειρωμένο συνθετικό υπόστρωμα και 200 mL προκαλλιέργειας φυκών. Η συγκέντρωση της βιομάζας στις προκαλλιέργειες ήταν 16,4, 16,2 και 16,2 g/L για το *Scenedesmus rubescens* (SAG 5.95), το *Neochloris vigensis* (SAG 80.80) και το *Chlorococcum spec.* (SAG 22.83), αντίστοιχα.

Το συνθετικό υπόστρωμα που χρησιμοποιήθηκαν στις καλλιέργειες των φυκών αποτελούνταν από το θρεπτικό μέσο BG-11. Οι φιάλες επωάστηκαν σε ελεγχόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες με θερμοκρασία $22\pm 2^\circ\text{C}$, ένταση φωτός $22 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$

Πίνακας 1: Παραγωγή και περιεκτικότητα λιπιδίων ανά είδος μικροφύκους.

Είδος μικροφυκών σε γλυκά και αλμυρά νερά	Περιεκτικότητα λιπιδίων (% του ξηρού βάρους της βιομάζας)	Ρυθμός παραγωγής λιπιδίων (mg/L.d)
<i>Ankistrodesmus sp.</i>	24,0-31,0	-
<i>Botryococcus braunii</i>	25,0-75,0	-
<i>Chaetoceros muelleri</i>	33,6	21,8
<i>Chaetoceros calcitrans</i>	14,6-16,4/39,8	17,6
<i>Chlorella emersonii</i>	25,0-63,0	10,3-50,0
<i>Chlorella protothecoides</i>	14,6-57,8	1214
<i>Chlorella sorokiniana</i>	19,0-22,0	44,7
<i>Chlorella vulgaris</i>	5,0-58,0	11,2-40,0
<i>Chlorella sp.</i>	10,0-48,0	42,1
<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	2,0	-
<i>Chlorella</i>	18,0-57,0	18,7
<i>Chlorococcum sp.</i>	19,3	53,7
<i>Cryptocodinium cohnii</i>	20,0-51,1	-
<i>Dunaliella salina</i>	6,0-25,0	116,0
<i>Dunaliella primolecta</i>	23,1	-
<i>Dunaliella tertiolecta</i>	16,7-71,0	-
<i>Dunaliella sp.</i>	17,5-67,0	33,5
<i>Ellipsoidion sp.</i>	27,4	47,3
<i>Euglena gracilis</i>	14,0-20,0	-
<i>Haematococcus pluvialis</i>	25,0	-
<i>Isochrysis galbana</i>	7,0-40,0	-
<i>Isochrysis sp.</i>	7,1-33	37,8
<i>Monodus subterraneus</i>	16,0	30,4
<i>Monallanthus salina</i>	20,0-22,0	-
<i>Nannochloris sp.</i>	20,0-56,0	60,9-76,5
<i>Nannochloropsis oculata.</i>	22,7-29,7	84,0-142,0
<i>Nannochloropsis sp.</i>	12,0-53,0	37,6-90,0
<i>Neochloris oleoabundans</i>	29,0-65,0	90,0-134,0
<i>Nitzschia sp.</i>	16,0-47,0	-
<i>Oocystis pusilla</i>	10,5	-
<i>Pavlova salina</i>	30,9	49,4
<i>Pavlova lutheri</i>	35,5	40,2
<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	18,0-57,0	44,8
<i>Porphyridium cruentum</i>	9,0-18,8/60,7	34,8
<i>Scenedesmus obliquus</i>	11,0-55,0	-
<i>Scenedesmus quadricauda</i>	1,9-18,4	35,1
<i>Scenedesmus sp.</i>	19,6-21,1	40,8-53,9
<i>Skeletonema sp.</i>	13,3-31,8	27,3
<i>Skeletonema costatum</i>	13,5-51,3	17,4
<i>Spirulina platensis</i>	4,0-16,6	-
<i>Spirulina maxima</i>	4,0-9,0	-
<i>Thalassiosira pseudonana</i>	20,6	17,4
<i>Tetraselmis suecica</i>	8,5-23,0	27,0-36,4
<i>Tetraselmis sp.</i>	12,6-14,7	43,4

Πίνακας 2: Στελέχη μικροφυκών που μελετήθηκαν.

Αριθμός στελέχους	Στέλεχος
SAG 5.95	<i>Scenedesmus rubescens</i>
SAG 807-1	<i>Botryococcus braunii</i>
SAG 80.80	<i>Neochloris vigensis</i>
SAG 22.83	<i>Chlorococcum spec.</i>
SAG 1224-5/15	<i>Euglena gracilis</i>
SAG 211-11b	<i>Chlorella vulgaris</i>
SAG 211-10a	<i>Chlorella protothecoides</i>
SAG 1090-1a	<i>Phaeodactylum tricornutum</i>
-	<i>Dunaliella tertiolecta</i>
-	<i>Nannochloropsis gaditana</i>

και συνεχή παροχή αέρα. Η διάρκεια των πειραμάτων ήταν 30 ημέρες, και 1 έως 2 φορές την εβδομάδα γινόταν λήψη δειγμάτων, ώστε να γίνεται έλεγχος των παραμέτρων.

2.4 ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

Οι παράμετροι που προσδιορίστηκαν ήταν η ξηρή βιομάζα των μικροφυκών με τη μέθοδο μέτρησης των ολικών στερεών (APHA *et al.*, 1998), ώστε να γίνεται έλεγχος της φυτοπλακτονικής ανάπτυξης. Σημειώνεται ότι οι καλλιέργειες των φυκών ήταν αζενικές και όλες οι διαδικασίες λήψης των δειγμάτων γίνονταν υπό ασηπτικές συνθήκες με αποτέλεσμα η μεταβολή της βιομάζας, να προέρχεται μόνο από τα φύκη.

Ο Ολικός-P προσδιορίστηκε με τη μέθοδο του ασκορβικού οξέος έπειτα από χώνευση του δείγματος με υπερθειικό αμμώνιο (APHA *et al.*, 1998). Η απορρόφηση μετρήθηκε στα 880 nm με φασματοφωτόμετρο (U-1100, Hitachi). Τα νιτρικά προσδιορίστηκαν φασματοφωτομετρικά με τη μέθοδο της 2,6-διμεθυλοφενόλης (ISO 7890/1).

Η περιεκτικότητα των μικροφυκών σε λιπίδια ελέγχθηκε στις 20 και στις 30 ημέρες. Ακολουθήθηκε η μέθοδος εκχύλισης ολικών λιπών κατά Folch (Li *et al.*, 2011), σύμφωνα με την οποία δείγμα ξηρής βιομάζας (περίπου 100 mg) ομογενοποιείται και εκχυλίζεται τρεις φορές με μίγμα χλωροφορμίου:μεθανόλης (2:1) (αντιδραστήριο FOLCH). Η βιομάζα απομακρύνεται με διήθηση μέσω χάρτινου ηθμού και το εκχύλισμα των λιπιδίων μεταφέρεται ποσοτικά σε προζυγισμένη, σε ζυγό ακριβείας, κωνική φιάλη. Η φιάλη τοποθετείται σε φούρνο στους 90°C έως ότου απομακρυνθεί όλο το αντιδραστήριο FOLCH. Η φιάλη αφήνεται να ψυχθεί σε θερμοκρασία περιβάλλοντος εντός ξηραντηρίου και στη συνέχεια ζυγίζεται σε ζυγό ακριβείας. Η διαφορά του βάρους αντιστοιχεί στα ενδοκυτταρικά λιπίδια.

Ο ειδικός ρυθμός ανάπτυξης (μ) των μικροφυκών υπολογίστηκε με δεδομένα της ξηρής βιομάζας των καλλιεργειών υποθέτοντας εκθετική ανάπτυξη:

$$\mu = \frac{\ln C_t - \ln C_0}{t} \quad (1)$$

όπου C_t η συγκέντρωση της βιομάζας κατά την χρονική στιγμή t και C_0 η αρχική συγκέντρωση της βιομάζας.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1 ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ ΜΙΚΡΟΦΥΚΩΝ

Από την αναγνώριση που πραγματοποιήθηκε για τα δείγματα των επεξεργασμένων λυμάτων από τις δύο ΕΕΛ προέκυψαν μικροφύκη από τα παρακάτω γένη (Πίνακας 3). Τα είδη των μικροφυκών διαφέρουν από εγκατάσταση σε εγκατάσταση, και αυτό πιθανόν να οφείλεται στις επικρατούσες συνθήκες της κάθε περιοχής, αλλά και στην υπόλοιπη μικροβιακή βιοποικιλότητα των λυμάτων. Επίσης πρέπει να σημειωθεί ότι στην ΕΕΛ του Πανεπιστημίου Πατρών παρατηρήθηκε έντονη ζωοπλακτονική δραστηριότητα και πιθανόν σ' αυτό να οφείλεται και η μικρή βιοποικιλότητα που παρουσιάζει το δείγμα από την εγκατάσταση αυτή.

3.2 ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΕΠΙΛΕΓΜΕΝΩΝ ΜΙΚΡΟΦΥΚΩΝ

Στον Πίνακα 4, δίνονται τα αποτελέσματα από την καλλιέργεια των 10 στελεχών. Από τη μελέτη που πραγματοποιήθηκε για το ρυθμό ανάπτυξης των 10 επιλεγμένων μικροφυκών παρατηρήθηκε ότι τα είδη των αλμυρών νερών (*Nannochloropsis*

gaditana, *Dunaliella tertiolecta*, *Phaeodactylum tricomutum*) παρουσίασαν τους μεγαλύτερους ρυθμούς ανάπτυξης με τιμές αντίστοιχα 0,1891, 0,1595 και 0,1437 d⁻¹. Επειδή τα λύματα παρουσιάζουν σύσταση γλυκού νερού, επιλέχθηκαν 3 στελέχη με υψηλό ρυθμό ανάπτυξης για να πραγματοποιηθούν τα πειράματα διαλείποντος έργου με θρεπτικό μέσο το συνθετικό υπόστρωμα.

Πίνακας 3: Είδη μικροφυκών που παρατηρήθηκαν στα επεξεργασμένα λύματα

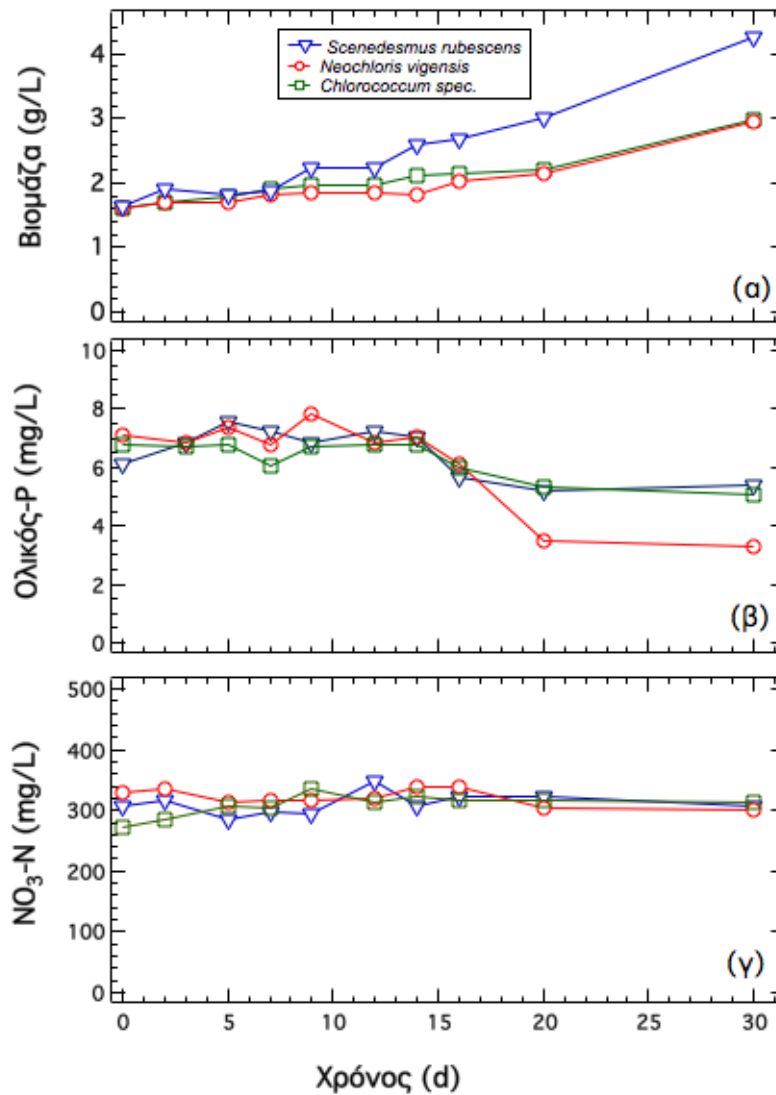
Είδος μικροφυκών	ΕΕΛ	
	Πανεπιστημιούπολη Πάτρας	Αμαλιάδα
<i>Chaetomorpha</i>	✓	✓
<i>Chlorella</i>		✓
<i>Chlorococum</i>		✓
<i>Elakotothrix</i>		✓
<i>Euglena</i>	✓	✓
<i>Fragilaria</i>		✓
<i>Nitzschia</i>		✓
<i>Schroederia</i>		✓
<i>Scenedesmus</i>	✓	✓
<i>Schizothrix</i>		✓
<i>Stichococcus</i>		✓
<i>Ulothrix</i>		✓

Πίνακας 4: Καλλιέργεια μικροφυκών για χρονική περίοδο 30 ημερών.

Είδος μικροφύκους	Συγκέντρωση		Ρυθμός ανάπτυξης (μ) d ⁻¹
	Αρχική g/L	Τελική g/L	
Μικροφύκη γλυκού νερού			
<i>Botryococcus braunii</i>	0,0510 ±0,0064	3,7424 ±0,6260	0,0328 ±0,0087
<i>Chlorella protothecoides</i>	0,1450 ±0,0035	3,0521 ±0,0810	0,0869 ±0,0014
<i>Chlorella vulgaris</i>	0,0886 ±0,0016	2,7948 ±0,0390	0,0997 ±0,0002
<i>Chlorococum spec.</i>	0,0690 ±0,0017	4,8626 ±1,0224	0,1219 ±0,0086
<i>Euglena gracilis</i>	0,1367 ±0,0024	3,9745 ±0,7035	0,0269 ±0,0014
<i>Neochloris vigensis</i>	0,0420 ±0,0000	3,6212 ±0,1795	0,1344 ±0,0037
<i>Scenedesmus rubescens</i>	0,0507 ±0,0005	5,7220 ±1,0126	0,1351 ±0,0105
Μικροφύκη αλμυρού νερού			
<i>Dunaliella tertiolecta</i>	0,0380 ±0,0057	9,5697 ±1,4236	0,1595 ±0,0111
<i>Nannochloropsis gaditana</i>	0,0199 ±0,0042	12,8639 ±3,4818	0,1891 ±0,0076
<i>Phaeodactylum tricomutum</i>	0,0512 ±0,0017	7,1672 ±1,0202	0,1437 ±0,0075

Από τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν για τα τρία επιλεγμένα στελέχη, παρατηρείται ότι η συγκέντρωση βιομάζας παρουσιάζει αργό ρυθμό ανάπτυξης των μικροφυκών (Σχήμα 1α), αυτό πιθανόν να οφειλόταν στην μικρή ένταση ακτινοβολίας με αποτέλεσμα τη μεγάλη διάρκεια των πειραμάτων. Το *Scenedesmus rubescens* παρουσίασε το μεγαλύτερο ρυθμό ανάπτυξης (0,0314 d⁻¹), ενώ τα άλλα δυο στελέχη, το *Neochloris vigensis* και το *Chlorococum spec.*, παρουσίασαν παρόμοιο ρυθμό ανάπτυξης, 0,0187 d⁻¹ και 0,0185 d⁻¹ αντίστοιχα, για το χρονικό διάστημα των 30 ημερών.

Τα θρεπτικά συστατικά που μελετήθηκαν ήταν ο Ολικός-P (Σχήμα 1β) και τα νιτρικά (NO₃⁻N) (Σχήμα 1γ). Στο Σχήμα 1β παρατηρείται σταθερή συγκέντρωση του Ολικού-P μέχρι την 13^η ημέρα και στη συνέχεια παρατηρείται απότομη πτώση της συγκέντρωσης μέχρι την 20^η ημέρα. Η μεγαλύτερη ποσοστιαία αφαίρεση φωσφόρου παρατηρείται από το στέλεχος *Neochloris vigensis* (53,4%), στη συνέχεια ακολουθεί το *Chlorococum spec.* (25,1%) και τέλος το *Scenedesmus rubescens* (11,4%).

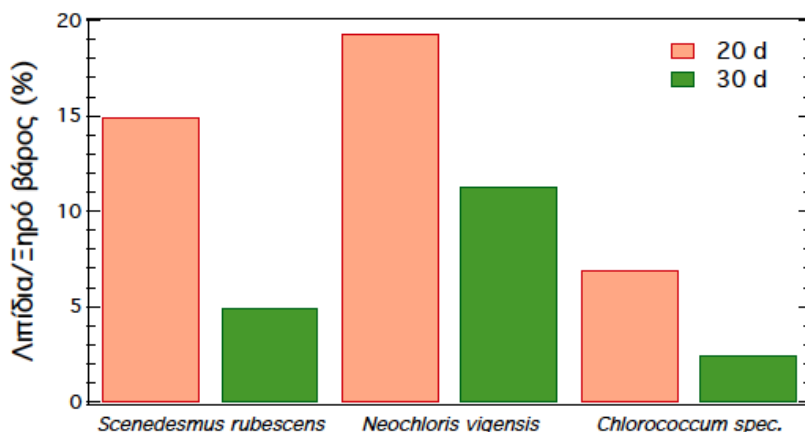


Σχήμα 1: Αποτελέσματα από την καλλιέργεια των 3 επιλεγμένων μικροφυκών: (α) Βιομάζα, (β) Ολικός-P, (γ) NO_3^- -N.

Σημειώνεται ότι αν και το *Scenedesmus rubescens* παρουσίασε το μεγαλύτερο ρυθμό ανάπτυξης δεν είχε τόσο ικανοποιητική απόδοση στην αφαίρεση του Ολικού-P από το σύστημα σε αντίθεση με τα άλλα δυο στελέχη που μελετήθηκαν. Στο Σχήμα 1γ παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τη συγκέντρωση του NO_3^- -N κατά το χρονικό διάστημα των 30 ημερών. Παρατηρείται ότι αν και υπήρχε εμφανής αύξηση των συγκεντρώσεων της βιομάζας, πιθανόν δεν ήταν ικανοποιητική ώστε να οδηγήσει σε μετρήσιμη αφαίρεση NO_3^- -N καθώς η συγκέντρωση νιτρικού αζώτου στο συνθετικό τροφικό διάλυμα ήταν συγκριτικά πολύ υψηλή.

Στο Σχήμα 2 απεικονίζεται η περιεκτικότητα σε λιπίδια κάθε μικροφύκου σε 20 και 30 ημέρες από την έναρξη του πειράματος. Το *Neochloris vigensis* παρουσιάζει την καλύτερη απόδοση σε 20 d. Η απόδοση του *Neochloris vigensis* για το διάστημα των 20 και 30 d είναι 19,29 και 11,32%, αντίστοιχα. Για τα άλλα δυο στελέχη *Scenedesmus rubescens* και *Chlorococcum spec.* για το χρονικό διάστημα των 20 και 30 ημερών αντιστοιχούν τα εξής ποσοστά: 14,91%, 4,97% και 6,93%, 2,42%. Παρατηρείται ότι σε όλα τα μικροφύκη το ποσοστό των λιπιδίων για τις 30 ημέρες είναι μικρότερο από το ποσοστό για τις 20 ημέρες. Σε συνδυασμό με την σταθεροποίηση της συγκέντρωσης

του Ολικού-P μετά την 20^η ημέρα της κάθε καλλιέργειας, σημαίνει ότι αν και έχουμε ανάπτυξη βιομάζας η απόδοση ως προς τα λιπίδια δεν είναι ικανοποιητική μετά το πέρας αυτής της ημέρας.



Σχήμα 2: Περιεκτικότητα λιπιδίων στα φύκη σε 20 και 30 ημέρες καλλιέργειας.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τα αποτελέσματα για τα πειράματα διαλείποντος έργου για τα τρία στελέχη μικροφυκών (*Scenedesmus rubescens*, *Neochloris vigensis* και *Chlorococcum spec.*) που πραγματοποιήθηκαν, συμπεραίνεται ότι η ανάπτυξη βιομάζας δεν είναι πάντα άμεσα συνδεδεμένη με την αφαίρεση θρεπτικών, αλλά ούτε και με την περιεκτικότητα των φυκών σε λιπίδια. Το στέλεχος του *Scenedesmus rubescens* αν και παρουσίασε μεγαλύτερο ρυθμό ανάπτυξης παρουσίασε μικρότερη αφαίρεση Ολικού-P σε σχέση με τα άλλα δύο στελέχη που μελετήθηκαν, αλλά και μικρότερη περιεκτικότητα σε λιπίδια, σε σχέση με το στέλεχος του *Neochloris vigensis*. Το *Neochloris vigensis* αν και παρουσίασε μικρό ρυθμό ανάπτυξης βιομάζας είχε την καλύτερη απόδοση στην αφαίρεση του Ολικού-P, αλλά και στην περιεκτικότητα σε λιπίδια σε σχέση με τα άλλα δύο στελέχη. Τέλος, παρατηρήθηκε ότι η περιεκτικότητα των φυκών σε λιπίδια μεταβάλλεται με το χρόνο και η μεγαλύτερη τιμή παρουσιάστηκε στις 20 ημέρες.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εργασία αυτή, υποστηρίχθηκε από το Πρόγραμμα Βασικής Έρευνας Κ. Καραθεοδωρή, Επιτροπή Ερευνών, Πανεπιστήμιο Πατρών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- A.P.H.A., AWWA, WEF, 1998. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 19th ed. American Public Health Association, Washington, DC.
- Barbosa, M.J.G.V., 2003. *Microalgal photobioreactors: scale-up and optimisation*. Ph.D. Dissertation, Wageningen University, The Netherlands.
- Canter-Lund, H. and Lund, W.G.J., 1996. *Freshwater Algae, Their microscopic world explored*, Biopress Ltd, Bristol.
- Cheung, Y.H., Wong, M.H., 1981. *Properties of animal manure and sewage sludges and their utilization for algal growth*. *Agricultural Wastes*, 3: 109–122.

- Chisti, Y., 2008. *Biodiesel from microalgae beats bioethanol*. Trends in Biotechnology, 26: 126-131.
- Chisti, Y., 2007. *Biodiesel from microalgae*. Biotechnology Advances, 25: 294–306.
- Chiu, S.Y., Kao, C.Y., Tsai, M.T., Ong, S.C., Chen, C.H. and Lin, C.S., 2009. *Lipid accumulation and CO₂ utilization of Nannochloropsis oculata in response to CO₂ aeration*. Bioresource Technology, 100: 833–8.
- De Morais, M.G. and Costa J.A.V., 2007. *Carbon dioxide fixation by Chlorella kessleri, C. vulgaris, Scenedesmus obliquus and Spirulina sp. cultivated in flasks and vertical tubular photobioreactors*. Biotechnology Letters 29(9):1349–52.
- De Pauw, N., Morales, J. and Persoone, G., 1984. *Mass culture of microalgae in aquaculture systems: progress and constraints*. Hydrobiologia 116 / 117: 121–34.
- Deng, X., Li, Y., Fei, X., 2009. *Microalgae: a promising feedstock for biodiesel*. African Journal of Microbiology Research 3 (13), 1008–1014.
- Eriksen, N.T., 2008. *The technology of microalgal culturing*. Biotechnology Letters, 30:1525–36.
- Feng, Y., Li, C., Zhang, D., 2011. *Lipid production of Chlorella vulgaris cultured in artificial wastewater medium*. Biosource Technology, 102: 101-105.
- Hammouda O., Gaber, A. and Abdel-Raouf, N., 1995. *Microalgae and wastewater treatment*. Ecotoxicology and Environmental Safety, 31: 205–210.
- Hoffmann, J.P., 1998. *Wastewater treatment with suspended and non suspended algae*. Journal of Phycology, 34: 757–763.
- Hu, Q., Sommerfeld, M., Jarvis, E., Ghirardi, M., Posewitz, M., Seibert, M. and Darzins, A., 2008. *Microalgal triacylglycerols as feedstocks for biofuel production: perspectives and advances*. The Plant Journal, 54: 621-639.
- Illman, A.M., Scragg, A.H. and Shales, S.W., 2000. *Increase in Chlorella strains calorific values when grown in low nitrogen medium*. Enzyme and Microbial Technology, 27:631–5.
- Kaewpintong, K., 2004. *Cultivation of Haematococcus pluvialis in Airlift Bioreactor*. Master thesis in Chemical Engineering. Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University.
- Khan, M. and Yoshida, N., 2008. *Effect of L-glutamic acid on the growth and ammonium removal from ammonium solution and natural wastewater by Chlorella vulgaris NTM06*. Bioresource Technology, 99: 575–582.
- Kim, B.H., Choi H.J. and Han M.S., 2003. *Potential in the application for biological control of harmful algal bloom cause by Microcystis aeruginosa*. Korean Journal of Limnology, 37: 64–69.
- Lau, P.S., Tam, N.F.Y. and Wong, Y.S., 1995. *Effect of algal density on nutrient removal from primary settled wastewater*. Environmental Pollution, 89: 59–66.
- Lau, P.S., Tam, N.F.Y., Wong, Y.S., 1998. *Operational optimization of batch wise nutrient removal from wastewater by carrageen an immobilized Chlorella vulgaris*. Water Science and Technology, 1: 185–192.
- Li, Q., Du, W. and Liu, D., 2008. *Perspectives of microbial oils for biodiesel production*. Applied Microbiology and Biotechnology, 80: 749–756.

- Li, Y., Chen, Y.F., Chen, P., Min, M., Zhou, W., Martinez, B., Zhu, J., and Ruan, R., 2011. *Characterization of a microalgae Chlorella sp. well adapted to highly concentrated municipal wastewater in nutrient removal and biodiesel production*. *Bioresource Technology* 102 (8): 5138–5144.
- Li, Y., Zhou, W., Bing, H., Min, M., Chen, P. and Ruan, R. R., 2011b. *Integration of algae cultivation as biodiesel production feedstock with municipal wastewater treatment: Strains Screening and significance evaluation of environmental factors*. *Biosource Technology*, 102 (23): 10861-7.
- Liu, Z.Y., Wang, G.C. and Zhou, B.C., 2008. *Effect of iron on growth and lipid accumulation in Chlorella vulgaris*. *Bioresource Technology*, 99: 4717 – 22.
- Mata, T.M., Martins, A.A. and Caetano, N.S., 2009. *Microalgae for biodiesel production and other applications: a review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14: 217-232.
- Moheimani, N.R., 2005. *The culture of Coccolithophorid Algae for carbon dioxide bioremediation*. Ph.D. Dissertation, Murdoch University.
- Pizarro, C., Mulbry, W., Blerch, D. and Kanga, P., 2006. *An economic assessment of algal turf scrubber technology for treatment of dairy manure effluent*. *Ecological Engineering*, 26: 321-327.
- Richmond, A., 2004. *Handbook of microalgal culture: biotechnology and applied phycology*. Blackwell Science Ltd.
- Sialve, B., Bernet, N. and Bernard, O., 2009. *Anaerobic digestion of microalgae as a necessary step to make microalgal biodiesel sustainable*. *Biotechnology Advances*, 27: 409–416.
- Tam, N.F.Y. and Wong, Y.S., 1989. *Wastewater nutrient removal by Chlorella pyrenoidosa and Scenedesmus sp.*. *Environmental Pollution*, 58: 19–34.
- Tam, N.F.Y., Wong, Y.S., 1990. *The comparison of growth and nutrient removal efficiency of Chlorella Pyrenoidosa in settled and activated sewages*. *Environmental Pollution*, 65: 93–108.
- Temponeras, M., Kristiansen, J. and Moustaka-Gouni, M., 2000. *Seasonal variation in phytoplankton composition and physical– chemical features of the shallow Lake Doirani, Macedonia, Greece*. *Hydrobiologia*, 424: 109–122.
- Zhou, W., Li, Y., Min, M., Hu, B., Chen, P. and Ruan, R., 2011. *Local bioprospecting for high-lipid producing microalgal strains to be grown on concentrated municipal wastewater for biofuel production*. *Bioresource Technology*, 102 (13): 6909– 6919.

ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΕΛΑΙΟΤΡΙΒΕΙΟΥ ΜΕ ΑΝΟΙΚΤΕΣ ΜΗ-ΑΕΡΙΖΟΜΕΝΕΣ ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΗΤΟΥΣ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΟΥΣ: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΙΣ ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ
Γεώργιος Δ. Γκίκας^{1*}, Ιωάννης Δ. Τσακμάκης, Βασίλειος Α. Τσιχριντζής²

Εργαστήριο Οικολογικής Μηχανικής και Τεχνολογίας, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνική Σχολή, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, 67100 Ξάνθη.

^{1*}Τηλ./Fax: +30-25410-79381, E-mail: ggkikas@env.duth.gr

²Τηλ./Fax: +30-25410-79393, E-mail: tsihrin@otenet.gr; tsihrin@env.duth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Κατά τη διαδικασία παραγωγής ελαιολάδου παράγονται υγρά απόβλητα ελαιοτριβείου (ΥΑΕ) τα οποία αποτελούνται από νερό, οργανικές ουσίες και ανόργανα άλατα. Η διάθεση των ΥΑΕ στους αποδέκτες απαιτεί προηγουμένως την επεξεργασία τους. Στην εργασία αυτή μελετάται η απόδοση φυσικού συστήματος στην απομάκρυνση ρύπων από τα ΥΑΕ. Το σύστημα αποτελείται από δύο ανοικτές μη-αεριζόμενες δεξαμενές (ΑΔ) και δύο τεχνητούς υδροβιότοπους επιφανειακής ροής (ΤΥΕΡ) που λειτουργούν σε σειρά. Για το σκοπό της εργασίας γίνονται δειγματοληψίες ανά 15 ημέρες από τις δεξαμενές. Επί τόπου μετρούνται η θερμοκρασία, το pH, η ηλεκτρική αγωγιμότητα, το διαλυμένο οξυγόνο. Τα δείγματα του ΥΑΕ αναλύονται για τον προσδιορισμό των: BOD, COD, TKN, φαινολών κλπ. Στην εργασία αυτή περιγράφεται ο σχεδιασμός του πειράματος και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τη λειτουργία των δεξαμενών.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Φυσικά συστήματα, Τεχνητοί υδροβιότοποι επιφανειακής ροής, Υγρά απόβλητα ελαιοτριβείου.

TREATMENT OF OLIVE MILL WASTEWATER IN OPEN NON-AERATED PONDS AND CONSTRUCTED WETLANDS: RESULTS FROM THE POND OPERATION

Georgios D. Gikas^{1*}, Ioannis D. Tsakmakis, Vassilios A. Tsihrintzis²

Laboratory of Ecological Engineering and Technology, Department of Environmental Engineering, School of Engineering, Democritus University of Thrace, 67100 Xanthi, Greece

^{1*}Ph./Fax: +30-25410-79381, E-mail: ggkikas@env.duth.gr

²Ph./Fax: +30-25410-79393, E-mail: tsihrin@otenet.gr; tsihrin@env.duth.gr

ABSTRACT

The olive oil extraction process produces olive mill wastewater (OMW) which contains water, organic compounds and inorganic salts. Treatment is required before OMW is discharged in the environment. This study considers the efficiency of natural systems in treating OMW. The system comprises two open non-aerated tanks and two parallel free-water surface constructed wetlands. For the purpose of this study sampling frequency was once every 15 days from the two tanks. Temperature, electrical conductivity, pH and DO were measured *in situ*. Samples were analyzed for the determination of BOD, COD, TKN, phenols etc. In this paper the experimental design is described and preliminary results are presented.

KEY WORDS: Natural systems, Free-water surface constructed wetlands, Olive mill wastewater.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παραγωγή ελαιόλαδου αποτελεί ένα σημαντικό κομμάτι της οικονομίας των μεσογειακών χωρών. Παραπροϊόν της διαδικασίας παραγωγής ελαιόλαδου αποτελούν τα υγρά απόβλητα ελαιοτριβείου (ΥΑΕ). Από το 2000 και μετά, στην Ελλάδα παράγονται ετησίως περίπου 378 kt ελαιόλαδου που αντιστοιχούν στην παραγωγή 2.266 kt ΥΑΕ (Fountoulakis et al., 2008). Τα ΥΑΕ αποτελούν ένα κλάσμα των παραπροϊόντων που προκύπτουν κατά την παραγωγική διαδικασία και χαρακτηρίζονται από υψηλή συγκέντρωση οργανικού φορτίου (Niaounakis and Halvadakis, 2004). Τυπικές συγκεντρώσεις COD κυμαίνονται μεταξύ 15 g/L και 390 g/L, δηλ. 20 έως 4.400 φορές μεγαλύτερες από αυτές των αστικών λυμάτων (Yalcuk et al., 2010, Athanasoulia et al., 2012), Υψηλές είναι και οι συγκεντρώσεις φαινολών (1,5 – 14,0 g/L), ενώσεις που δημιουργούν την τοξική και αντιμικροβιακή δράση των ΥΑΕ (Gonzalez et al., 1990, Capasso et al., 1995). Λόγω αυτών των χαρακτηριστικών τους τα ΥΑΕ κατατάσσονται μεταξύ των ισχυρότερων βιομηχανικών αποβλήτων. Η επεξεργασία τους, πριν την τελική τους διάθεση, αποτελεί ένα σημαντικό πρόβλημα καθώς οι συμβατικές μέθοδοι επεξεργασίας είναι ιδιαίτερα δαπανηρές.

Τα φυσικά συστήματα επεξεργασίας (τεχνητοί υδροβιότοποι, αερόβιες δεξαμενές σταθεροποίησης, αναερόβιες δεξαμενές) χρησιμοποιούνται ως εναλλακτικά συστήματα επεξεργασίας αστικών αποβλήτων για μικρούς οικισμούς και θεωρούνται πλέον μία αξιόπιστη και οικονομική λύση (Reed et al., 1995, Kadlec and Wallace, 2009, Akrotas and Tsihrintzis, 2007, Tsihrintzis et al., 2007, Kotti et al., 2010, Tsihrintzis and Gikas, 2010, Gikas et al., 2011). Οι Herounim et al. (2011) εξέτασαν την απόδοση τεχνητών υδροτόπων κατακόρυφης ροής (ΤΥΚΡ) στην επεξεργασία ΥΑΕ στην περιοχή της Αμφιλοχίας του νομού Αιτωλοακαρνανίας, στην Δυτική Ελλάδα. Οι μετρήσεις έδειξαν ικανοποιητικά ποσοστά απομάκρυνσης, συγκεκριμένα 70%, 70%, 75% και 87% για COD, φαινόλες, Total Kjeldahl Nitrogen (TKN) και ορθοφωσφορικά (OP), αντίστοιχα. Επιπρόσθετα οι Yalcuk et al. (2010), σε μετρήσεις που πραγματοποίησαν στην εκροή ΤΥΚΡ που φορτίστηκαν με ΥΑΕ, βρήκαν απομακρύνσεις 73%, 40% και 95% για COD, NH₄-N και OP, αντίστοιχα. Σύστημα ΤΥ επιφανειακής ροής το οποίο φορτίστηκε με ΥΑΕ αραιωμένο με καθαρό νερό σε αναλογία 1:10 (ΥΑΕ:νερό), πέτυχε ικανοποιητικά ποσοστά απομάκρυνσης των ρύπων τα οποία ήταν 98,0%, 89,7%, 86,7% και 87,0% για TSS, COD, φαινόλες και TKN, αντίστοιχα (Kapellakis et al., 2009).

Στο εργαστήριο Οικολογικής Μηχανικής και Τεχνολογίας του Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος του ΔΠΘ σχεδιάστηκε πιλοτικό φυσικό σύστημα για την επεξεργασία ΥΑΕ. Το σύστημα αποτελείται από δύο ανοικτές μη-αεριζόμενες δεξαμενές (ΑΔ) και δύο τεχνητούς υδροβιότους επιφανειακής ροής (ΤΥΕΡ). Οι ΑΔ λειτουργούν παράλληλα και οι δύο ΤΥΕΡ λειτουργούν επίσης παράλληλα, αλλά το σύστημα ΑΔ-ΤΥΕΡ λειτουργεί σε σειρά. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τα πρώτα αποτελέσματα από τη λειτουργία των δύο δεξαμενών, ενώ το πείραμα συνεχίζεται.

2. ΜΕΘΟΔΟΣ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ

2.1. ΥΑΕ ΕΛΑΙΟΤΡΙΒΕΙΟΥ ΚΑΙ ΠΙΛΟΤΙΚΗ ΜΟΝΑΔΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ

Τα ΥΑΕ προέρχονται από ελαιοτριβείο τριφασικής λειτουργίας από την περιοχή της Ξάνθης, στη Βόρεια Ελλάδα. Το χαρακτηριστικό γνώρισμα των ελαιοτριβείων αυτού του τύπου είναι ότι είναι συνεχούς λειτουργίας και ο ελαιοπολτός τροφοδοτείται σε φυγοκεντρικό διαχωριστήρα όπου διαχωρίζονται το ελαιόλαδο, τα στερεά και τα ΥΑΕ. Ο διαχωρισμός των στερεών που προέρχονται από τον καρπό της ελιάς γίνεται με τη βοήθεια κοχλίας. Για τον καλύτερο διαχωρισμό του ελαιόλαδου προστίθεται νερό το οποίο ανέρχεται περίπου σε 350 L ανά τόνο ελαιόκαρπου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την ελάττωση των συγκεντρώσεων των

περιεχόμενων συστατικών στα ΥΑΕ αλλά και την αύξηση της παραγόμενης ποσότητας αποβλήτων ανά μονάδα επεξεργαζόμενου καρπού. Υπολογίζεται ότι ο όγκος του παραγόμενου ΥΑΕ, από την επεξεργασία 1000 kg ελαιοκάρπου, ανέρχεται σε 650-750 L και αντιστοιχεί στην παραγωγή 200 kg ελαιολάδου.

Τα ΥΑΕ μεταφέρθηκαν από το ελαιοτριβείο και τοποθετήθηκαν σε δύο δεξαμενές που είναι ανοικτές από το επάνω μέρος (μη-αεριζόμενες με τεχνητά μέσα) και προσομοιώνουν την επεξεργασία των ΥΑΕ σε ανοικτές λίμνες (Εικόνα 1). Οι διαστάσεις των δεξαμενών είναι: 1,0 m μήκος, 1,0 m πλάτος και 1,0 m ύψος για την ΑΔ1 και 1,15 m μήκος, 0,95 m πλάτος και 1,0 m ύψος για την ΑΔ2. Το βάθος των ΥΑΕ έφτασε μέχρι τα 0,87 m και τα 0,82 m στην ΑΔ1 και ΑΔ2, αντίστοιχα. Οι δύο δεξαμενές λειτουργούν παράλληλα μεταξύ τους.

Για την περαιτέρω επεξεργασία του ΥΑΕ χρησιμοποιούνται δύο τεχνητοί υγροβιότοποι (ΤΥ) επιφανειακής ροής (ΤΥΕΡ1 και ΤΥΕΡ2, Εικόνα 2) ορθογώνιας κάτοψης (κωδικοί Α και Β, Kotti et al., 2010), με διαστάσεις 3,40 m μήκος, 0,85 m πλάτος οι οποίοι είναι φυτεμένοι με ψαθί (*Typha latifolia*). Το πληρωτικό υλικό στους δύο υγροβιότους έχει πάχος 0,45 m και είναι άμμος στον ΤΥΕΡ1 και άργιλος στον ΤΥΕΡ2, ενώ το βάθος ροής είναι περίπου 10 cm (Εικόνα 2). Οι ΤΥ δέχονται τη συνδυασμένη εκροή των δύο ΑΔ και επομένως λειτουργούν σε σειρά με τις δεξαμενές αλλά παράλληλα μεταξύ τους.



Εικόνα 1. Ανοικτές μη-αεριζόμενες με τεχνητό τρόπο δεξαμενές για την προεπεξεργασία ΥΑΕ



Εικόνα 2. Πιλοτικές Μονάδες ΤΥΕΡ για την επεξεργασία ΥΑΕ

Η διαδικασία επεξεργασίας προβλέπει την παραμονή του ΥΑΕ στις δύο δεξαμενές για μεγάλο χρονικό διάστημα (περίπου 6-8 μήνες) με σκοπό την φυσική απομάκρυνση του COD και άλλων συστατικών του μέσω της καθίζησης των αιωρούμενων στερεών. Με τη μακροχρόνια παραμονή ΥΑΕ σε ανοιχτές μη αεριζόμενες δεξαμενές αποθήκευσης, εκδηλώνεται ανοξική βιολογική δραστηριότητα που έχει σαν αποτέλεσμα έκλυση διοξειδίου του άνθρακα και διαχωρισμό αιωρούμενων στερεών τόσο με επίπλευση όσο και με καθίζηση. Επίσης, η επεξεργασία στις ανοιχτές μη αεριζόμενες δεξαμενές, όπου η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου είναι μεγαλύτερη σε σχέση με αυτήν στις αναερόβιες δεξαμενές, ευνοεί την ανάπτυξη των μικροοργανισμών που είναι υπεύθυνοι για την απομάκρυνση των φαινολών (Herounim et al., 2011). Στη συνέχεια, τα μερικώς επεξεργασμένα ΥΑΕ διοχετεύονται στους ΤΥ επιφανειακής ροής.

2.2. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΥΑΕ ΚΑΙ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Από 12/12/2011 έως 23/4/2012 γίνονταν μετρήσεις των φυσικοχημικών παραμέτρων των ΥΑΕ και λαμβάνονταν δείγματα από τις δύο ΑΔ για αναλύσεις στο εργαστήριο με συχνότητα 15 ημερών. Επί τόπου μετρούνταν η θερμοκρασία (T), το pH, το διαλυμένο οξυγόνο (DO) και η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) χρησιμοποιώντας κατάλληλα όργανα (WTW 197). Η δειγματοληψία γινόταν από βάθος 30 cm από την επιφάνεια των ΥΑΕ. Τα δείγματα αναλύονταν για τον προσδιορισμό των συγκεντρώσεων BOD, COD, TKN, NH₄-N και TSS, ακολουθώντας τις πρότυπες μεθόδους (Standard Methods: APHA, 1998). Για τον προσδιορισμό των ολικών φαινολών (PHE) χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των Folin-Ciocalteu (Waterman and Mole, 1994).

Χρησιμοποιήθηκε το στατιστικό πρόγραμμα SPSS 15.0 για να υπολογιστεί ο συντελεστής συσχέτισης Pearson μεταξύ των παραμέτρων που μετρήθηκαν στο ΥΑΕ και στις ανοιχτές μη-αεριζόμενες δεξαμενές.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των ΥΑΕ εξαρτώνται από τη μέθοδο παραγωγής του ελαιολάδου, την προεπεξεργασία στην οποία υποβάλλονται τα απόβλητα πριν την διάθεσή τους ή την αποθήκευσή τους σε δεξαμενές (Herounim et al., 2011), από την ποικιλία των καρπών ελιάς και, τέλος, την χρονική περίοδο και τον τρόπο συγκομιδής (Kavroulakis and Ntougias, 2011, Tsiamis et al., 2012). Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του ΥΑΕ, το οποίο χρησιμοποιήθηκε στην αερόβια επεξεργασία στις δύο ανοιχτές μη-αεριζόμενες δεξαμενές ΑΔ1 και ΑΔ2, καθώς και συγκριτικά χαρακτηριστικά ΥΑΕ από άλλες μελέτες. Συγκρίνοντας τις τιμές των φυσικοχημικών παραμέτρων του ΥΑΕ της παρούσας μελέτης με άλλες μελέτες (Πίνακας 1) φαίνεται ότι υπάρχουν διαφορές όσον αφορά τη συγκέντρωση του COD, του NH₄-N, του TKN, αλλά και των ολικών φαινολών. Όσον αφορά τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του ΥΑΕ στην παρούσα μελέτη, οι τιμές των συγκεντρώσεων για το COD, NH₄-N και TKN στο ΥΑΕ της ΑΔ1 είναι μεγαλύτερες από αυτές στο ΥΑΕ της ΑΔ2. Αυτό πιθανόν να οφείλεται στο γεγονός ότι το ΥΑΕ για τις δύο δεξαμενές πάρθηκε την ίδια μέρα από το ελαιοτριβείο αλλά σε διαφορετική χρονική στιγμή. Επίσης, η συγκέντρωση των αιωρούμενων στερεών στο ΥΑΕ της ΑΔ1 είναι μεγαλύτερη από αυτή στο ΥΑΕ της ΑΔ2. Οι άλλες φυσικοχημικές παράμετροι pH, EC, DO, στις δύο δεξαμενές ΑΔ1 και ΑΔ2 έχουν παρόμοιες τιμές. Στα Σχήματα 1 και 2 παρουσιάζεται η χρονική διακύμανση των φυσικοχημικών παραμέτρων του ΥΑΕ στις δύο ανοιχτές μη-αεριζόμενες δεξαμενές ΑΔ1 και ΑΔ2. Η θερμοκρασία του ΥΑΕ (Σχήμα 1α) ακολουθεί τη θερμοκρασία του αέρα και κυμαίνεται από 6,3°C το χειμώνα μέχρι 20,5°C την άνοιξη.

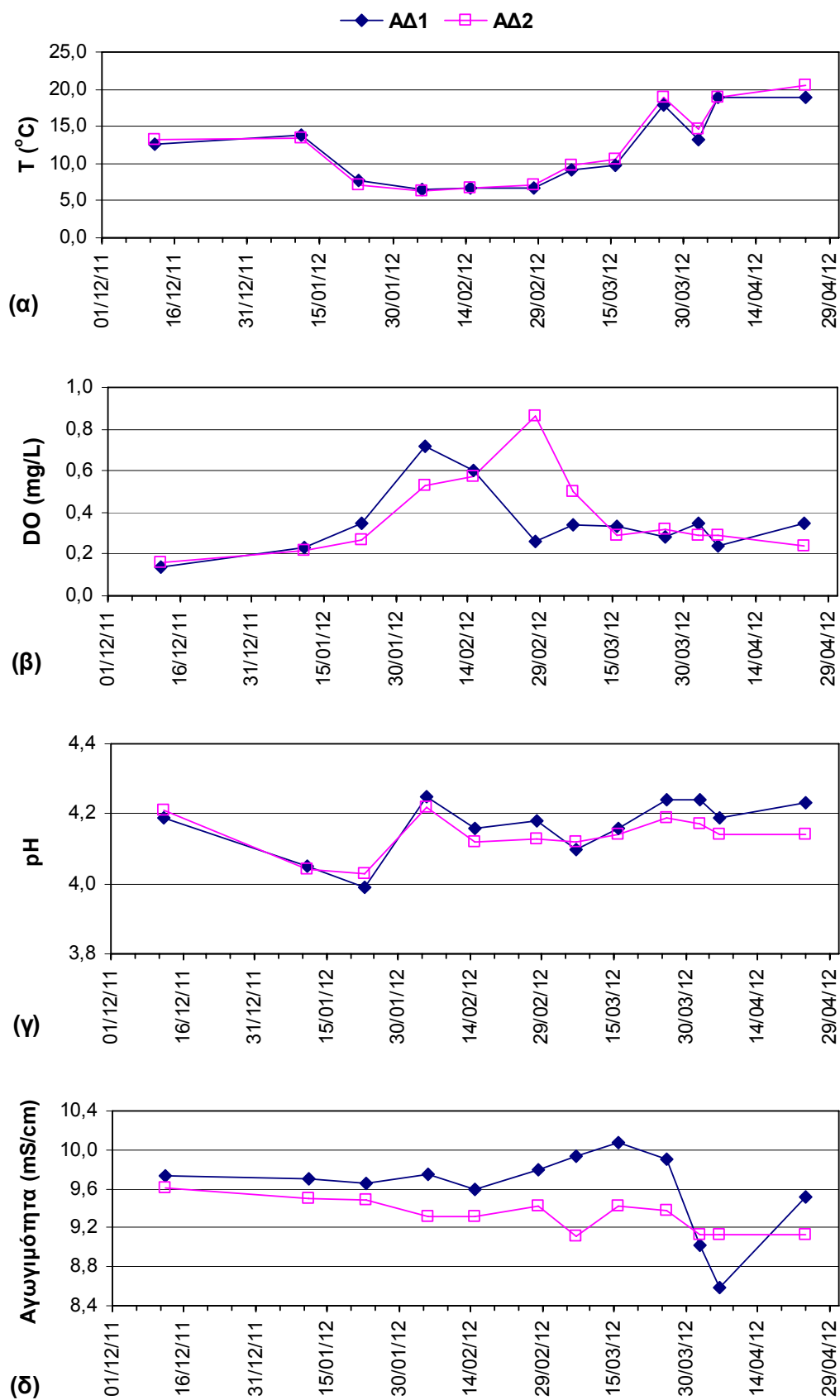
Πίνακας 1. Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του ΥΑΕ

Παράμετρος	Παρούσα μελέτη		Herouvim et al. (2011)	Yalcuk et al. (2010)	Kavroulakis and Ntougias (2011)	
	ΑΔ1	ΑΔ2			Koroneiki	Mastoidis
pH	4,19	4,21	5,00	7,36	4,90	4,89
EC (mS/cm)	9,74	9,61	5,70	4,52	12,29	16,14
DO (mg/L)	0,14	0,16	0,60	-	-	-
COD (mg/L)	58.144	45.773	14.120	86.500	99.920	37.769
BOD (mg/L)	11.445	-	-	-	14.333	9.167
NH ₄ ⁺ -N (mg/L)	38,1	33,6	101	24,33	621	498
TKN (mg/L)	280	202	506	-	-	-
TP (mg/L)	-	-	-	-	437	313
PHE (mg/L)	2.516	3.067	2.841	2.063	12.750	6.530
TSS (mg/L)	3.654	3.126	-	-	-	-

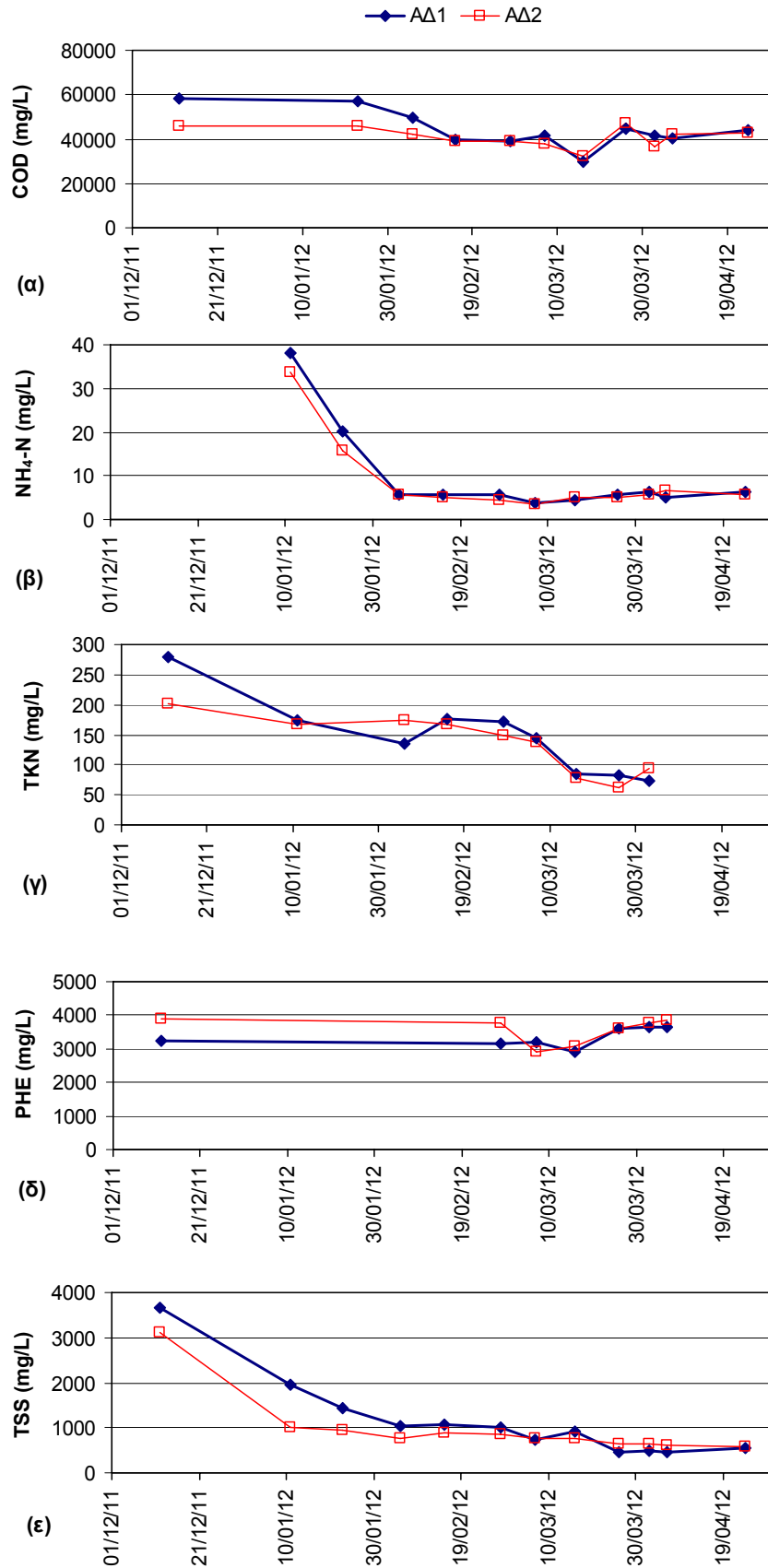
Η συγκέντρωση του DO παρέμεινε σε χαμηλά επίπεδα και κυμάνθηκε την περίοδο των μετρήσεων μεταξύ 0,2 mg/L και 0,8 mg/L. Οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις DO μετρήθηκαν την περίοδο που η θερμοκρασία ήταν χαμηλότερη, δηλαδή τον Ιανουάριο και Φεβρουάριο (Σχήμα 1β). Όπως είναι φανερό, οι χαμηλές αυτές τιμές διαλυμένου οξυγόνου δεν ευνοούν την ανάπτυξη αερόβιων μικροοργανισμών. Το pH του ΥΑΕ στις δύο δεξαμενές κυμάνθηκε μεταξύ 4.0 και 4,2 σε όλη τη διάρκεια των μετρήσεων (Σχήμα 1γ). Οι τιμές αυτές πιθανόν να οφείλονται στην παρουσία λιπαρών οξέων (Gonzalez et al., 1990) και αποτελούν επίσης ανασταλτικό παράγοντα στην ανάπτυξη των μικροοργανισμών. Οι τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, στην περίοδο των μετρήσεων, κυμάνθηκαν από 8,58 mS/cm μέχρι 10,07 mS/cm και από 9,12 mS/cm μέχρι 9,61 mS/cm στη δεξαμενή ΑΔ1 και ΑΔ2, αντίστοιχα. Μεγαλύτερες τιμές σε όλη τη διάρκεια των μετρήσεων παρατηρήθηκαν στη δεξαμενή ΑΔ1.

Η συγκέντρωση του COD παρουσίασε μείωση κατά τη διάρκεια των μετρήσεων και την παραμονή των ΥΑΕ στις δεξαμενές (Σχήμα 2α). Μεγαλύτερη μείωση (24,6%) παρατηρήθηκε στη δεξαμενή ΑΔ1 σε σχέση με τη δεξαμενή ΑΔ2 όπου η μείωση είναι 6,8%. Η αρχική συγκέντρωση του COD στη δεξαμενή ΑΔ1 ήταν μεγαλύτερη από αυτή στη δεξαμενή ΑΔ2, ενώ μετά από τέσσερες μήνες παραμονής των λυμάτων στις δύο ανοικτές μη-αερισόμενες δεξαμενές, η συγκέντρωση του COD σε αυτές είναι συγκρίσιμη (ΑΔ1: 43,8 g/L, ΑΔ2: 42,6 g/L). Η μείωση του COD αποδίδεται κυρίως στην καθίζηση των αιωρούμενων στερεών, γεγονός που ενισχύεται από την σημαντική θετική συσχέτιση ($p < 0,01$) που παρουσιάζουν το COD και τα TSS στην ανάλυση συσχέτισης Pearson (Πίνακας 2). Η μικρή μείωση του COD μπορεί επίσης να αποδοθεί και στην περιορισμένη δράση των μικροοργανισμών, λόγω των χαμηλών τιμών pH που χαρακτηρίζουν τα συγκεκριμένα ΥΑΕ. Οι κυριότερες ομάδες μικροοργανισμών που απαντώνται σε ΥΑΕ είναι οι οικογένειες των βακτηρίων *Acetobacteriaceae*, *Prevotellaceae*, *Lactobacillaceae* Firmicutes, *Actinobacteria*, και των πρωτο-βακτηρίων *Comamonadaceae*, *Oxalobacteraceae*, *Hydrogenophilaceae*, *Rhodocyclaceae* (Kavroulakis and Ntougias, 2011, Tsiamis et al., 2012).

Η συγκέντρωση NH₄-N μειώθηκε κατά 83,8% και 83,3% στις δεξαμενές ΑΔ1 και ΑΔ2, αντίστοιχα (Σχήμα 2β). Μεγαλύτερη μείωση της συγκέντρωσης του αμμωνιακού αζώτου παρατηρήθηκε τους δύο πρώτους μήνες της παραμονής του ΥΑΕ στις δεξαμενές. Στη συνέχεια η συγκέντρωση του NH₄-N δεν παρουσίασε αξιόλογη μεταβολή. Η καμπύλη μεταβολής του NH₄-N έχει την ίδια μορφή με αυτή της μεταβολής των TSS (Σχήμα 2β,ε), δείχνοντας την άμεση σχέση μεταξύ του αμμωνιακού αζώτου και των αιωρούμενων στερεών. Η σχέση αυτή επιβεβαιώνεται και από τη ανάλυση συσχέτισης Pearson (Πίνακας 2), όπου φαίνεται η ισχυρή θετική συσχέτιση ($p < 0,01$) μεταξύ των δύο παραμέτρων.



Σχήμα 1. Διακύμανση των φυσικοχημικών παραμέτρων του ΥΑΕ στις ΑΔ



Σχήμα 2. Χρονική μεταβολή των συγκεντρώσεων: (α) COD, (β) NH₄-N, (γ) TKN, (δ) PHE και (ε) TSS, στις ΑΔ.

Πίνακας 2. Συσχέτιση Pearson των φυσικοχημικών παραμέτρων

	T	DO	pH	EC	COD	NH ₄ -N	TKN	PHE	TSS
T	1								
DO	-0,553**	1							
pH	0,251	0,116	1						
EC	-0,377	-0,006	-0,082	1					
COD	0,062	-0,156	-0,097	0,161	1				
NH ₄ -N	0,016	-0,346	-0,654**	0,172	0,660**	1			
TKN	-0,341	-0,084	-0,186	0,204	0,539*	0,373	1		
PHE	0,416	0,37	0,143	-0,43	-0,137	0,608*	-0,548	1	
TSS	-0,129	-0,318	-0,057	0,354	0,538**	0,741**	0,777**	-0,594*	1

** Η συσχέτιση είναι σημαντική σε επίπεδο 0.01

* Η συσχέτιση είναι σημαντική σε επίπεδο 0.05

Η συγκέντρωση του TKN μειώθηκε κατά 74,2% στην ΑΔ1 και 53,9% στην ΑΔ2 στη διάρκεια παραμονής του ΥΑΕ στις δύο δεξαμενές (Σχήμα 2γ). Υπάρχει σημαντική θετική συσχέτιση ($p < 0,001$) της συγκέντρωσης του TKN και της συγκέντρωσης των TSS, δείχνοντας ότι η καθίζηση των αιωρούμενων στερεών παίζει σημαντικό ρόλο στην απομάκρυνση του TKN στη φάση αυτή της επεξεργασίας των ΥΑΕ. Σε αντίθεση με το αμμωνιακό άζωτο, του οποίου η μείωση όπως προαναφέρθηκε γίνεται μόνο τους δύο πρώτους μήνες, το TKN συνεχίζει να μειώνεται (Σχήμα 2β,γ) δείχνοντας ότι σε ένα βαθμό γίνεται και αποικοδόμηση αυτού με τη βοήθεια βακτηρίων, τα οποία δεσμεύουν άζωτο για τις λειτουργίες συντήρησής τους (Kavroulakis and Ntougias, 2011, Tsiamis et al., 2012).

Η συγκέντρωση των φαινολών παραμένει περίπου σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια παραμονής του ΥΑΕ στις ΑΔ. Υπάρχει σημαντική αρνητική συσχέτιση ($p < 0,01$) σε επίπεδο 95% της συγκέντρωσης των φαινολών με τη συγκέντρωση των ολικών αιωρούμενων στερεών (Πίνακας 2), δείχνοντας ότι οι φαινόλες βρίσκονται περισσότερο σε διαλυτή μορφή. Η μεγάλη συγκέντρωση των φαινολών δεν επιτρέπει την ανάπτυξη των μικροοργανισμών που είναι υπεύθυνοι για την αποικοδόμησή τους (Capasso et al., 1995), και η συνήθης πρακτική που ακολουθείται προκειμένου να αρχίσει η δράση των μικροοργανισμών είναι η αραιώση του ΥΑΕ (Lamia and Moktar, 2003), Kapellakis et al., 2009).

Η συγκέντρωση των TSS μειώθηκε κατά 84,9% και 81,2% στη δεξαμενή ΑΔ1 και ΑΔ2, αντίστοιχα (Σχήμα 2ε). Η μεγαλύτερη μείωση παρατηρήθηκε τους δύο πρώτους μήνες της παραμονής του ΥΑΕ στις δεξαμενές (ποσοστά απομάκρυνσης, ΑΔ1: 71,2%, ΑΔ2: 75,4%), ενώ το υπόλοιπο διάστημα η μείωση ήταν μικρότερη (ΑΔ1: 47,4%, ΑΔ2: 23,3%).

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Χρησιμοποιήθηκαν δύο ανοικτές μη αεριζόμενες (με τεχνητά μέσα) δεξαμενές για την αποθήκευση και επεξεργασία ΥΑΕ πριν την διοχέτευσή τους σε τεχνητούς υγροβιοτόπους επιφανειακής ροής. Τα αποτελέσματα από την παρακολούθηση της μεταβολής των φυσικοχημικών παραμέτρων των ΥΑΕ, σε βάθος 30 cm για συνολικό βάθος υγρής στήλης 82 έως 87 cm, έδειξαν σημαντική μείωση στην συγκέντρωση των TSS (84,9%) στη διάρκεια των δύο πρώτων μηνών. Ανάλογη μείωση της τάξεως του 83% και στις δύο δεξαμενές παρατηρήθηκε και για το NH₄-N, ενώ το TKN μειώθηκε 74,2% και 53,9% στις ΑΔ1 και

ΑΔ2, αντίστοιχα. Οι συγκεντρώσεις των υπόλοιπων ρύπων (π.χ. φαινόλες) παρέμειναν σταθερές. Από την ανάλυση συσχέτισης Pearson προέκυψε ότι η μείωση του COD, του TKN και του NH₄-N συνδέεται κυρίως με την μείωση των TSS. Η υψηλή συγκέντρωση οργανικού φορτίου και φαινολών, σε συνδυασμό με το χαμηλό pH, φαίνεται να δρουν ανασταλτικά στην ανάπτυξη των μικροοργανισμών που είναι υπεύθυνοι για την αποικοδόμηση του ρυπαντικού φορτίου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Akratos, C.S. and Tsihrintzis, V.A. 2007. *Effect of temperature, HRT, vegetation and porous media on removal efficiency of pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetlands*. Ecological Engineering, 29: 173–191
- APHA/AWWA/WEF 1998. *Standard methods for the examination of water and wastewater, 20th edition*. American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation, Washington, DC, USA.
- Athanasoulia, E., Melidis, P. and Aivasidis A. 2012. *Anaerobic waste activated sludge co-digestion with olive mill wastewater*. Water Science and Technology, In press
- Capasso, R., Evidente, A., Schivol, L., Orru', G., Marcialisl, M.A., and Crstinzlo, G. 1995. *Antibacterial polyphenols from olive oil mill waste waters*. Journal of Applied Bacteriology, 79: 393-398.
- Fountoulakis, M.S., Drakopoulou, S., Terzakis, S., Georgaki, E., and Manios, T. 2008. *Potential for methane production from typical Mediterranean agro-industrial by-products*. Biomass and Bioenergy, 32: 155 – 161
- Gikas, G.D., Tsihrintzis, V.A. and Akrotos, C.S. 2011. *Performance and modeling of a vertical flow constructed wetland – maturation pond system*, Journal of Environmental Science and Health, Part A 46: 692–708.
- Gonzalez, M.D., Moreno, E., Quevedo-Sarmiento, J., and Ramos-Cormenzana, A. 1990. *Studies on antibacterial activity of waste waters from olive oil mill (Alpechin): inhibitory activity of phenolic and fatty acids*. Chemosphere, 20: 423-432.
- Herouvim, E., Akrotos, S.C., Tekerlekopoulou, A. and Vayenas, V.D. 2011. *Treatment of olive mill wastewater in pilot-scale vertical flow constructed wetlands*. Ecological Engineering, 37: 931–939.
- Kadlec, R.H. and Wallace, S.D. 2009. *Treatment wetlands second edition*. Taylor and Francis Group, Boca Raton, USA. ISBN 978-1-56670-526-4.
- Kapellakis, I.E., Paranychianakis, N.V., Tsagarakis, K.P. and Angelakis, A.N. 2009. *Treatment of olive mill wastewater with constructed wetlands*. In: Proceedings of Asset Management of Medium and Small Wastewater Utilities, Alexandroupolis, 267-278.
- Kavroulakis, N. and Ntougias, S. 2011. *Bacterial and b-proteobacterial diversity in Olea europaea var. mastoidis- and O. europaea var. koroneiki-generated olive mill wastewaters: influence of cultivation and harvesting practice on bacterial community structure*. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 27: 57–66.
- Kotti, I.P., Gikas, G.D. and Tsihrintzis, V.A. 2010. *Effect of operational and design parameters on removal efficiency of pilot-scale FWS constructed wetlands and comparison with HSF systems*. Ecological Engineering, 36: 862–875.
- Lamia, A. and Moktar, H. 2003. *Fermentative decolorization of olive mill wastewater by Lactobacillus plantarum*. Process Biochemistry, 39: 59-65.
- Niaounakis, M. and Halvadakis, C.P. 2004. Olive-mill waste management: literature review and patent survey. Typothito-George Dardanos Publications, Athens.

- Reed, C.S., Crites, R.W. and Middlebrooks, E.J. 1995. *Natural systems for waste management and treatment*. Second Edition, McGraw Hill.
- Tsiamis ,G., Tzagkaraki, G., Chamalaki, A., Xypteras, N., Andersen, G., Vayenas, D. and Bourtzis, K. 2012. *Olive-mill wastewater bacterial communities display a cultivar specific profile*. *Current Microbiology*, 64: 197–203.
- Tsihrintzis, V.A., Akrotos, C.S., Gikas, G.D., Karamouzis, D., Angelakis, A.N. 2007. *Performance and cost comparison of a FWS and a VSF constructed wetland systems*. *Environmental Technology* 28(6): 621-628.
- Tsihrintzis, V.A. and Gikas, G.D. 2010. *Constructed wetlands for wastewater and activated sludge treatment in North Greece: A Review*. *Water Science and Technology* 61(10): 2653-2672.
- Waterman, P.G. and Mole, S. 1994. *Analysis of phenolic plant metabolites*. In: Lawton, J.H., Likens, G.E. (Eds.), *Methods in Ecology*. Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- Yalcuk, A., Baldan Pakdil, N. and Yaprak Turan, S. 2010. *Performance evaluation on the treatment of olive mill waste water in vertical subsurface flow constructed wetlands*. *Desalination*, 262: 209–214.

**ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΕΝΔΟΚΡΙΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΡΑΚΤΩΝ ΣΕ
ΤΕΧΝΗΤΟΥΣ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΟΥΣ: ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ**
Βασιλική Παπαευαγγέλου, Γεώργιος Δ. Γκίκας^{1*}, Βασίλειος Α.Τσιχριντζής²

Εργαστήριο Οικολογικής Μηχανικής και Τεχνολογίας, Τμήμα Μηχανικών
Περιβάλλοντος, Πολυτεχνική Σχολή, Δημοκρίτειο Παν/στήμιο Θράκης, 67100 Ξάνθη.

^{1*}Τηλ./Fax: +30-25410-79381, E-mail: ggkikas@env.duth.gr

²Τηλ./Fax: +30-25410-79393, E-mail: tsihrin@otenet.gr; tsihrin@env.duth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ενδοκρινικοί διαταράκτες (Endocrine Disrupting Chemicals, EDCs) ονομάζονται οι χημικές ουσίες που μιμούνται τη δράση των ορμονών, δημιουργώντας έτσι προβλήματα στο ορμονικό σύστημα των ανθρώπων και των ζώων. Οι ουσίες αυτές είναι συστατικά φαρμάκων, απορρυπαντικών, προϊόντων προσωπικής φροντίδας, πλαστικών κλπ. Οι EDCs ανιχνεύονται συχνά στις εκροές των μονάδων επεξεργασίας υγρών αποβλήτων (ΜΕΥΑ) καθώς δεν απομακρύνονται αποτελεσματικά σε αυτές. Ο ποιοτικός και ποσοτικός προσδιορισμός των ενώσεων αυτών γίνεται με υγρή και αέρια χρωματογραφία (liquid and gas chromatography). Ενώ υπάρχουν έρευνες σχετικά με την απόδοση και τους μηχανισμούς απομάκρυνσης των ουσιών αυτών σε συμβατικά συστήματα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, η βιβλιογραφία για την τύχη και συμπεριφορά τους σε συστήματα τεχνητών υγροβιοτόπων είναι ελλιπής και χρήζει περαιτέρω έρευνας. Μία ανασκόπηση της σχετικής βιβλιογραφίας παρουσιάζεται εδώ.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Φυσικά συστήματα, Τεχνητοί υγροβιότοποι, Ενδοκρινικοί διαταράκτες (EDCs).

**REMOVAL OF ENDOCRINE DISRUPTING CHEMICALS IN
CONSTRUCTED WETLANDS: A REVIEW**

Vassiliki Papaevangelou, Georgios D. Gikas¹, Vassilios A. Tsihrintzis²

Laboratory of Ecological Engineering and Technology, Department of Environmental
Engineering, Democritus University of Thrace, 67100 Xanthi, Greece.

^{1*}Ph./Fax: +30-25410-79381, E-mail: ggkikas@env.duth.gr

² Ph./Fax: +30-25410-79393, E-mail: tsihrin@otenet.gr; tsihrin@env.duth.gr

ABSTRACT

Endocrine disrupting chemicals (EDCs) imitate the function of hormones, and can interfere in the function of both the human and the animal hormonal system. These constituents are found in pharmaceuticals, detergents, personal care products, plastics and other materials. Often, they are not completely removed in conventional wastewater treatment plants, and are, therefore, present in the effluent. The predominant methods for the qualitative and quantitative determination of these constituents are liquid and gas chromatography. Although there are some studies on the occurrence and fate of the EDCs in sewage treatment plants, there are only few data about constructed wetland performance in removing these constituents.

KEY WORDS: Natural treatment systems, Constructed wetlands, Endocrine disrupting chemicals (EDCs)

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

Είναι γνωστό ότι μερικά χημικά μπορούν να παρέμβουν στο ενδοκρινικό σύστημα με διάφορους τρόπους, παράγοντας μια ανεπιθύμητη απόκριση ή διαταραχή, η οποία με τη σειρά της επιδρά στην υγεία, την ανάπτυξη και την αναπαραγωγή σε ένα μεγάλο εύρος ζώντων οργανισμών. Αυτές οι ουσίες ονομάζονται ενδοκρινικοί διαταρράκτες (EDCs). Η έκθεση τόσο των ανθρώπων όσο και των ζώων στις ουσίες αυτές έχει ως αποτέλεσμα την πιθανή εμφάνιση αλλαγών στην αναπαραγωγική ικανότητα, με συνέπεια την καρκινογένεση και την τερατογένεση. Το πρόβλημα της ενδοκρινικής διαταραχής (ED) έχει εμφανιστεί εδώ και πάρα πολλά χρόνια. Τα τελευταία όμως χρόνια έχει δημιουργηθεί ένα τεράστιο σχετικό ενδιαφέρον στην παγκόσμια επιστημονική κοινότητα καθώς και τα μέσα μαζικής ενημέρωσης (Birkett and Lester, 2003, Κορτούδης, 2006). Ο τρόπος της δράσης των EDCs μπορεί να είναι αντι-οιστρογόνος ή οιστρογόνος. Η προσοχή εστιάζεται κυρίως σε φυσικές και ανθρωπογενείς ουσίες οι οποίες μιμούνται την οιστραδιόλη (E2) προκαλώντας οιστρογόνο ή θηλυπρεπή συμπεριφορά. Οι εκροές των βιομηχανικών αλλά και των αστικών λυμάτων έχουν αναγνωριστεί ως πηγές μέσω των οποίων τα EDCs καταλήγουν στο υδατικό περιβάλλον (Gomes et al., 2003).

Αρκετοί ενδοκρινικοί διαταράκτες, ή ενδεχόμενοι ενδοκρινικοί διαταράκτες, είχαν ταξινομηθεί στο παρελθόν ως οργανικοί μικρορρυπαντές. Όσο αυξάνονται οι γνώσεις πάνω στους ενδοκρινικούς διαταράκτες τόσο αυξάνεται και η λίστα των χημικών ενώσεων που εμφανίζουν δραστηριότητες όπως αυτές των ενδοκρινικών διαταρακτών. Σε έκθεση που παρουσίασε η ευρωπαϊκή ένωση (Birkett and Lester, 2003), περιέχεται μια λίστα με ενώσεις οι οποίες θεωρούνται ύποπτες για την παρεμβολή τους στο ορμονικό σύστημα τόσο των ανθρώπων όσο και των ζώων. Στην έρευνα αυτή, 118 ενώσεις ταξινομήθηκαν ως ενδοκρινικοί διαταράκτες ή πιθανοί ενδοκρινικοί διαταράκτες. Η πλειονότητα των ενώσεων αυτών ανήκει στην κατηγορία των φυτοφαρμάκων. Ενώσεις που συμπεριλαμβάνονται στην κατηγορία των ενδοκρινικών διαταρακτών είναι οι: Στεροειδή (π.χ. οιστρογόνα), αλκυλοφαινόλες (alkylphenols, APs και alkylphenol polyethoxylates, APEOs), φυτοφάρμακα-ζιζανιοκτόνα-μυκητοκτόνα, πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs), πολυχλωριωμένα διφαινύλια (polychlorinated biphenyls, PCBs), οξυγονούχες οργανικές ενώσεις (φθαλικές ενώσεις, bisphenol A)

Οι EDCs παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον λόγω της εκτεταμένης χρήσης τους και εμφάνισής τους σε προϊόντα καθημερινής χρήσης όπως είναι τα απορρυπαντικά, τα πλαστικά, τα προϊόντα περιποίησης του σώματος κλπ. Έρευνες έχουν δείξει ότι πολλές από αυτές τις ουσίες δεν απομακρύνονται αποτελεσματικά από τις συμβατικές ΜΕΥΑ. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να ανιχνεύονται συχνά στις εκροές των μονάδων αυτών, με σημαντικές επιδράσεις τόσο στο υδάτινο όσο και στο χερσαίο οικοσύστημα, καθιστώντας αυτές κύρια πηγή ρύπανσης (Avila et al., 2010, Heberer, 2002, Outlon et al., 2010, Zarate et al., 2012).

Οι κυριότεροι ενδοκρινικοί διαταράκτες που μετρήθηκαν σε υγρά απόβλητα είναι η εννευλοφαινόλη (nonylphenol, NP) και τα αιθοξυλιωμένα παράγωγά της (NP1EO, NP2EO), η διφαινόλη-α (bisphenol A, BPA), το τρικλοσάν (triclosan, TCS). Τα επίπεδα της NP στο περιβάλλον ποικίλουν. Στα απόβλητα που εκρέουν από την υφαντουργία και τη βιομηχανία χαρτοπολτού, η NP κυμαίνεται από 2,68 έως 13,3 μg/L και από 0,02 έως 26,2 μg/L, αντίστοιχα (Birkett and Lester, 2003). Υψηλότερες συγκεντρώσεις της NP σε φυσικά νερά παρατηρούνται κοντά στις εκροές μονάδων επεξεργασίας υγρών αποβλήτων και βιομηχανίας χαρτοπολτού, αλλά και σε περιοχές με βαριά βιομηχανία. Στο Ηνωμένο Βασίλειο, οι συγκεντρώσεις της NP στην εκροή των μονάδων

επεξεργασίας λυμάτων κυμαίνονται από 0,02 μέχρι 330 µg/L, ενώ σε επιφανειακά νερά είναι μικρότερες και κυμαίνονται από 0,02 µg/L μέχρι 59 µg/L (Birkett and Lester, 2003).

Σε μονάδα επεξεργασίας λυμάτων στη νότια Ισπανία (Gomez et al., 2007) οι συγκεντρώσεις της BPA κυμαίνονταν στην είσοδο μεταξύ 0,72 µg/L και 3,4 µg/L, και στην έξοδο μεταξύ 0,14–0,98 µg/L, ενώ η μέση απομάκρυνση υπολογίστηκε σε 81%. Σε έρευνα των Nakada et al. (2006) σε 5 μονάδες επεξεργασίας λυμάτων στο Τόκιο, για συγκεντρώσεις BPA στην είσοδο μεταξύ 100 ng/L και 1000 ng/L, η απομάκρυνση της BPA υπερέβη το 92%, κάτι που συνάδει με προηγούμενες μελέτες (Clara et al., 2005).

Έρευνα σε 7 μονάδες επεξεργασίας υγρών αποβλήτων σε διάφορα μέρη της Ελλάδας (Stasinakis et al., 2007) έδωσαν μέσες τιμές εισόδου περίπου 0,13µg/L έως 0,40µg/L για την 4-n-NP, 1,33 έως 18 µg/L για την NP1EO, 0,77 έως 18 µg/L για το TCS, 0,41 έως 2µg/L για την BPA και 1,06 έως 10 µg/L για την NP2EO και τιμές εξόδου από 0,05 έως 0,50 µg/L, 0,28 έως 7 µg/L, 0,3 έως 7 µg/L, 0,13 έως 0,9µg/L και 0,20 έως 12,9 µg/L, αντίστοιχα. Μετρήσεις οι οποίες έγιναν στη κύρια μονάδα επεξεργασίας λυμάτων της Αθήνας, έδωσαν μέσες συγκεντρώσεις εισόδου: 0,257 µg/L για το TCS, 0,407 µg/L για την BPA, 0,794 µg/L για την NP, 0,788 µg/L για την NP1EO και 0,522 µg/L για την NP2EO. Οι αντίστοιχες τιμές στην έξοδο της μονάδας ήταν 0,078 µg/L, μικρότερο από το όριο ανίχνευσης, 0,452µg/L, 0,130µg/L και 0,114µg/L, αντίστοιχα (Samaras et al., 2011).

Σε έρευνα σε 139 ποτάμια διάφορων πολιτειών των ΗΠΑ, το TCS, λόγω της ευρείας χρήσης του, βρέθηκε ανάμεσα στις επτά πιο συχνά εμφανιζόμενες ουσίες (Kolpin et al., 2002). Η μέση συγκέντρωση όλων των δειγμάτων σε TCS ήταν 40 ng/L και η μέγιστη 140 ng/L. Στην Αυστραλία, σε επιφανειακά ύδατα που λειτουργούν ως αποδέκτες μονάδων επεξεργασίας λυμάτων και σε σημεία ανάντη, κατάντη ή επί της εκροής ανιχνεύτηκε TCS σε συγκεντρώσεις ως και 75 ng/L (Ying et al., 2007). Επιπλέον, έχει διαπιστωθεί ότι η ένωση αυτή σε σχετικά μικρές συγκεντρώσεις έχει δυσμενή αποτελέσματα σε ποικιλία οργανισμών (Bester, 2003).

Τα τελευταία χρόνια το ενδιαφέρον άρχισε να επικεντρώνεται στην απομάκρυνση των ενδοκρινικών διαταρακτών με τη χρήση συστημάτων φυσικών και τεχνητών υδροβιότοπων (TY). Οι TY υπόγειας ροής αποτελούν μια τεχνολογία επεξεργασίας υγρών αποβλήτων που βασίζεται σε χημικές και βιολογικές διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα στο πορώδες πληρωτικό υλικό, όπου φυτεύονται και αναπτύσσονται υδροχαρή φυτά (π.χ. καλάμια, βούρλα και ψαθί). Οι TY, όπως όλα τα φυσικά συστήματα επεξεργασίας, χρησιμοποιούν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως ηλιακή ακτινοβολία, κινητική ενέργεια του ανέμου, ενέργεια του νερού της βροχής, το έδαφος και την αποθήκευση ενέργειας σε βιομάζα. Τα συστήματα TY επιτυγχάνουν μεγάλη απομάκρυνση ρύπων που οφείλεται στα φυτά τους, τα οποία με το ριζικό τους σύστημα προσφέρουν συγχρόνως μια μεγάλη επιφάνεια για ανάπτυξη μικροβίων για επιπλέον πρόσληψη και αποικοδόμηση ρύπων (Huang et al., 2000, Yang et al., 2011). Το *Phragmites* (κοινό καλάμι) είναι ένα πολύ γνωστό είδος φυτού που χρησιμοποιείται σε TY λόγω της ικανότητάς του να αντέχει σε δύσκολες περιβαλλοντικές συνθήκες και σε υψηλές συγκεντρώσεις ρύπων (Williams, 2002).

Υπάρχουν αρκετές έρευνες που αναφέρονται στην απόδοση των TY και άλλων φυσικών συστημάτων στην απομάκρυνση των κοινών ρύπων (π.χ. BOD, COD, αμμωνία, νιτρικά, φώσφορος) καθώς και στους μηχανισμούς με τους οποίους γίνεται αυτό (Akratos and Tsihrintzis, 2007, Tsihrintzis et al., 2007, Gikas et al., 2007, Akratos et al., 2009, Stefanakis and Tsihrintzis, 2009, Tsihrintzis and Gikas, 2010, Gikas and

Tsihrintzis, 2010, Gikas et al., 2011, Stefanakis and Tsihrintzis, 2011, Papadopoulos and Tsihrintzis, 2011). Οι έρευνες σχετικά με την απομάκρυνση των EDCs σε συστήματα ΤΥ είναι περιορισμένες και επομένως η τύχη και η συμπεριφορά αυτών των ουσιών είναι ακόμη ασαφής (Belmont and Metcalfe, 2003). Οι ΤΥ υπόγειας ροής έχουν προταθεί και χρησιμοποιηθεί για την απομάκρυνση φαινολών που βρίσκονται στα υγρά απόβλητα. Αυτό το επιτυγχάνουν λόγω του πληρωτικού υλικού τους, των φυτών τους καθώς και των μικροβίων που βρίσκονται και αναπτύσσονται σε τέτοια συστήματα (Ying et al., 2003; Changwichan, 2007).

Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται οι κυριότερες χημικές ενώσεις που δρουν ως ενδοκρινικοί διαταράκτες, καθώς και μελέτες σχετικές με την απόδοση συστημάτων τεχνητών υδροβιοτόπων στην απομάκρυνση αυτών.

2. ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ EDCs

Η τύχη και η συμπεριφορά των EDCs επηρεάζονται από τις φυσικοχημικές τους ιδιότητες. Η απομάκρυνση των EDCs στις ΜΕΥΑ κατά τη φάση της καθίζησης ή της βιολογικής επεξεργασίας καθορίζεται από τη διαλυτότητα τους και τους συντελεστές κατανομής τους. Κατά τη διαδικασία της καθίζησης ή της βιολογικής επεξεργασίας, ως ιδανικές συνθήκες θεωρούνται η χαμηλή διαλυτότητα στο νερό σε συνδυασμό με υψηλό συντελεστή κατανομής οργανικού άνθρακα (K_{oc}) ή υψηλό συντελεστή κατανομής οκτανόλης/νερού (K_{ow}), ενώ κατά τη μεταφορά στα υπόγεια ύδατα απαιτείται υψηλή διαλυτότητα (Birkett and Lester, 2003), (Πίνακας 1). Οι πιο συχνά και σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις ενδοκρινικοί διαταράκτες που ανιχνεύονται στα επεξεργασμένα αστικά λύματα και στα υδάτινα περιβάλλοντα είναι οι: BPA, NP, NP1EO, NP2EO, TCS.

2.1 BPA

Η bisphenol A (2,2-(4,4-Dihydroxydiphenyl)propane), με μοριακό τύπο $C_{15}H_{16}O_2$, έχει σταθερά κατανομής $\log K_{ow}$ ίση με 3,4 που υποδηλώνει τη λιποφιλικότητά της και την τάση της για δέσμευσή της στη στερεή φάση στο περιβάλλον. Επίσης, έχει διαλυτότητα 120 mg/L στους 25°C, ενώ έχει τάση ατμών ίση με 4×10^{-8} mm Hg στους 25°C. Η σταθερά Henry έχει τιμή $KH = 1 \times 10^{-10}$ atm*m³/mole (Howard, 1990, Birkett and Lester, 2003).

Η BPA παράγεται σε μεγάλες ποσότητες, με πάνω από το 90% να χρησιμοποιείται στη βιομηχανία πλαστικών για την παραγωγή εποξικών, πολυκαρβονικών και πολυσουλφονικών ρητινών καθώς και επιβραδυντικών φλόγας (Howard, 1990). Χρησιμοποιείται επίσης σε πλαστικά συσκευασίας τροφίμων και ποτών για χρήσεις όπως η επικάλυψη των μεταλλικών δοχείων για τρόφιμα, των πωμάτων των μπουκαλιών και των σωληνώσεων πόσιμου νερού (Birkett and Lester, 2003). Χρησιμοποιείται και ως πρόσθετο στο θερμικό χαρτί, στην οδοντιατρική και ως αντιοξειδωτικό στα πλαστικά. Περίπου το 30% της συνολικής παγκόσμιας παραγωγής BPA γίνεται στην Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ), με συνολικά 210.000 τόνους να παράγονται το 1995 στη Γερμανία.

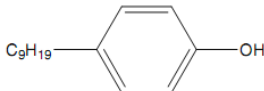
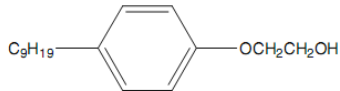
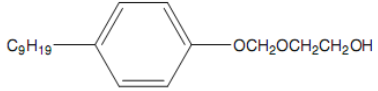
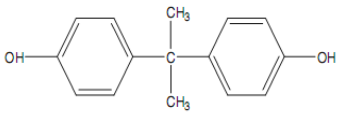
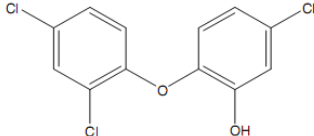
Έρευνες έχουν δείξει ότι η BPA που βρίσκεται στα μεταλλικά δοχεία συσκευασίας τροφίμων, μπορεί να διεισδύσει μέσα στο τρόφιμο και μέσω της τροφικής αλυσίδας να αναπτύξει οιστρογόνο δραστηριότητα. Η μέγιστη ποσότητα που έχει ανιχνευθεί σε μεταλλικά δοχεία ανέρχεται σε 80 μg/kg. Οι τιμές αυτές είναι κάτω από το όριο που έχει θέσει η ΕΕ για BPA που διεισδύει στα τρόφιμα. Άλλες έρευνες έδειξαν

πως η BPA εισέρχεται από τα μεταλλικά δοχεία στα λαχανικά (Birkett and Lester, 2003). Λόγω της ευρείας χρήσης της στα νοικοκυριά και τη βιομηχανία αναμένεται η ύπαρξή της στα ανεπεξέργαστα και στα επεξεργασμένα υγρά απόβλητα αλλά και στην ύλη. Επίσης, οι χώροι υγειονομικής ταφής απορριμμάτων αποτελούν σημαντικές πηγές διάθεσης της BPA στο περιβάλλον. Παρόλα αυτά, η κυριότερη πηγή διάθεσης της BPA στο περιβάλλον είναι η βιομηχανία.

2.2 ΑΛΚΥΛΟΦΑΙΝΟΛΕΣ (NP, NP1EO, NP2EO)

Οι αλκυλοφαινόλες αποτελούνται από αλκύλια διαφόρων μεγεθών που είναι συνδεδεμένα σε διάφορες θέσεις φαινολικών δακτυλίων. Οι ενώσεις που παρουσιάζουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον είναι κυρίως ενώσεις της NP. Οι ενώσεις αυτές ανήκουν στις επιφανειοδραστικές ουσίες και εμφανίζουν λιποφιλική συμπεριφορά. Η NP έχει οιστρογόνο δράση η οποία εξαρτάται από τη φύση του υποκαταστάτη στο αλκύλιο (Birkett and Lester, 2003).

Πίνακας 1. Φυσικοχημικές ιδιότητες EDCs

EDCs	Δομή	Διαλυτότητα στο νερό (mg/L)	logK _{ow}	pK _a
4-Nonylphenol		5,4	4,48	10,7
NP ₁ EO		3,02	4,17	
NP ₂ EO		3,38	4,21	
Bisphenol A		120-300	3,4	10,3
Triclosan		12	4,78	7,9

Με τιμή logK_{ow} να κυμαίνεται από 4,17-4,48 (Πίνακας 1) οι αλκυλοφαινόλες έχουν την τάση να δεσμεύονται στη στερεή φάση στο περιβάλλον. Αυτές οι ενώσεις χρησιμοποιούνται σε πολλές βιομηχανικές και εμπορικές δραστηριότητες καθώς και στα νοικοκυριά. Βρίσκονται στα απορρυπαντικά, στα καθαριστικά μηχανών, στα χρώματα, στα μικροβιοκτόνα, στην υφαντουργία, στη μεταλλουργία καθώς και σε πολλά προϊόντα προσωπικής χρήσης. Επομένως, οι ενώσεις αυτές εισέρχονται στο περιβάλλον μέσω της παραγωγής, της χρήσης αλλά και της απόρριψής τους ενώ το εύρος της χρήσης των αποδεικνύει την άμεση έκθεση του ανθρώπου στις ενώσεις αυτές. Υπολείμματα των NP και NPEOs έχουν βρεθεί σε τρόφιμα ως αποτέλεσμα της χρήσης μικροβιοκτόνων, καθαριστικών και απολυμαντικών που χρησιμοποιούνται στην

συσκευασία τροφίμων. Σε έρευνα που έγινε σε σειρά τροφίμων, βρέθηκαν υπολείμματα της NP ακόμη και σε γάλα για μωρά. Η παρουσία των ουσιών αυτών σε τρόφιμα δημιουργεί αυξημένη ανησυχία καθώς έχουν την τάση να βιοσυσσωρεύονται (Birkett and Lester, 2003). Επίσης, με την χρήση καλλυντικών προϊόντων, όπως το make up, κρέμες για το δέρμα, προϊόντα περιποίησης μαλλιών και αφρόλουτρα, η έκθεση στις ενώσεις αυτές είναι άμεση. Επειδή δεν υπάρχουν γνωστές φυσικές πηγές της NP, η διαδεδομένη παρουσία της στο περιβάλλον αποδίδεται στις ανθρώπινες δραστηριότητες. Η ετήσια παγκόσμια παραγωγή αλκυλοφαινολών είναι περίπου 650.000 τόνοι. Το μεγαλύτερο ποσοστό των αλκυλοφαινολών και των παράγωγών τους που χρησιμοποιούνται στο εμπόριο και στη βιομηχανία αποβάλλεται μέσω του αποχετευτικού δικτύου και καταλήγει στις μονάδες επεξεργασίας λυμάτων. Κατά την αποδόμηση πολλά από τα παράγωγα της NP (alkylphenol ethoxylates) μεταβολίζονται προς NP, η οποία θεωρείται πιο ανθεκτική και τοξική από τα παράγωγα.

2.3 ΤΡΙΚΛΟΣΑΝ (TCS)

Το triclosan (5-chloro-2-(2,4-dichlorophenoxy) phenol), είναι αντιβακτηριδιακό αντιδραστήριο και συντηρητικό εγκεκριμένο από την Οδηγία 76/768/EE. Πρόκειται για μια μη πτητική οργανική ένωση με πολύ χαμηλή διαλυτότητα στο νερό. Κάποια γενικές ιδιότητές της είναι: τιμή pK_a ίση με 7,9, τάση ατμών ίση με 7×10^{-4} Pa στους 25°C , διαλυτότητα ίση με 12 mg/L στους 20°C (Reiss et al., 2002) και $\log K_{ow}$ ίσο με 4,78 σε ουδέτερο pH. Η υψηλή τιμή της $\log K_{ow}$ υποδεικνύει την υψηλή τάση της για σωματιδιακή ρόφηση (Halden and Paull, 2005).

Η ουσία αυτή βρίσκεται σε προϊόντα προσωπικής φροντίδας καθώς και σε προϊόντα με βακτηριοστατική δράση ενάντια σε ένα μεγάλο φάσμα μικροοργανισμών. Συγκεκριμένα εντοπίζεται σε καλλυντικά προϊόντα όπως οι οδοντόκρεμες, τα στοματικά διαλύματα, τα σαπούνια, τα σαμπουάν, τα αποσμητικά, οι κρέμες και οι λοσιόν περιποίησης του δέρματος (Sabaliunas et al., 2003). Οι συγκεντρώσεις και η κατανομή του TCS στο υδατικό περιβάλλον εξαρτώνται από τη χρήση του, το ρυθμό απομάκρυνσής του κατά την επεξεργασία των λυμάτων, την προσρόφηση, τη βιολογική και χημική αποδόμησή του στα επιφανειακά νερά. Ενώ αρχικά θεωρήθηκε ότι το TCS σκοτώνει τα βακτήρια, αποδείχθηκε πρόσφατα ότι στοχεύει σε ένα συγκεκριμένο βακτηριακό βιοσυνθετικό ένζυμο στα θετικά και αρνητικά κατά Gram βακτήρια και τα μυκοβακτήρια (Sabaliunas et al., 2003). Οι μηχανισμοί δράσης του TCS είναι ποικίλοι και μοιάζουν με τους μηχανισμούς των αντιβιοτικών.

3. ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΕΝΔΟΚΡΙΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΡΑΚΤΩΝ

Ο προσδιορισμός των ενώσεων αυτών σε συγκεντρώσεις 1 ng/L και πιο χαμηλά σε περίπλοκα περιβάλλοντα, όπως αυτά των υγρών αποβλήτων, τα οποία περιέχουν διάφορα συστατικά που παρεμβαίνουν στην ανάλυση των ουσιών αυτών, είναι ιδιαίτερα δύσκολη. Οι κυρίαρχες μέθοδοι ποιοτικής και ποσοτικής ανάλυσης των ουσιών είναι η υγρή και η αέρια χρωματογραφία (Liquid and Gas Chromatography). Η αέρια χρωματογραφία περιορίζεται σε ενώσεις οι οποίες είναι πτητικές και θερμικά σταθερές, εκτός βέβαια αν εφαρμοστεί παραγωγοποίηση στα δείγματα πριν την ανάλυση. Η χρωματογραφική ανάλυση είναι το τελικό στάδιο μιας περίπλοκης, ιδιαίτερα δύσκολης, χρονοβόρας και πολυέξοδης διαδικασίας, η οποία περιλαμβάνει εκχύλιση των ενώσεων αυτών από την στερεά ή υγρή φάση σε οργανικό διαλύτη (solid/liquid phase extraction) (Birkett and Lester, 2003). Μετά τη δειγματοληψία, τα

δείγματα οξινίζονται άμεσα (ρύθμιση του pH στην τιμή 2 ώστε να αποφευχθεί οποιαδήποτε μικροβιακή δραστηριότητα), διηθούνται με φίλτρα τουλάχιστον 0,45 μm και αναλύονται σε διάστημα 4 ημερών. Στα δείγματα γίνεται εκχύλιση (στερεάς ή υγρής φάσης) με οργανικούς διαλύτες.

Ως εκχύλιση ορίζεται η παραλαβή μιας ουσίας Α από μίγμα ουσιών με τη χρήση ενός διαλύτη. Κυρίως χρησιμοποιούνται οργανικοί διαλύτες. Η εκχύλιση είναι μια από τις σημαντικότερες μεθόδους διαχωρισμού με ευρύτατη εφαρμογή σε μεγάλη ποικιλία συστατικών και δειγμάτων. Η εκχύλιση στερεάς φάσης (solid phase extraction, SPE) αποτελεί μια ευρύτατα χρησιμοποιούμενη σύγχρονη τεχνική προετοιμασίας του προς μέτρηση (δοκιμή ή ανάλυση) δείγματος. Με τη διαδικασία της SPE επιδιώκεται η δέσμευση ουσιών που θέλουμε να μετρήσουμε από τα δείγματα. Οι τεχνικές αυτές υστερούν στο γεγονός ότι στο τελευταίο στάδιο απαιτούν μείωση του όγκου του εκχυλίσματος μέσω εξάτμισης μιας και μόνο μερικά μικρόλιτρα μπορούν να εισαχθούν σε μηχανήματα διαχωρισμού και ανίχνευσης ρύπων όπως αυτά της υγρής και αέριας χρωματογραφίας. Τα προβλήματα που προκύπτουν κατά τη διάρκεια αυτού του βήματος είναι η απώλεια των πιο πτητικών ουσιών καθώς επίσης και η μείωση της ευαισθησίας της τεχνικής που χρησιμοποιείται.

4. ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ EDCs ΣΕ ΤΕΧΝΗΤΟΥΣ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΟΥΣ

Στην έρευνα των Belmont and Metcalfe (2003), μελετήθηκε η αποτελεσματικότητα απομάκρυνσης των NP και NPEO με την χρήση τεχνητού υγροβιοτόπου οριζόντιας υπόγειας ροής. Το σύστημα αποτελούνταν από 6 κελιά εκ των οποίων 4 ήταν φυτεμένα με calla lily (*Zantedeschia aethiopica*) και τα υπόλοιπα δύο έμειναν αφύτευτα. Το πληρωτικό υλικό του συστήματος αποτελούνταν από ένα στρώμα πάχους 30 cm με χαλίκι διαμέτρου 3-5 cm. Το συνολικό πορώδες ήταν 0,35. Ο υγροβιοτόπος φορτιζόταν με τεχνητό λύμα συγκεκριμένης σύστασης, το οποίο προσομοίωνε ασθενές λύμα από εγκαταστάσεις επεξεργασίας της Βόρειας Αμερικής (Metcalfe and Eddy, 2001). Η ποιοτική και ποσοτική ανάλυση των ουσιών αυτών έγινε με υγρή χρωματογραφία με ιονισμό ηλεκτροψεκασμού και φασματομετρία μάζας (LC-ESI-MS). Η απόδοση απομάκρυνσης των NPEO ήταν πολύ ικανοποιητική. Το σύστημα μείωσε NP(1-3)EO από 441 μg/L σε 13 (απομάκρυνση 97%). Η απόδοση ήταν μικρότερη όσον αφορά την NP (54%). Αυτό πιθανό να οφείλεται στο γεγονός ότι τα παράγωγά της NP (NP(1-3)) διασπώνται και καταλήγουν σε NP μέσα στο σύστημα. Οι απομακρύνσεις των ρύπων αυτών ήταν ελαφρώς μεγαλύτερες στα αφύτευτα κελιά (98% και 54% για τις ενώσεις NP(1-3)EO και NP, αντίστοιχα.

Οι Waltman et al. (2006) μελέτησαν την απόδοση τεχνητού υγροβιοτόπου επιφανειακής ροής στην απομάκρυνση του TCS. Ο υγροβιοτόπος είχε διαστάσεις 46 m x 46 m, αποτελούνταν από τέσσερες λωρίδες που μεταξύ τους χωρίζονταν με χωμάτινο ανάχωμα και το βάθος κυμαινόταν από μερικά εκατοστά στην είσοδο μέχρι 0,6 m στην έξοδο. Ο υγροβιοτόπος δεχόταν τα επεξεργασμένα λύματα από μια εγκατάσταση επεξεργασίας υγρών αποβλήτων. Η ανάλυση των δειγμάτων που λαμβάνονταν από την είσοδο και την έξοδο του υγροβιοτόπου, γινόταν με χρήση αέριας χρωματογραφίας και φασματομετρίας μάζας (GC-MS). Η απομάκρυνση του TCS στον τεχνητό υγροβιοτόπο υπολογίστηκε σε περίπου 80%.

Σύμφωνα με άλλη έρευνα, υγροβιοτόποι επιφανειακής ροής με ψαθί απομάκρυναν μέχρι και 80% τη BPA, με υδραυλικό χρόνο παραμονής 10-15 ημέρες, χωρίς αρνητικές συνέπειες λόγω τοξικότητας στα φυτά (Changwichan, 2007). Επίσης, οι Park et al. (2009) μελέτησαν σύστημα τεχνητών υγροβιοτόπων επιφανειακής ροής

φυτεμένων με ψαθί, οι οποίοι δέχονταν λύμα από την έξοδο ενός συστήματος επεξεργασίας λυμάτων. Ο υδραυλικός χρόνος παραμονής ήταν 6 ώρες και η παροχή 1800 m³/day. Οι απομακρύνσεις κι εδώ ήταν ικανοποιητικές, κυρίως για το TCS και κυμαίνονταν από 70% έως 90%.

Οι Avila et al. (2010) μελέτησαν την απομάκρυνση της BPA με την χρήση τριών τεχνητών υδροβιότοπων οριζόντιας υπόγεια ροής στο πανεπιστήμιο της Καταλονίας. Οι 2 από αυτούς είχαν επιφάνεια 0,65 m² και ήταν τοποθετημένοι παράλληλα ο ένας στον άλλο και ο τρίτος είχε επιφάνεια 1,65 m² και δεχόταν την έξοδο και των δύο προηγούμενων. Το πληρωτικό υλικό τους αποτελούταν από ένα στρώμα 30 cm με χαλίκι D₆₀=5 mm. Οι υδροβιότοποι είχαν φυτευθεί με το κοινό καλάμι (*Phragmites Australis*) και είχαν πορώδες 40%. Ο εφοδιασμός με λύμα γινόταν από μια εγκατάσταση η οποία βρισκόταν κοντά στο πανεπιστήμιο. Το λύμα περνούσε, πριν μπει στους δύο μικρούς υδροβιότοπους, από έναν αντιδραστήρα ανοδικής υδρόλυσης (hydrolytic upflow sludge bed reactor (HUSB) ώστε να προστεθεί στο όλο σύστημα ένα στάδιο προεπεξεργασίας. Δείγματα λαμβάνονταν από όλες τις εξόδους (δηλαδή, όλων των δεξαμενών καθώς και από την έξοδο του αντιδραστήρα). Η συγκέντρωση της BPA στην είσοδο κυμαινόταν από 0,05 μg/L έως 46,8 μg/L. Οι μέσες τιμές της ένωσης ήταν 1,5±0,15μg/L, 0,3±0,1μg/L, 0,2±0,1μg/L και 0,05±0,09μg/L στην έξοδο του αντιδραστήρα, των δύο μικρών υδροβιότοπων και του μεγαλύτερου υδροβιότοπου, αντίστοιχα. Τα ποσοστά απομάκρυνσης κυμαίνονταν από 70% έως και 90%. Οι μηχανισμοί απομάκρυνσης της BPA κατά τους Avila et al. (2010) είναι η βιοαποικοδόμηση και η προσρόφησή στο πληρωτικό υλικό.

Οι Yang et al. (2011) διερεύνησαν την απόδοση φυσικού υδροβιότοπου στην απομάκρυνση αλκυλοφαινόλων (NP, BPA, 4-t-octylphenol, 2,4-dichlorophenol). Ο υδροβιότοπος βρίσκεται στη βόρεια Κίνα και αποτελεί έναν από τους μεγαλύτερους υδροβιότοπους στον κόσμο με επιφάνεια 8x10⁴ ha. Η μελέτη αυτή επικεντρώθηκε σε ένα τμήμα επιφάνειας 659 ha το οποίο αποτελείται από 4 κελιά, 1 km x 1,74 km το καθένα. Οι Yang et al. (2011) ανέπτυξαν ένα ισοζύγιο νερού-μάζας και ανέλυσαν τους πιθανούς μηχανισμούς και ικανότητα απομάκρυνσης των φαινόλων. Συγκεκριμένα αρχικά ρύθμιζαν το pH στα δείγματα (pH=2) στη συνέχεια τα εκχύλιζαν με διαλύτη DCM, έπειτα τα εξάτμιζαν με αέριο άζωτο και τέλος τα παραγωγοποιούσαν με BSTFA. Μετά από αυτήν την προεργασία τα δείγματα αναλύονταν με την χρήση αέριας χρωματογραφίας φασματομετρίας μάζας (GC-MS). Παρόμοια διαδικασία ακολουθήθηκε και για δείγματα ιζήματος. Οι συγκεντρώσεις στην είσοδο ήταν 134, 110, 33, 7 και 274 ng/L για τις 4-NP, BPA, 4-t-OP και DCP, αντίστοιχα. Στην έξοδο οι συγκεντρώσεις ήταν φανερά μειωμένες (31,2, 55,6, 4,95, 3,52 και 95,2 ng/L, αντίστοιχα) με ποσοστά απομάκρυνσης 94,3%, 86,3%, 96,3%, 87,3% και 91,6% για τις 4-NP, BPA, 4-t-OP και DCP, αντίστοιχα. Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι η απόδοση στην απομάκρυνση για όλες τις φαινόλες ήταν ικανοποιητική, γεγονός που δείχνει την αποτελεσματικότητα των υδροβιότοπων. Οι Yang et al. (2011) παρατήρησαν επίσης ότι το σύστημα ήταν πιο αποδοτικό κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού με μεγαλύτερες απομακρύνσεις των ρύπων. Συμπερασματικά, υψηλότερες θερμοκρασίες ευνοούν την ανάπτυξη των φυτών, το μεταβολισμό των μικροβίων και επομένως την απομάκρυνση των ουσιών αυτών.

Οι Zarate et al. (2012) μελέτησαν την απομάκρυνση του TCS με συστήματα τεχνητών υδροβιότοπων επιφανειακής ροής καθώς και την συσσώρευσή τους στα φυτά και στο πληρωτικό υλικό. Ένας μεγάλος υδροβιότοπος επιφάνειας 0,21 ha (κατασκευής 1999) στον οποίο εισερχόταν το 1% της εξόδου από μια μεγάλη εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων (4,54 x 10⁷ L/d). Το πληρωτικό του υλικό ήταν άργιλος και τα

φυτά που φυτεύτηκαν ήταν *T. latifolia*, *P. cordata* και *S. graminea*. Η δειγματοληψία γινόταν σε διάφορα μέρη του υδροβιότοπου. Η ανάλυση των δειγμάτων γινόταν με GC-MS. Οι συγκεντρώσεις του TCS έτειναν να μειώνονται κατά το μήκος του υδροβιότοπου με μεγαλύτερες συγκεντρώσεις στην είσοδο και χαμηλότερες στην έξοδο. Συμπερασματικά οι ουσίες αυτές συσσωρεύονται στο πληρωτικό υλικό, στις ρίζες και επομένως στα φυτά.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι υδροβιότοποι μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μέσο απομάκρυνσης των ενδοκρινικών διαταρακτών που βρίσκονται στα υγρά απόβλητα. Στην απομάκρυνση των ενώσεων αυτών, ευνοεί όλο το σύστημα του υδροβιότοπου, όπως το πληρωτικό του υλικό, τα φυτά και τα μικρόβια που αναπτύσσονται σε αυτόν (Ying et al., 2003; Changwichan, 2007). Οι διαδικασίες που βοηθούν στην απομάκρυνση των EDCs είναι η κατακράτησή τους στο πληρωτικό υλικό (καθίζηση, διήθηση, προσρόφηση) (Imfeld et al., 2009). Επίσης, η βλάστηση βοηθά στην κατακράτησή τους και επομένως στην απομάκρυνσή τους από τα υγρά απόβλητα (Schulz and Peall, 2001). Η κατακράτηση βέβαια των ουσιών αυτών εξαρτάται από τον όρο $\log K_{ow}$ καθώς και τη διαλυτότητά τους στο νερό. Σχετικά υψηλές τιμές του $\log K_{ow}$ και χαμηλή διαλυτότητα στο νερό βοηθάνε στο να προσροφηθεί πιο εύκολα η ένωση στο πληρωτικό υλικό (Li et al., 2007, Trapp and Karlson, 2001). Θεωρείται επίσης ότι τα φυτά και το πληρωτικό υλικό είναι ευεργετικά και βοηθούν την ανάπτυξη των μικροβίων, η οποία με τη σειρά της συμβάλλει στην μικροβιακή αποικοδόμηση των EDCs (Dordio et al., 2009, Hijosa-Valsero et al., 2010b, Zhang et al., 2011).

Παρά το γεγονός ότι υπάρχουν διάφορες έρευνες που αποδεικνύουν την απομάκρυνση των ουσιών αυτών μέσα σε ένα σύστημα υδροβιότοπου, οι γνώσεις πάνω στους μηχανισμούς απομάκρυνσης καθώς και στις αλληλεπιδράσεις μέσα στο περιβάλλον του υδροβιότοπου είναι ελλιπείς εξαιτίας του γεγονότος ότι οι υδροβιότοποι αποτελούν πολύπλοκα συστήματα. Γι αυτό το λόγο πρέπει να γίνουν περισσότερες έρευνες όσον αφορά τους μηχανισμούς απομάκρυνσης, όπως είναι η προσρόφηση στο πληρωτικό υλικό, η δέσμευση από τα φυτά, η βιοαποικοδόμηση κλπ.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Κορδούτης, Κ. 2006. *Διερεύνηση της συμπεριφοράς των ουσιών Nonylphenol, Bisphenol A και Triclosan κατά την επεξεργασία υγρών αποβλήτων με τη μέθοδο της Ενεργούς Ιλύος*. Μεταπτυχιακή διατριβή, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Τμήμα Περιβάλλοντος, 27-40 σελ.
- Οδηγία 76/768/EE Council Directive on the Approximation of the Laws of the Member States Relating to Cosmetic Products. Brussels, Belgium: European Commission, 1999 Edition.
- Akratos, C.S. and Tsihrintzis, V.A. 2007. *Effect of temperature, HRT, vegetation and porous media on removal efficiency of pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetlands*. Ecological Engineering, 29: 173-191.
- Akratos, C.S., Papaspyros, J.N.E. and Tsihrintzis, V.A. 2009. *Total nitrogen and ammonia removal prediction in horizontal subsurface flow constructed wetlands: Use of artificial neural networks and development of a design equation*. Bioresource Technology, 100: 586-596.

- Avila, C., Pedescoll, A., Matamoros, V., Bayona, J.M. and Garcia, J. 2010. *Capacity of a horizontal subsurface flow constructed wetland system for the removal of emerging pollutants: An injection experiment*. Chemosphere, 81: 1137–1142.
- Belmont, M.A. and Metcalfe, C.D. 2003. *Feasibility of using ornamental plants (Zantedeschia aethiopica) in subsurface flow treatment wetlands to remove nitrogen, chemical oxygen demand and nonylphenol ethoxylate surfactants—a laboratory-scale study*. Ecological Engineering, 21: 233–247.
- Bester, K. 2003. *Triclosan in a sewage treatment process – balances and monitoring data*. Pergamon. Water Research, 37: 3891–3896.
- Birkett, W. J and Lester, J. N. 2003. *Endocrine Disrupters in Wastewater and Sludge Treatment Processes*. CRC Press LLC, London, U.K.
- Clara, M., Strenn, B., Gans, O., Martinez, E., Kreuzingera, N. and Kroissa, H. 2005. *Removal of selected pharmaceuticals, fragrances and endocrine disrupting compounds in a membrane bioreactor and conventional wastewater treatment plants*. Water Research, 39: 4797–4807.
- Changwichan, K. 2007. *Removal and Fate of Bisphenol A in Constructed Wetland System*. Mahidol University.
- Dordio, A.V., Esteveao Candeias, A.J., Pinto, A.P., Teixeira Costa, C. and Palace Carvalho, A.J. 2009. *Preliminary media screening for application in the removal of clofibric acid, carbamazepine and ibuprofen by SSF-constructed wetlands*. Ecological Engineering, 35: 290–302.
- Gikas, G.D., Akratos, C.S and Tsihrintzis, V.A. 2007. *Performance monitoring of a vertical flow constructed wetland treating municipal wastewater*, Global NEST: The International Journal, 9: 277–285.
- Gikas, G.D. and Tsihrintzis, V.A. 2010. *On-site treatment of domestic wastewater using a small-scale horizontal subsurface flow constructed wetland*. Water Science and Technology, 62: 603–614.
- Gikas, G.D., Tsihrintzis, V.A. and Akratos, C.S. 2011. *Performance and modeling of a vertical flow constructed wetland – maturation pond system*, Journal of Environmental Science and Health, Part A 46: 692–708.
- Gomes, R. L., Scrimshaw, M. D. and Lester, J. N. 2003. *Determination of endocrine disrupters in sewage treatment and receiving waters*, Trends in Analytical Chemistry, 22: 697–707.
- Gomez, M. J., Martinez Bueno, M. J., Lacorte, S., Fernandez-Alba, A.R. and Aguera, A. 2007. *Pilot survey monitoring pharmaceuticals and related compounds in a sewage treatment plant located on the Mediterranean coast*. Chemosphere, 66: 993–1002.
- Halden, R.U. and Paull, D.H. 2005. *Co-occurrence of triclocarban and triclosan in US water resources*. Environmental Science and Technology, 39: 1420–1426.
- Heberer, T. 2002. *Tracking persistent pharmaceutical residues from municipal sewage to drinking water*. Journal of Hydrology, 266: 175–189.
- Hijosa-Valsero, M., Matamoros, V., Martín-Villacorta, J., Bécares, E. and Bayona, J.M. 2010. *Assessment of full-scale natural systems for the removal of PPCPs from wastewater in small communities*. Water Research, 44: 1429–1439.
- Howard, H. P. 1990. *Handbook of Environmental Fate and Exposure Data For Organic Chemical*. LEWIS PUBLISHERS, Vol I Large Production and Priority Pollutants, USA.
- Huang, J., Reneau, R. and Hageborn, C. 2000. *Nitrogen removal in constructed wetlands employed to treat domestic wastewater*. Water Research, 34: 582–2588.

- Imfeld, G., Braeckevelt, M., Kusch, P. and Richnow, H.H. 2009. *Monitoring and assessing processes of organic chemicals removal in constructed wetlands*. Chemosphere, 74: 349–362.
- Kolpin, D.W., Furlong, E.T., Meyer, M.T., Thurman, E.M., Zaugg S.D. and Barber, L.B. 2002. *Pharmaceuticals, hormones and other organic wastewater contaminants in U.S. streams, 1999–2000: a national reconnaissance*. Environmental Science and Technology, 36: 1202–1211.
- Li, X.L., Luan, T.G., Liang, Y., Wong, M.H. and Lan, C.Y. 2007. *Distribution patterns of octylphenol and nonylphenol in the aquatic system at Mai Po Marshes Nature Reserve, a subtropical estuarine wetland in Hong Kong*. Environmental Science, 19: 657–662.
- Metcalf and Eddy Inc. 1991. *Wastewater Engineering. Treatment, Disposal and Reuse*. Third edition. MacGraw-Hill Inc., NY, 1333 pp.
- Nakada, N., Tanishima, T., Shinohara, H., Kiri, K. and Takada, H. 2006. *Pharmaceutical chemicals and endocrine disrupters in municipal wastewater in Tokyo and their removal during activated sludge treatment*. Water Research, 40: 3297–3303.
- Oulton, R.L., Kohn, T. and Cwiertny, D.M. 2010. *Pharmaceuticals and personal care products in effluent matrices: a survey of transformation and removal during wastewater treatment and implications for wastewater management*. Journal of Environmental Monitoring, 12: 1956–1978.
- Papadopoulos, F.H. and Tsihrintzis, V.A. 2011. *Assessment of a full-scale duckweed pond system for septage treatment*. Environmental Technology, 32: 795–804.
- Park, N., Vanderford, B.J., Snyder, S., Sarp, S., Don Kim, S. and Cho, J. 2008. *Effective controls of micropollutants included in wastewater effluent using constructed wetlands under anoxic condition*. Ecological Engineering, 35: 418–423.
- Reiss, R., Mackay, N., Habig, C. and Griffin, J. 2002. *An ecological risk assessment for triclosan in lotic systems following discharge from wastewater treatment plants in the United States*. Environmental Toxicology and Chemistry, 21: 2483–92.
- Sabaliunas, D., Webb, S., Hauk, A., Jacob, M. and Eckhoff, W. 2003. *Environmental fate of Triclosan in the river Aire Basin, UK*. Water Research, 37: 3145–3154.
- Samaras, V.G., Thomaidis, N.S., Stasinakis A.S. and Lekkas, T.D. 2011. *An analytical method for the simultaneous trace determination of acidic pharmaceuticals and phenolic endocrine disrupting chemicals in wastewater and sewage sludge by gas chromatography-mass spectrometry*. Analytical Bioanalytical Chemistry, 399: 2549–2561.
- Schulz, R. and Peall, S.C. 2001. *Effectiveness of a constructed wetland for retention of nonpoint-source pesticide pollution in the Lourens river catchment, South Africa*. Environmental Science and Technology, 35: 422–426.
- Stasinakis, A.S., Gatidou, G., Thomaidis, N.S., Mamais, D. and Lekkas, T.D. 2007. *An integrated approach for the investigation of occurrence, fate and toxicity of endocrine disrupting chemicals in wastewater treatment systems*. Proceedings of the 10th International Conference on Environmental Science and Technology, Kos island, Greece, 1349–1356.
- Stefanakis, A.I. and Tsihrintzis, V.A. 2009. *Performance of pilot-scale vertical flow constructed wetlands treating simulated municipal wastewater: Effect of various design parameters*. Desalination, 248: 753–770.
- Stefanakis, A.I. and Tsihrintzis, V.A. 2011. *Dewatering mechanisms in pilot-scale sludge drying reed beds: Effect of design and operational parameters*. Chemical Engineering Journal, 172: 430–443.

- Trapp, S. and Karlson, U. 2001. *Aspects of phytoremediation of organic pollutants*. Journal of Soils and Sediments, 1: 37–43.
- Tsihrintzis, V.A., Akratos, C.S., Gikas, G.D. Karamouzis, D. and Angelakis, A.N. 2007. *Performance and cost comparison of a FWS and a VSF constructed wetland systems*. Environmental Technology, 28: 621-628.
- Tsihrintzis, V.A. and Gikas, G.D. 2010. *Constructed wetlands for wastewater and activated sludge treatment in North Greece: A review*. Water Science and Technology, 61: 2653-2672.
- Waltman, E.L., Venables, B.J. and Waller, M.T. 2006. *Triclosan in an north Texas wastewater treatment plant and the influent and effluent of an experimental constructed wetland*. Environmental Toxicology and Chemistry, 25: 367–372.
- Williams, J.B. 2002. *Phytoremediation in wetland ecosystems: progress, problems and potential*. Critical Reviews in Plant Sciences, 21: 607–635.
- Winefordner, J.D. 2003. *Sample preparation techniques in analytical chemistry*. Ed. Somenath Mitra, John Wiley & Sons, Inc 2003, New York, USA, pp 27-57.
- Yang, L., Li, Z., Zou, L. and Gao, H. 2011. *Removal capacity and pathways of phenolic endocrine disruptors in an estuarine wetland of natural reed bed*. Chemosphere, 83: 233-9.
- Ying, G.G., Kookana, R.S. and Dillon, P., 2003. *Sorption and degradation of selected five endocrine disrupting chemicals in aquifer material*. Water Research, 37: 3785–3791.
- Ying, G.G., Kookana, R.S. 2007. *Triclosan in wastewaters and biosolids from Australian wastewater treatment plants*. Environment International, 33: 199-205.
- Zarate, F.M., Schulwitz, S.E., Stevens, K.J. and Venables, B.J. 2012. *Bioconcentration of triclosan, methyl-triclosan, and triclocarban in the plants and sediments of a constructed wetland*. Chemosphere, In Press.
- Zhang, D.Q., Tan, S.K., Gersberg, R.M., Sadreddini, S., Zhu, J. and Tuan, N.A. 2011. *Removal of pharmaceutical compounds in tropical constructed wetlands*. Ecological Engineering, 37: 460–464.

**ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΕΠΙΚΑΘΗΣΕΩΝ ΣΕ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΜΒΡΑΝΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΧΩΡΗΜΕΝΗ
ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ**

**Βασίλειος Διαμαντής*¹, Αντωνάτος Έκτορας¹, Μανασσής Μήτρακας²,
Παράσχος Μελίδης¹, Αλέξανδρος Αϊβαζίδης¹**

¹Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Ξάνθη

²Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία γίνεται εφαρμογή ενός τεχνητού στρώματος επικαθήσεων σε συστήματα μεμβρανών μικροδιήθησης για την επεξεργασία νερού και υγρών αποβλήτων. Το στρώμα των επικαθήσεων δημιουργήθηκε με χρήση κονιοποιημένου ενεργού άνθρακα, υδροξυ-οξειδίων σιδήρου και ζεολίθου. Η επίδραση της δόσης των παραπάνω υλικών στο ρυθμό διήθησης και στην αντίσταση της μεμβράνης, εξετάστηκε σε πειράματα εργαστηριακής κλίμακας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η χρήση ενεργού άνθρακα προκαλεί βελτίωση της υδραυλικής συμπεριφοράς των μεμβρανών, ενώ τα υδροξυ-οξείδια του σιδήρου και ο ζεόλιθος προκαλούν ελαφρά μείωση. Η εξεταζόμενη τεχνολογία μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για την επεξεργασία πόσιμου νερού όσο και για την τεταρτοβάθμια επεξεργασία αστικών λυμάτων.

**ENGINEERING CAKE LAYER FOR MEMBRANE FILTRATION
OF WATER AND WASTEWATER**

**Vasileios Diamantis*¹, Antonatos Ektoros¹, Manassis Mitrakas², Paraschos
Melidis¹, Alexandros Aivasidis¹**

¹Department of Environmental Engineering, Democritus University of Thrace,
Vas. Sofias 12, Xanthi, GR-67100, Greece

²Department of Chemical Engineering, Aristotle University of Thessaloniki,
Thessaloniki, Greece

ABSTRACT

In this study an artificial cake layer was formed onto microfiltration membranes and the hydraulic performance and resistance was studied. The cake layer consisted of powder either activated carbon or iron oxy-hydroxides or zeolite. The effect of adsorbent dose per membrane surface area was studied in detail under laboratory conditions. The results of this study indicate that powder activated carbon can improve membrane hydraulic performance, followed by iron oxy-hydroxide. Zeolite performance was poor and a significant part (50%) of the cake layer penetrated into the membrane pores. The combined used of low cost adsorbents and membrane technology is of special interest for drinking water and wastewater reuse applications.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα συστήματα μεμβρανών υπερδιήθησης χαρακτηρίζονται από υψηλό βαθμό κατακράτηση αιωρούμενων και κolloειδών συστατικών από το νερό (Laine et al., 2000). Ταυτόχρονα γίνεται διαχωρισμός και του μεγαλύτερου μέρους των παθογόνων μικροοργανισμών σε αντιστοιχία με το μέγεθος των πόρων της μεμβράνης. Ένα σημαντικό βέβαια μειονέκτημα είναι η σταδιακή μείωση του ρυθμού διήθησης εξαιτίας του σχηματισμού στρώματος επικαθήσεων και της έμφραξης των πόρων της μεμβράνης (Lee and Chen, 2004). Ο σχηματισμός του στρώματος αυτού επιδρά στο σχεδιασμό αντίστοιχων μονάδων, καθώς οδηγεί σε αύξηση της απαιτούμενης επιφάνειας μεμβρανών και στην εφαρμογή προχωρημένων τεχνικών ελέγχου της έμφραξης. Αντίθετα, σε ορισμένες περιπτώσεις παρέχει αυξημένη απόδοση όσον αφορά την κατακράτηση ρυπαντών μεγέθους μικρότερου από αυτό των πόρων της μεμβράνης (Snyder et al., 2007).

Στην παρούσα εργασία γίνεται μελέτη ενός τεχνητού στρώματος επικαθήσεων σε συστήματα μεμβρανών μικροδιήθησης. Το στρώμα των επικαθήσεων δημιουργήθηκε με χρήση κονιοποιημένου ενεργού άνθρακα, κονίας υδροξυ-οξειδίων σιδήρου και κονιοποιημένου ζεολίθου. Η επίδραση της δόσης των παραπάνω υλικών στο ρυθμό διήθησης και η αξιολόγηση του βαθμού έμφραξης εξετάστηκαν σε εργαστηριακά συστήματα μεμβρανών μικροδιήθησης.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.1. ΝΕΡΟ ΚΑΙ ΠΡΟΣΡΟΦΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

Για τη μελέτη της υδραυλικής συμπεριφοράς των μεμβρανών και των υπό εξέταση προσροφητικών υλικών χρησιμοποιήθηκε απιονισμένο νερό ή νερό δικτύου. Ως προσροφητικά υλικά/ χρησιμοποιήθηκαν κονιοποιημένος ενεργός άνθρακας (PAC), υδροξυ-οξείδιο σιδήρου (GEH) και ζεόλιθος (ZEO). Ορισμένα χαρακτηριστικά των προσροφητικών υλικών παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

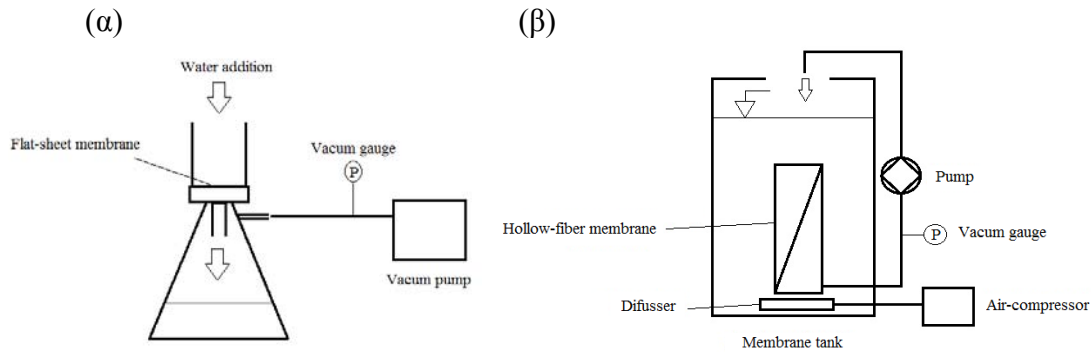
Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά κονιοποιημένων προσροφητικών υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία.

Υλικό	Χαρακτηριστικά
Ενεργός άνθρακας	Δεν δίνονται χαρακτηριστικά
Υδροξυ-οξείδια σιδήρου	Προμηθευτής: Wasserchemie GmbH Ειδική επιφάνεια = 220 m ² /g
Ζεόλιθος	Προέλευση: Θράκη (Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών) Ικανότητα εναλλαγής κατιόντων (CEC) = 130 meq/100 g

2.2. ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΗΘΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΠΡΟΣΡΟΦΗΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Για τη μελέτη της υδραυλικής συμπεριφοράς του τεχνητού στρώματος επικαθήσεων κατά τη διήθηση με μεμβράνες χρησιμοποιήθηκαν δύο πειραματικές διατάξεις (Σχήμα 1 α και β). Στην πρώτη περίπτωση (Σχήμα 1 α) το εκάστοτε προσροφητικό υλικό μετά από αραίωση σε απιονισμένο νερό προστίθεται στη συσκευή κατά μέτωπο διήθησης, η οποία είναι εξοπλισμένη με φύλλο επίπεδης μεμβράνης διαμέτρου 47 mm και μεγέθους πόρων 0,45 μm. Στο σύστημα εφαρμόζεται κενό 0,6 bar

με χρήση αντλίας κενού. Μετά τη δημιουργία του στρώματος επικαθήσεων, λαμβάνουν χώρα διαδοχικές προσθήκες απιονισμένου νερού σε ποσότητες των 50 mL και καταγράφεται ο χρόνος πλήρους διήθησής τους μέχρι την παραλαβή συνθηκών σταθερής κατάστασης. Ακολουθεί νέα δοσομέτρηση προσροφητικού και η διαδικασία επαναλαμβάνεται για ένα εύρος φορτίσεων από 5 έως 25 g/m².



Σχήμα 1. Πειραματική διάταξη για την μελέτη του στρώματος επικαθήσεων διαφόρων προσροφητικών υλικών (α) σε επίπεδες μεμβράνες μικροδιήθησης (κατά μέτωπο διήθηση) και (β) σε μεμβράνες κοίλων ινών μικροδιήθησης.

Στη δεύτερη διάταξη (Σχήμα 1 β) το εκάστοτε προσροφητικό υλικό προστίθεται στο δοχείο της μεμβράνης βρισκόμενο υπό συνεχή αερισμό. Οι μεμβράνες κοίλων ινών έχουν συνολική επιφάνεια 1,5 m² και μέγεθος πόρων 0,1 μm, είναι δε βυθισμένες μέσα στο δοχείο. Η παραλαβή του διηθήματος γίνεται με χρήση διαφραγματικής αντλίας. Το διήθημα επιστρέφει συνεχώς στη δεξαμενή της μεμβράνης μετά από καταγραφή του ρυθμού διήθησης.

2.3. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ

Ο ρυθμός διήθησης [J, L/(m²h)] υπολογίστηκε με βάση την παροχή του διηθήματος (L/h) ως προς την εγκατεστημένη επιφάνεια μεμβράνης (m²). Η συνολική αντίσταση της μεμβράνης (R, 1/m) προκύπτει:

$$R = \text{TMP} / \mu J, \text{ όπου} \quad (2.1)$$

TMP = εφαρμοζόμενη διαμεμβρανική πίεση (Pa)

μ = δυναμικό ιξώδες (Pa.s)

J = ρυθμός διήθησης [m³/(m² s)]

Η συνολική αντίσταση της μεμβράνης περιλαμβάνει το άθροισμα των αντιστάσεων:

$$R = R_m + R_c + R_p, \text{ όπου} \quad (2.2)$$

R_m = η αντίσταση του υλικού της μεμβράνης (1/m)

R_c = η αντίσταση του στρώματος επικαθήσεων (1/m)

R_p = η αντίσταση λόγω έμφραξης των πόρων (1/m)

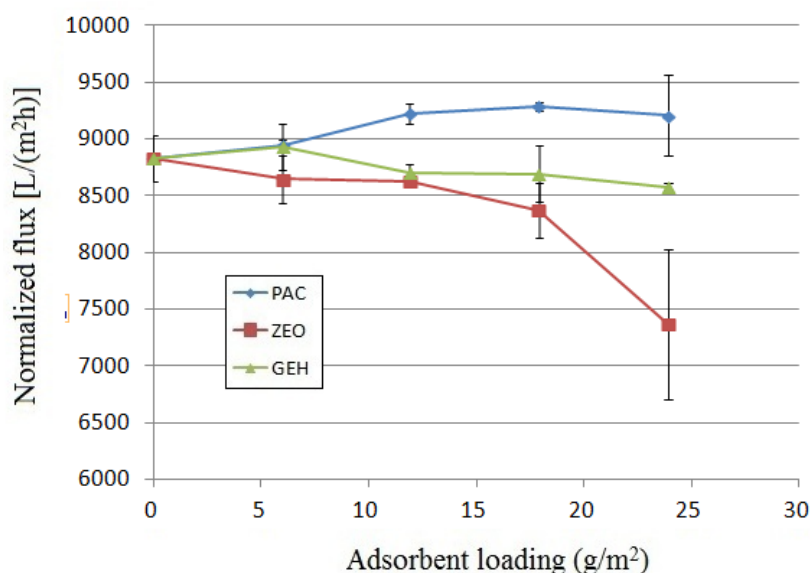
Για τον υπολογισμό της αντίστασης λόγω έμφραξης των πόρων ακολουθείτε η παρακάτω διαδικασία: υπολογίζουμε από την εξίσωση (1) την αντίσταση του υλικού

της μεμβράνης (R_m) με τη διήθηση καθαρού νερού και στη συνέχεια η μεμβράνη τίθεται σε λειτουργία με το εκάστοτε προσροφητικό υλικό. Στο τέλος της λειτουργίας προσδιορίζεται ξανά η αντίσταση (R) με καθαρό νερό, η οποία αντιστοιχεί στο άθροισμα των αντιστάσεων ($R_m + R_c + R_p$). Τέλος απομακρύνουμε το στρώμα των επικαθήσεων και προσδιορίζουμε εκ νέου την αντίσταση με καθαρό νερό, η οποία δίνει το άθροισμα των αντιστάσεων ($R_m + R_p$).

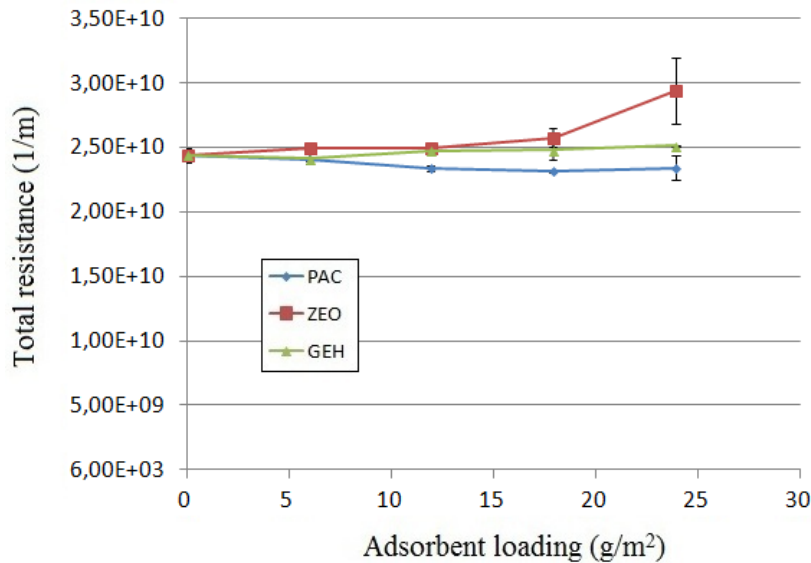
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1. ΕΠΙΠΕΔΕΣ ΜΕΜΒΡΑΝΕΣ

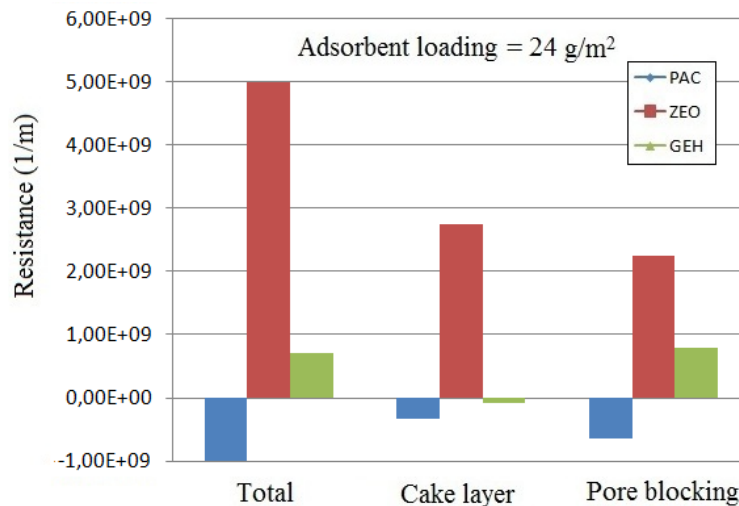
Στο Σχήμα 2 φαίνεται η επίδραση της προσθήκης διαφόρων προσροφητικών υλικών στο ρυθμό διήθησης της κατά μέτωπο διήθησης. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η χρήση ζεολίθου οδηγεί σε σημαντική μείωση του ρυθμού διήθησης όταν η φόρτιση είναι υψηλότερη από 15 g ανά m² μεμβράνης. Η χρήση υδροξυ-οξειδίων σιδήρου δεν προκαλεί στατιστικά σημαντική μείωση του ρυθμού διήθησης, σε αντίθεση με τον ενεργό άνθρακα ο οποίος προκαλεί ελαφρά αύξηση του ρυθμού διήθησης. Στο Σχήμα 3 παρουσιάζεται η μεταβολή της συνολικής αντίστασης της μεμβράνης ως συνάρτηση της φόρτισης του εκάστοτε προσροφητικού υλικού. Η συνολική αντίσταση ισούται το άθροισμα των αντιστάσεων: του υλικού της μεμβράνης, του στρώματος επικαθήσεων και της εσωτερικής έμφραξης των πόρων. Σε κάθε περίπτωση, η χρήση ζεολίθου οδηγεί σε σημαντική αύξηση της συνολικής αντίστασης, ισοδύναμα τόσο εξαιτίας του σχηματισμού στρώματος επικαθήσεων όσο και της εσωτερικής έμφραξης των πόρων (Σχήμα 3 και 4). Κατά τη χρήση υδροξυ-οξειδίων σιδήρου η ελαφρά και στατιστικά μη σημαντική αύξηση της αντίστασης οφείλεται κυρίως στην εσωτερική έμφραξη των πόρων. Τέλος, η χρήση κονιοποιημένου ενεργού άνθρακα δεν προκαλεί προβλήματα έμφραξης, ενώ ταυτόχρονα καταγράφεται και μείωση της αντίστασης της μεμβράνης.



Σχήμα 2. Επίδραση της δόσης του προσροφητικού υλικού στο ρυθμό διήθησης επίπεδων μεμβρανών στην κατά μέτωπο διήθηση.



Σχήμα 3. Επίδραση της δόσης του προσροφητικού υλικού στη συνολική αντίσταση της μεμβράνης στην κατά μέτωπο διήθηση.



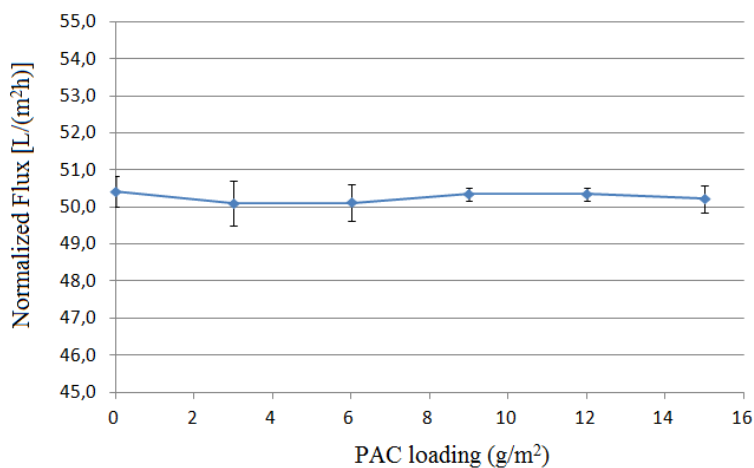
Σχήμα 4. Συμβολή του στρώματος επικαθήσεων και της έμφραξης των πόρων στη συνολική αντίσταση κατά τη χρήση προσροφητικών υλικών στην κατά μέτωπο διήθηση.

3.2. MEMBRANES ΚΟΙΛΩΝ ΙΝΩΝ

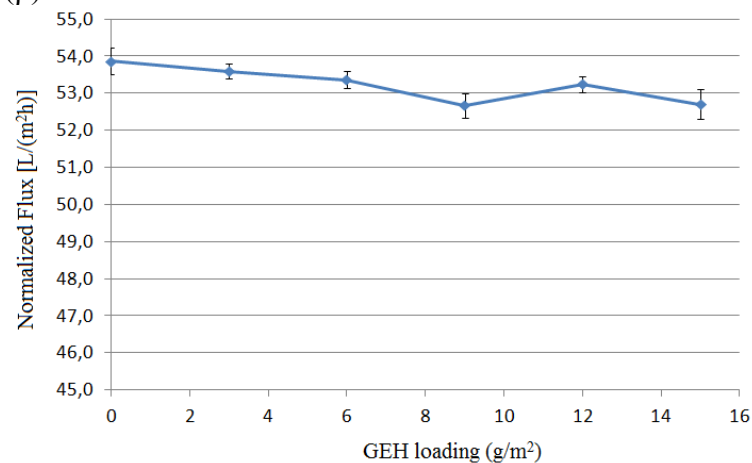
Στο Σχήμα 5 παρουσιάζεται η μεταβολή του ρυθμού διήθησης κατά τη χρήση ενεργού άνθρακα, υδροξυ-οξειδίων σιδήρου και ζεολίθου σε σύστημα μεμβρανών κοιλών ινών υπό την συνεχή επίδραση αερισμού για τον έλεγχο της έμφραξης. Τα αποτελέσματα του Σχήματος 5 επιβεβαιώνουν ότι η χρήση ενεργού άνθρακα δεν προκαλεί μείωση του ρυθμού διήθησης, σε αντίθεση με τη χρήση υδροξυ-οξειδίων σιδήρου και ζεολίθου. Στις τελευταίες δύο περιπτώσεις παρατηρήθηκε ελαφρά αύξηση (~2%) στην αντίσταση της μεμβράνης, η οποία δεν είναι όμως κρίσιμη και σημαντική (Σχήμα 6). Άλλωστε, δεν πρέπει να παραληφθεί ότι ένα μέρος των προστιθέμενων προσροφητικών υλικών βρίσκεται σε αιώρηση μέσα στο δοχείο της μεμβράνης εξαιτίας της υπάρχουσας τύρβης (αερισμός). Στο Σχήμα 7 απεικονίζεται η δημιουργία

στρώματος επικαθήσεων σε μεμβράνες κοίλων ιών με την προσθήκη ενεργού άνθρακα.

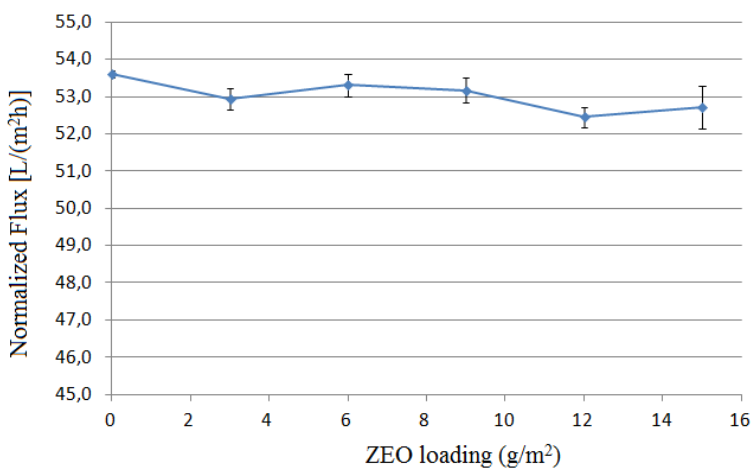
(α)



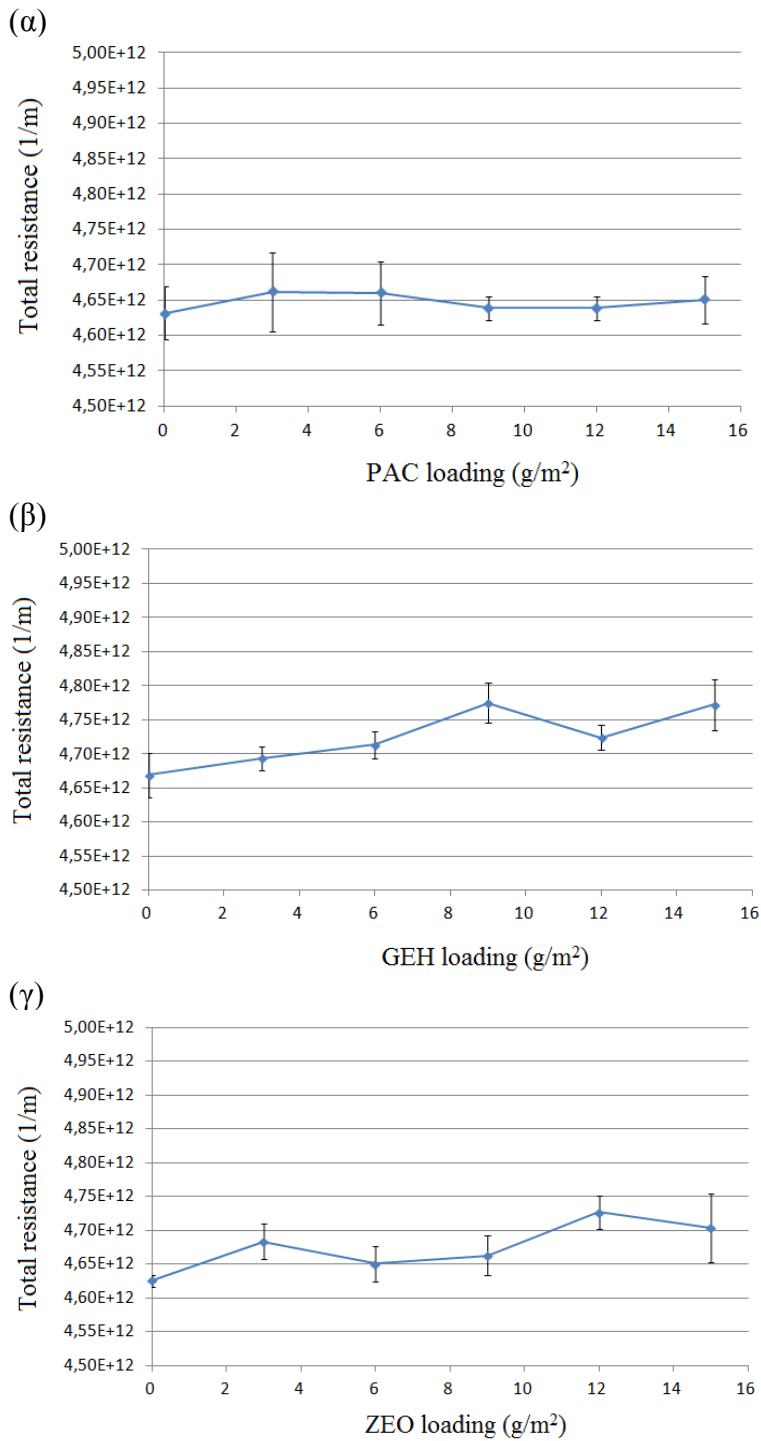
(β)



(γ)



Σχήμα 5. Επίδραση στο ρυθμό διήθησης της προσθήκης (α) ενεργού άνθρακα, (β) υδροξυ-οξειδίων σιδήρου, και (γ) ζεολίθου, σε σύστημα μεμβρανών μικροδιήθησης κοίλων ιών με αερισμό για το έλεγχο της έμφραξης (όγκος δοχείου 25 L, επιφάνεια μεμβράνης 1,5 m²).



Σχήμα 6. Επίδραση στη συνολική αντίσταση της μεμβράνης της προσθήκης (α) ενεργού άνθρακα, (β) υδροξυ-οξειδίων σιδήρου, και (γ) ζεολίθου, σε σύστημα μεμβρανών μικροδιήθησης κοίλων ινών με αερισμό για το έλεγχο της έμφραξης (όγκος δοχείου 25 L, επιφάνεια μεμβράνης 1,5m²).



Σχήμα 7. Φωτογραφική απεικόνιση των μεμβρανών μικροδιήθησης κοίλων ινών κατά τη λειτουργία με αιώρημα ενεργού άνθρακα. Ο χρωματισμός των μεμβρανών οφείλεται στο σχηματισμό του στρώματος επικαθήσεων.

3.3. ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Η έμφραξη σε συστήματα μεμβρανών προκαλείται από τη μείωση του μεγέθους και την έμφραξη των πόρων, το σχηματισμό του στρώματος επικαθήσεων και σε πολλές περιπτώσεις από το σχηματισμό βιο-φιλμ (biofouling). Σωματιδιακά υλικά όπως είναι η ιλύς, η άργιλος και ο ενεργός άνθρακας δεν προκαλούν από μόνα τους έμφραξη (Lee and Chen, 2004). Η εναπόθεση των υλικών αυτών στην επιφάνεια της μεμβράνης δημιουργεί ένα στρώμα επικαθήσεων το οποίο είναι αντιστρεπτό. Ακολούθως, η αντίστροφη πλύση είναι ιδιαίτερα αποδοτική για τον έλεγχο του. Από την άλλη, η συνδυασμένη χρήση ενεργού άνθρακα περιορίζει την εσωτερική έμφραξη των πόρων και την προσρόφιση οργανικών συστατικών στη μεμβράνη με αποτέλεσμα τη διατήρηση υψηλών ρυθμών διήθησης (Tomaszewska and Mozia, 2002).

Σε πρόσφατη εργασία ανασκόπησης (Stoquart et al., 2012), σχετικά με τη χρήση ενεργού άνθρακα σε συστήματα μεμβρανών, αναφέρετε ότι η προσθήκη PAC σε απιονισμένο νερό δεν έχει σημαντική επίδραση στη διαπερατότητα των μεμβρανών. Η προσθήκη μάλιστα αυτή μπορεί να βελτιώσει την υδραυλική συμπεριφορά του συστήματος, κάτι που παρατηρήθηκε στη κατά μέτωπο διήθηση της παρούσας εργασίας. Η βελτίωση αυτή αποδόθηκε σε πιθανή καταστροφή της επιφάνειας της μεμβράνης (integrity loss) που οδηγεί σε διάνοιξη πόρων οι οποίοι αρχικά ήταν ανενεργοί. Σε άλλη περίπτωση τα αίτια αναζητούνται στη μείωση του μεγέθους / μήκους του οριακού στρώματος (boundary layer thickness) και ακολούθως στην αύξηση του συντελεστή μεταφοράς μάζας (Stoquart et al., 2012).

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας έδειξαν ότι η χρήση υδροξυ-οξειδίων του σιδήρου και ζεολίθου σε συστήματα μεμβρανών μικροδιήθησης είναι δυνατή και δεν δημιουργεί προβλήματα έμφραξης σε φορτίσεις της τάξης των 10-15 g/m². Η χρήση ενεργού άνθρακα όχι απλώς δεν προκαλεί έμφραξη αλλά βελτιώνει την υδραυλική συμπεριφορά της μεμβράνης, περιορίζοντας την αρχική αντίστασή της. Αυτό πιθανώς να οφείλεται σε αλληλεπιδράσεις με το υλικό της μεμβράνης το οποίο καθίσταται περισσότερο υδρόφιλο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Laine, J.M., Vial, D. and Moulart, P., 2000. *Status after 10 years of operation – overview of UF technology today*. Desalination, 131: 17-25.
- Lee, C.W. and Chen Y.S., 2004. *Fouling of UF membrane by humic substance: effect of molecular weight and powder-activated carbon (PAC) pre-treatment*. Desalination, 170: 59-67.
- Snyder, S.A., Adham, S., Redding, A.M., Cannon, F.S., deCarolis, J., Oppenheimer, J., Wert, E.C. and Yoon, Y., 2007. *Role of membranes and activated carbon in the removal of endocrine disruptors and pharmaceuticals*. Desalination, 202: 156-181.
- Tomaszewska, M. and Mozia, S., 2002. *Removal of organic matter from water by PAC/UF system*. Water Research, 36: 4137-4143.
- Stoquart, C., Servais, P., Berube, P.R. and Barbeau, B., 2012. *Hybrid membrane processes using activated carbon treatment for drinking water: a review*. J. Membrane Sci., (in press).

ΒΙΩΣΙΜΗ ΧΡΗΣΗ ΡΗΤΙΝΩΝ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗΣ ΝΙΤΡΙΚΩΝ ΑΠΟ ΤΟ ΝΕΡΟ ΥΔΡΕΥΣΗΣ ΣΕ ΜΙΚΡΕΣ ΚΑΙ ΑΠΟΚΕΝΤΡΩΜΕΝΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ

Κωνσταντίνος Μιμίδης¹, Βασίλειος Διαμαντής²

¹Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Ξάνθη

²Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Ξάνθη

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η τεχνολογία της ιοντοανταλλαγής παρέχει υψηλού βαθμού απομάκρυνση νιτρικών από το νερό ύδρευσης. Στην παρούσα εργασία γίνεται ανάλυση ενός αποκεντρωμένου συστήματος απομάκρυνσης νιτρικών (20 ισοδύναμοι κάτοικοι) από το νερό ύδρευσης με χρήση ρητινών ιοντοανταλλαγής. Η απόδοση της ρητίνης εξετάστηκε σε συνθήκες πιλοτικής κλίμακας συνεχούς λειτουργίας με χρόνο επαφής κενής στήλης 5 min. Ακολούθως, γίνεται χαρακτηρισμός των παραγόμενων αποβλήτων (άλμης και νερά πλύσης) όσον αφορά την αλατότητα (ηλεκτρική αγωγιμότητα) και το περιεχόμενό τους σε νιτρικά. Προτάσεις διαχείρισης και επαναχρησιμοποίησης της άλμης συζητούνται στην παρούσα εργασία. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι για μια εφαρμογή 20 ισοδύναμων κατοίκων (4 m³/d), το επενδυτικό κόστος ανέρχεται σε 0.41 €/m³ με συχνότητα αναγέννησης κάθε 40 ημέρες.

SUSTAINABILITY OF ION EXCHANGE PROCESSES FOR DRINKING WATER DENITRIFICATION AT DECENTRALIZED LEVEL

Konstantinos Mimides¹, Vasileios Diamantis²

¹Department of Civil Engineering, Democritus University of Thrace, Vas. Sofias 12, Xanthi, GR-67100, Greece

²Department of Environmental Engineering, Democritus University of Thrace, Vas. Sofias 12, Xanthi, GR-67100, Greece

ABSTRACT

Ion exchange technology is efficient to remove nitrates from drinking water supplies. In the present study a pilot-plant was installed and operated with original groundwater in order to obtain design data for a decentralized application of 20 inhabitant equivalents. The empty bed contact time was maintained throughout the study equal to 5 min and the surface loading rate 2.5 m/h. Accordingly, the waste brine and wash-waters were characterized in terms of quantity and quality (salinity and nitrates concentration). Potential applications for brine reuse are discussed in this paper. The results of this study indicate that for a 20 inhabitant equivalent application, the capital cost is ~ 0.40 €/m³ of water treated and the regeneration frequency is 40 days.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εμφάνιση νιτρικών στο νερό ύδρευσης αποτελεί σημαντικό πρόβλημα για την ποιότητά του. Κύρια πηγή τους είναι η υπερβολική χρήση αζωτούχων λιπασμάτων που ειδικά μετά τη δεκαετία του 60', πήρε εκρηκτικές διαστάσεις. Άλλες πηγές νιτρικών για τα νερά, αποτελούν οι σηπτικοί βόθροι, η κτηνοτροφία, και σε μικρότερο βαθμό η οξείδωση του οργανικού αζώτου στο έδαφος. Σε υψηλές συγκεντρώσεις (> 50 mg/L), αποδεδειγμένα πλέον τα νιτρικά ενοχοποιούνται για την ασθένεια της μεθαιμογλοβιναιμίας στα βρέφη, καθώς σχηματίζουν νιτρώδη (NO_2^-) εντός του στομάχου (Schoeman and Steyn, 2003).

Τα νιτρικά δεν έχουν την ικανότητα να σχηματίσουν αδιάλυτα άλατα που θα μπορούσαν να αποτεθούν ως ίζημα, ούτε μπορούν να προσροφηθούν στο σύστημα «ακόρεστη - κορεσμένη» ζώνη του εδάφους. Οι πλέον εφαρμόσιμες τεχνολογίες απομάκρυνσης νιτρικών από το νερό ύδρευσης είναι η αντίστροφη όσμωση (Cenaal et al., 1995), η βιολογική απονιτροποίηση (Gomez et al., 2000) και η ιοντο-ανταλλαγή (Samatya et al., 2006; Clifford and Liu, 1993).

Στην περίπτωση της ιοντο-ανταλλαγής το νερό διέρχεται από μία κλίνη, πληρωμένη με ανιονικές ρητίνες οι οποίες προσροφούν επιλεκτικά τα νιτρικά ιόντα. Προηγούμενες μελέτες έδειξαν ότι είναι δυνατή υψηλού βαθμού απομάκρυνση νιτρικών από υπόγεια νερά με αρχικές συγκεντρώσεις 100-300 mg/L (Samatya et al., 2006; Matosic et al., 2000). Σημαντικό πρόβλημα στην χρήση ρητινών είναι η συχνότητα αναγέννησης και ακολούθως η διαχείριση της νιτρο-άλμης που παράγεται. Αναγέννηση των ρητινών με χρήση διαλύματος χλωριούχου νατρίου συγκέντρωσης 30-35 g/L έδειξε πλήρη ανάκτηση των προσροφημένων νιτρικών μετά τη διέλευση άλμης 15-20 όγκων κλίνης (Samatya et al., 2006). Υψηλότερες συγκεντρώσεις άλμης (100 g/L) πέτυχαν αντίστοιχη απομάκρυνση των νιτρικών σε μόλις 7-8 όγκους κλίνης (bed volumes, BV) (Matosic et al., 2000). Η νιτροάλμη βέβαια περιέχει υψηλές συγκεντρώσεις νιτρικών της τάξης των 2-10 g/L (Samatya et al., 2006; Matosic et al., 2000) και δεν μπορεί να διατεθεί σε εδάφη ή σε επιφανειακούς αποδέκτες. Απαιτείται ακολούθως, είτε ελαχιστοποίηση των παραγόμενων ποσοτήτων της (van der Hoek and Klarwijk, 1989), είτε επαναχρησιμοποίηση της (McAdam and Judd, 2008) ή εξάτμιση σε λεκάνες (Ahmed et al., 2000; Kabeel and El-Agouz, 2011).

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η εξέταση της απόδοσης ενός φίλτρου ρητινών για την απομάκρυνση νιτρικών από το υπόγειο νερό της περιοχής του Ζυγού, Ν. Ξάνθης. Έμφαση δίνεται στην αξιολόγηση της ποιότητας του παραλαμβανόμενου νερού και το χαρακτηρισμό των παραγόμενων αποβλήτων (νιτρο-άλμη, νερά πλύσης). Με βάση τη λειτουργία του φίλτρου δίνονται οδηγίες αναφορικά με τη βιώσιμη διαχείριση και επαναχρησιμοποίηση της άλμης σε μικρές και αποκεντρωμένες εφαρμογές.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.1. ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΡΗΤΙΝΩΝ ΙΟΝΤΟΝΤΑΛΛΑΓΗΣ

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε δείγμα πόσιμου νερού (100 L) από την περιοχή Ζυγός του Ν. Ξάνθης. Στο υπό μελέτη υδροφόρο στρώμα, παρατηρήθηκε συγκέντρωση νιτρικών ιόντων (NO_3^-) πάνω από το όριο (εποχιακές διακυμάνσεις 55-65 mg/L). Ορισμένες φυσικοχημικές παραμέτρους του υπό εξέταση νερού παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του υπό μελέτη υπογείου νερού

Παράμετρος	Τιμή
pH	7.38
EC	624
Κατιόντα	(mg/L)
Ca ²⁺	86
Mg ²⁺	15
Na ⁺	26
K ⁺	3
Ανιόντα	(mg/L)
HCO ₃ ⁻	235
Cl ⁻	23
SO ₄ ²⁻	67
NO ₃ ⁻	55

Για τη μελέτη της διεργασίας ιοντοανταλλαγής (selective ion exchange) χρησιμοποιήθηκε η ρητίνη Imac HP555 της εταιρίας Rhom Haas. Πρόκειται για ισχυρά αλκαλική ανιονική ρητίνη, μακροπορώδους δομής, αποτελούμενη από συμ-πολυμερές στυρενίου διβινύλοβενζολίου (styrene divinylbenzene copolymer) με ενεργές ομάδες (functional groups) τετραεδρικών αμμωνιακών (quaternary ammonium groups) (de Oliveira et al., 2005). Ορισμένα φυσικο-χημικά χαρακτηριστικά της ρητίνης παρουσιάζονται στον Πίνακα 2. Η ρητίνη χρησιμοποιήθηκε για την επιλεκτική απομάκρυνση νιτρικών από το νερό ύδρευσης.

Πίνακας 2. Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά της ανιονικής ρητίνης Imac HP555 για την επιλεκτική απομάκρυνση νιτρικών από το νερό ύδρευσης.

Παράμετρος	Τιμή
Ολική ικανότητα εναλλαγής (eq/L)	>0.9
Υγρασία (%)	50-56
Πυκνότητα κατά την παραλαβή (g/L)	720
Ειδικό βάρος κόκκων (-)	1.055-1.085
Μέγεθος κόκκων (αρμονικό μέσο) (μm)	650-850
Συντελεστής ομοιομορφίας (-)	< 1.5
Περιεχόμενο σε λεπτόκοκκα (%)	< 0.3 mm: 0.3% μέγιστο
Περιεχόμενο σε χονδρόκοκκο (%)	>1.18 mm: 5.0% μέγιστο

2.2. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΚΛΙΝΗΣ ΙΟΝΤΟΝΤΑΛΛΑΓΗΣ

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας έγινε εγκατάσταση και λειτουργία ενός φίλτρου εργαστηριακής κλίμακας για την απομάκρυνση νιτρικών από το νερό ύδρευσης και τη μελέτη της διεργασίας της ιοντο-ανταλλαγής. Το φίλτρο ήταν λειτουργικού όγκου 0.25 L, εσωτερικής διαμέτρου 4 cm και ύψους κλίνης 20 cm. Η τροφοδοσία του φίλτρου έγινε σε παροχή 50 ml/min η οποία αντιστοιχεί σε ρυθμό διήθησης 2.4 m/h (12 BV/h) και χρόνο επαφής κενής στήλης 5 min. Το νερό εισάγεται στην κορυφή του φίλτρου με χρήση περισταλτικής αντλίας. Το επεξεργασμένο νερό λαμβάνεται από τον πυθμένα και ακολουθεί χαρακτηρισμός όσων αφορά τις συγκεντρώσεις νιτρικών, θεικών, χλωριούχων, όξινων ανθρακικών, pH και ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Όλες οι χημικές αναλύσεις έγιναν σύμφωνα με πρότυπες μεθόδους.

Η διεργασία της αναγέννησης έγινε σύμφωνα με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή δηλαδή με διάλυμα χλωριούχου νατρίου 150 g/L. Η τροφοδοσία της άλμης γινόταν σε παροχή 50 ml/min. Μετά τη φάση της αναγέννησης γινόταν ξέπλυμα της κλίνης με καθαρό νερό και ακολουθούσε ο επόμενος κύκλος λειτουργίας.

Οι προτεινόμενες συνθήκες λειτουργίας της υπό μελέτη ρητίνης, σύμφωνα με τον κατασκευαστή παρουσιάζονται στον Πίνακα 3 και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διαστασιολόγηση ενός φίλτρου ρητινών.

Πίνακας 3. Προτεινόμενες συνθήκες λειτουργίας φίλτρου πίεσεως για την απομάκρυνση νιτρικών από το νερό ύδρευση με ρητινών ιοντο-ανταλλαγής.

Μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας	80 °C
Ελάχιστο βάθος κλίνης επεξεργασίας	700 mm
Παροχή λειτουργίας	5 έως 40 BV/h
Μέγιστη ταχύτητα ροής	50 m/h
Υλικό αναγέννησης	NaCl
Συγκέντρωση υλικού αναγέννησης	125 με 250 g/L
Παροχή αναγέννησης	2 έως 8 BV/h
Ελάχιστος χρόνος αναγέννησης	30 λεπτά

BV=όγκος κλίνης (bed volume)

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

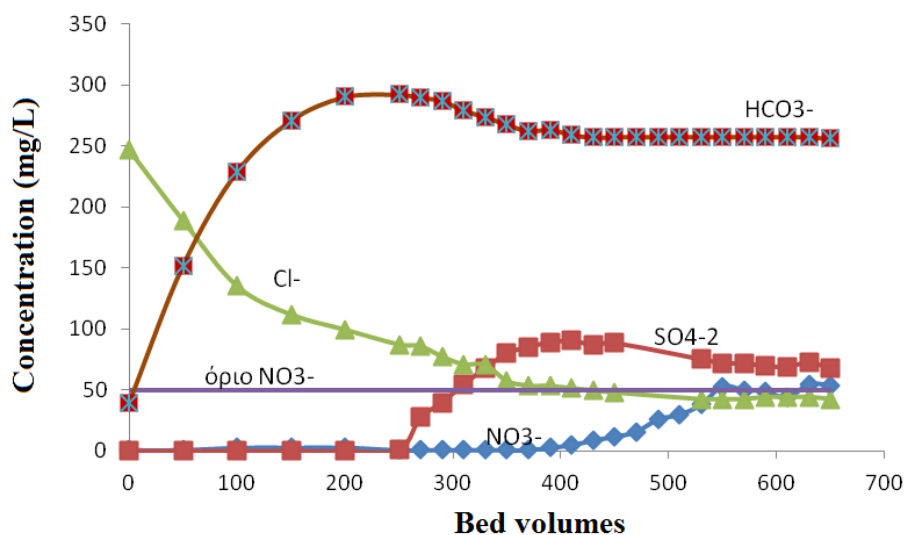
3.1. ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΝΙΤΡΙΚΩΝ

Στο Σχήμα 2 φαίνεται η συγκέντρωση των νιτρικών, των χλωριόντων, των θεικών και των όξινων ανθρακικών, στην έξοδο της κλίνης ως συνάρτηση των διερχόμενων όγκων κλίνης. Η συγκέντρωση των νιτρικών στο νερό τροφοδοσίας ήταν 55 (± 2) mg/L. Τα αποτελέσματα του Σχήματος 2 δείχνουν πλήρη απομάκρυνση των νιτρικών έως τα 400 bv και στη συνέχεια γραμμική αύξηση και διαρροή στα 540 bv. Αντίστοιχα αποτελέσματα αναφέρουν και οι Samatay et al. (2006) και Matosic et al. (2000) οι οποίοι επεξεργάστηκαν νερά με υψηλές συγκεντρώσεις νιτρικών (100-300 mg/L) και πέτυχαν πλήρη απομάκρυνσή τους σε 350-450 bv.

Ταυτόχρονα, με την απομάκρυνση νιτρικών, παρατηρήθηκε αύξηση των ιόντων χλωρίου στα αρχικά BV, με ταυτόχρονη πτώση της αλκαλικότητας. Γίνεται αντιληπτό ότι η συγκέντρωση των χλωριδίων σταθεροποιείται, με ταυτόχρονη αύξηση της συγκέντρωσης των νιτρικών και των θεικών ιόντων. Η τιμή στην οποία σταθεροποιούνται, προσεγγίζει την τιμή που παρουσιάστηκε σε ανάλυση ανεπεξέργαστου (προ ρητίνης) νερού. Δεν παρατηρήθηκε αύξηση των ιόντων χλωρίου πάνω από το όριο ποσιμότητας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο τύπος ρητίνης που είναι επιλεκτική στα νιτρικά, προσθέτει λιγότερα ιόντα χλωρίου στο πόσιμο νερό, εξαιτίας της χαμηλής απομάκρυνσης θεικών.

Με βάση τα δεδομένα του Σχήματος 2, ο λόγος των χλωριόντων προς την αλκαλικότητα παρουσιάζεται υψηλότερος από 0.5 κατά τα πρώτα 100 bv. Ακολούθως, το νερό χαρακτηρίζεται ως διαβρωτικό για τους χάλκινους/ ορειχάλκινους σωλήνες (διάλυση ψευδαργύρου) με αποτέλεσμα να είναι απαραίτητη η ανάμιξη επεξεργασμένου με ακατέργαστο νερό, ώστε ο λόγος να πέσει κάτω από 0.5. Στην περίπτωση που υπάρχουν εγκατεστημένοι διαφορετικού τύπου σωλήνες π.χ. πολυαιθυλενίου, δεν υπάρχει κανένα πρόβλημα. Ταυτόχρονα, με τη μίξη όμως παρατείνεται ο χρόνος ζωής της ρητίνης και η απαιτούμενη συχνότητα αναγέννησης.

Λαμβάνοντας υπόψη τις επιτρεπόμενες συγκεντρώσεις νιτρικών στο νερό ύδρευσης (< 50 mg/L για τη δυσμενή ομάδα πληθυσμού – βρέφη) συμπεραίνουμε ότι απαιτείται αναγέννηση της ρητίνης μετά την παραλαβή 400-450 βν. Υποθέτοντας ένα φίλτρο όγκου 200 L υπάρχει δυνατότητα καθαρισμού 80-90 m³ νερού. Αναμιγνύοντας επεξεργασμένο με ανεπεξέργαστο νερό, η παρεχόμενη ποσότητα αυξάνεται σε 160-180 m³. Η ποσότητα αυτή επαρκεί για την κάλυψη των αναγκών ύδρευσης 20 ισοδύναμων κατοίκων για 40 ημέρες (λαμβάνοντας υπόψη κατανάλωση νερού 200 L/κατ d).



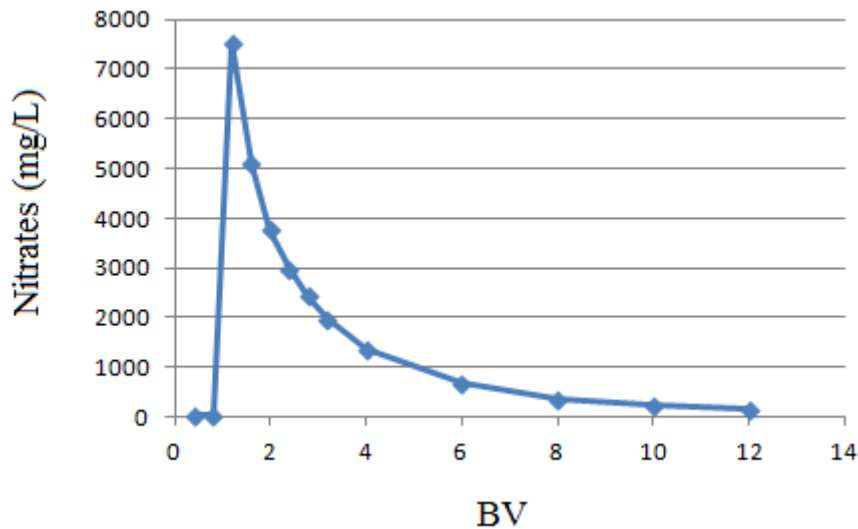
Σχήμα 2. Καμπύλη διαρροής νιτρικών ως συνάρτηση των διερχόμενων όγκων κλίνης.

Με βάση τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας, φαίνεται ότι λαμβάνει χώρα αύξηση της συγκέντρωσης των θεικών ιόντων από 67 mg/L στην τροφοδοσία, σε 100 mg/L στην εκροή, κατά τη διέλευση 350-450 BV. Ενώ λοιπόν κατά τα πρώτα 250 BV η απομάκρυνση θεικών είναι πλήρης, στη συνέχεια τα τελευταία εκτοπίζονται για την προσρόφηση νιτρικών, καθώς η ρητίνη είναι επιλεκτική στα $\text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^-$. Η χρήση επιλεκτικής στα νιτρικά ρητίνης περιορίζει επομένως την προσρόφηση θεικών, δεν την εξαλείφει όμως. Βάση τη θεωρία της ιοντοανταλλαγής η σειρά επιλεξιμότητας των ιόντων σε ανιονικές ρητίνες είναι: $\text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{HCO}_3^-$ (Hararld, 1994). Η υψηλή επιλεκτικότητα των θεικών ιόντων οφείλεται στον προσανατολισμό του ιόντος SO_4^{2-} , στην κατάληψη δύο διαθέσιμων θέσεων ιοντο-ανταλλαγής, σε συνδυασμό με την απόσταση αυτών των θέσεων στη δομή της ρητίνης (Clifford and Weber, 1983; Jackson and Bolto, 1990).

3.2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

3.2.1. Χαρακτηριστικά νιτρο-άλμης

Στο Σχήμα 3 φαίνεται η περιεκτικότητα της άλμης σε νιτρικά ως συνάρτηση των διερχόμενων όγκων κλίνης κατά την αναγέννηση. Πρόκειται για απόβλητο με υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα (170 mS/cm) και συγκέντρωση νιτρικών όπως άλλωστε αναμενόταν. Σύμφωνα με τα δεδομένα του Σχήματος 3 λαμβάνει χώρα σημαντική απομάκρυνση νιτρικών από τη ρητίνη κατά τη διέλευση 2-3 BV άλμης. Στην περίπτωση αυτή οι συγκεντρώσεις των νιτρικών προσεγγίζουν τα 3-7.5 g/L και κατά μέσο όρο τα 5.5 g/L. Στη συνέχεια, από τα 3 έως τα 12 BV η συγκέντρωση των νιτρικών παρουσιάζει μείωση σε τελικές συγκεντρώσεις < 100 mg/L. Για πλήρη



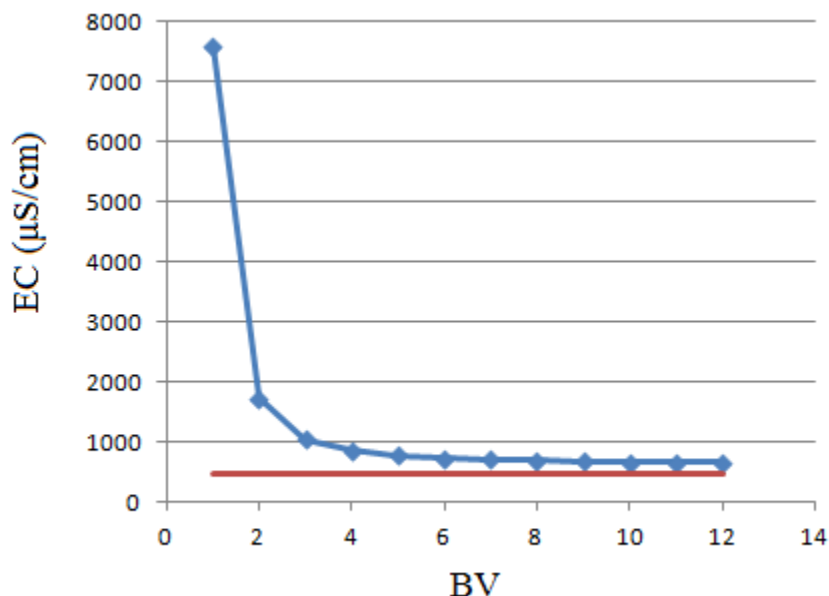
Σχήμα 3. Περιεκτικότητα απορριπτόμενης άλμης σε νιτρικά ως συνάρτηση των διερχόμενων όγκων κλίνης.

απομάκρυνση των προσροφημένων νιτρικών από τη ρητίνη απαιτείται η διέλευση τουλάχιστον 10-12 BV άλμης. Σε κάθε περίπτωση μπορεί να γίνει αποθήκευση και επαναχρησιμοποίηση της άλμης από τα 6 έως τα 12 BV για την επόμενη διεργασία αναγέννησης.

Προηγούμενες μελέτες έδειξαν ότι σημαντική επίδραση στην απόδοση της απομάκρυνσης νιτρικών κατά την αναγέννηση, έχει η συγκέντρωση της άλμης και ο χρόνος επαφής. Όσο πιο πυκνή είναι η άλμη (υψηλή συγκέντρωση αλατιού), τόσο πιο λίγα βν απαιτούνται για να επιτευχθεί η επιθυμητή απομάκρυνση των προσροφημένων νιτρικών. Αντίθετα αραιότερη άλμη, απαιτεί περισσότερα βν να διέλθουν δια μέσω της κλίνης, έως ότου επιτευχθεί η επιθυμητή απομάκρυνση (van der Hoek et al., 1988). Για την ίδια συγκέντρωση άλμης αυτό που διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο είναι ο χρόνος επαφής του διαλύματος με την κορεσμένη ρητίνη. Υψηλότερος χρόνος επαφής (μέχρι ενός ορισμένου σημείου), απαιτεί λιγότερα BV άλμης. Καθίσταται σαφές, ότι το βέλτιστο οικονομικό αποτέλεσμα σε μια πραγματική μονάδα προκύπτει κατόπιν πιλοτικών δοκιμών με το υπό εξέταση νερό. Τα θετικά τα οποία είχαν προσροφηθεί από τη ρητίνη, απομακρύνονται στα πρώτα BV του διαλύματος αναγέννησης, πριν καν αρχίσει η απομάκρυνση των νιτρικών (αποτελέσματα δεν παρουσιάζονται). Στο μέγιστο δε, της καμπύλης των νιτρικών δεν υπάρχουν θεικά στην άλμη. Συνεπώς από τα 3 έως τα 6 BV κατά κύριο λόγο η άλμη περιέχει NO_3^- .

3.2.2. Χαρακτηριστικά νερών πλύσης

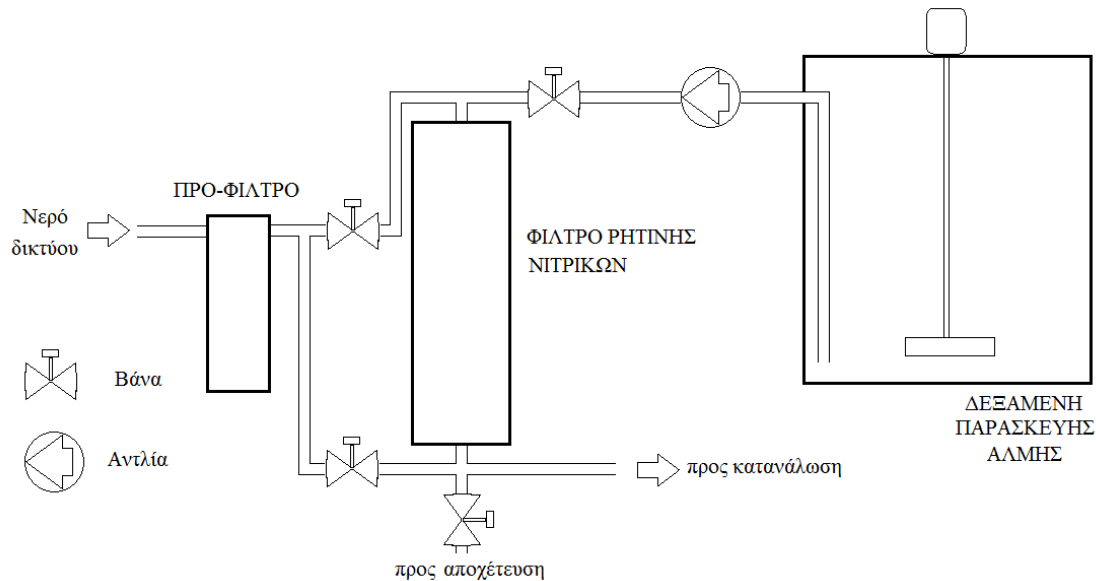
Μετά τη διεργασία της αναγέννησης γίνεται ξέπλυμα της ρητίνης με καθαρό νερό για να απομακρυνθεί η άλμη μέσα από τη κλίνη και να δοθεί το φίλτρο ξανά σε λειτουργία. Στο Σχήμα 4 φαίνεται η ηλεκτρική αγωγιμότητα των νερών πλύσης ως συνάρτηση των διερχόμενων όγκων κλίνης. Όπως φαίνεται απαιτείται κατελάχιστο η διέλευση 5 όγκων κλίνης για την απομάκρυνση της περίσσειας άλμης από την κλίνη. Περαιτέρω διέλευση νερού έκπλυσης δεν επιδρά σημαντικά στην ηλεκτρική αγωγιμότητά του, η οποία σταθεροποιείται στα 700 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Για την επανέναρξη του κύκλου λειτουργίας ενός φίλτρου ρητινών 200 L πρέπει ακολούθως να απορριφθούν τουλάχιστον 1 m^3 νερού.



Σχήμα 4. Μεταβολή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας κατά την έκπλυση της κλίνης ρητινών μετά τη διεργασία αναγέννησης.

3.3. ΕΠΕΝΔΥΤΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ

Για μια αποκεντρωμένη εφαρμογή 20 ισοδύναμων κατοίκων απαιτείται ένα φίλτρο συνολικού όγκου 0.35 m^3 (ύψος 1.2 m και διάμετρος 0.6 m), όγκου κλίνης 0.20 m^3 . Το κόστος του φίλτρου ανέρχεται σε 2000 € (τιμές αγοράς, προσωπική επικοινωνία). Η τροφοδοσία γίνεται με νερό δικτύου αφού προηγηθεί φυσσίγιο μικροδιήθησης/ συμπαγούς ενεργού άνθρακα. Το κόστος προμήθειας της ρητίνης είναι $(200 \text{ L}) \cdot (750 \text{ g/L}) = (150 \text{ kg}) \cdot (7.3 \text{ €/kg}) = 1100 \text{ €}$ (τιμές αγοράς, προσωπική επικοινωνία). Για την αναγέννηση απαιτείται δεξαμενή παρασκευής άλμης όγκου 2 m^3 , εξοπλισμένη με αναδευτήρα, φυγοκεντρική αντλία από ανοξείδωτο ατσάλι και δεξαμενή αποθήκευσης της νιτροάλμης χωρητικότητας 3 m^3 . Το κόστος του συστήματος αναγέννησης και αποθήκευσης της άλμης, μαζί με τις σωληνώσεις και την εγκατάσταση ανέρχεται σε 2000 €. Η προτεινόμενη διάταξη φαίνεται στο Σχήμα 5. Το συνολικό επενδυτικό κόστος της εγκατάστασης (συμπεριλαμβανομένων 20% απρόβλεπτων εξόδων) είναι της τάξης των 6000 €. Το ετήσιο επενδυτικό κόστος για ορίζοντα 15 ετίας (6% επιτόκιο) είναι ίσο με 600 €/έτος ή $600/20 = 30 \text{ €/κάτοικο}$. Η κατανάλωση νερού για τη συγκεκριμένη εφαρμογή ανέρχεται σε $(20 \text{ κατ.}) \cdot (0.20 \text{ m}^3/\text{κατ d}) = 4 \text{ m}^3$ ημερησίως ή $1460 \text{ m}^3/\text{έτος}$. Συνεπώς, το επενδυτικό κόστος ανά μονάδα όγκου νερού που επεξεργάζεται είναι $\sim 0.40 \text{ €/m}^3$.



Σχήμα 5. Ενδεικτική διάταξη συστήματος απομάκρυνσης νιτρικών από το νερό ύδρευσης για μια αποκεντρωμένη εφαρμογή εντός οικισμού.

Η ικανότητα (capacity) της ρητίνης μέχρι την πρώτη αναγέννηση είναι σύμφωνα με τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας: $400 \text{ BV} * 0.20 \text{ m}^3 * 2$ (λόγω ανάμιξης 1:1 με ανεπεξέργαστο νερό) = 160 m^3 . Συνεπώς, απαιτείται αναγέννηση κάθε 40 ημέρες. Κατά την αναγέννηση το πρώτο 1 m^3 της απορριπτόμενης άλμης αποθηκεύεται στη δεξαμενή νιτρο-άλμης, ενώ το υπόλοιπο 1 m^3 ανακυκλοφορεί και παραμένει στη δεξαμενή για την επόμενη αναγέννηση. Στην επόμενη αναγέννηση γίνεται συμπλήρωση 1 m^3 νερού και της απαιτούμενης ποσότητας αλατιού (~ 150 kg). Κατά το ξέπλυμα της κλίνης λαμβάνει χώρα απόρριψη 1 m^3 νερού στην αποχέτευση. Η νιτροάλμη αποθηκεύεται σε κατάλληλη δεξαμενή και διατίθεται για επαναχρησιμοποίηση (βλέπε εδάφιο 3.4). Σε αποκεντρωμένες εφαρμογές, η αναγέννηση της ρητίνης μπορεί να γίνει είτε από τον ιδιοκτήτη (χειροκίνητα ή ημι-αυτόματα) ή από εξειδικευμένο συνεργείο.

3.4. ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΕΠΑΝΑΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΝΙΤΡΟ-ΑΛΜΗΣ

Η διακοπή της αναγέννησης και παραλαβή της νιτρο-άλμης των πρώτων 4-5 BV οδηγεί στην παραλαβή ενός συμπυκνώματος νιτρικών περιεκτικότητας ~ 5 g/L. Το υλικό αυτό μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές ελέγχου δυσοσμίας αποχετευτικών δικτύων. Ο σχηματισμός υδροθείου σε αποχετευτικά δίκτυα οφείλεται στη δημιουργία αναερόβιων συνθηκών στους κλάδους του δικτύου που δεν λαμβάνει χώρα εισροή ατμοσφαιρικού αέρα (Zhang et al., 2008). Στις περιπτώσεις αυτές, για τον έλεγχο του σχηματισμού υδροθείου, γίνεται δοσομέτρηση διαλύματος νιτρικών αλάτων (νιτρική αμμωνία, νιτρικό ασβέστιο) με σκοπό τη διατήρηση υπολειπόμενων συγκεντρώσεων νιτρικών (1-2 mg/L) για την παρεμπόδιση της αναγωγής των θεικών. Αντιστοίχως, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η νιτρο-άλμη από τις ρητίνες απονιτροποίησης. Για τη δοσομέτρηση 10 g νιτρικών ανα m^3 λυμάτων στο φρεάτιο ενός αποχετευτικού δικτύου απαιτείται η προσθήκη περίπου 2 L νιτρο-άλμης. Κατ' αντιστοιχία η αύξηση της αλατότητας των λυμάτων είναι χαμηλή (της τάξης των 0.3 g/L ή 400 $\mu\text{S/cm}$).

3.4.1. Διάθεση σε δεξαμενή εξάτμισης

Η μέθοδος προσφέρεται για ξηροθερμικές περιόδους καθώς υπάρχει μεγαλύτερη απόδοση λόγω της ταχύτερης εξάτμισης. Βασική απαίτηση είναι η στεγανότητα της δεξαμενής για τον αποκλεισμό διαφυγής άλμης στα υποκείμενα υδροφόρα στρώματα (Ahmed et al., 2000). Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν συστήματα ηλιακών εξεταμιστών όπως παρουσιάζονται στην εργασία των Kabeel and El-Agouz (2011).

3.4.2. Βιολογική απομάκρυνση νιτρικών και επαναχρησιμοποίηση

Πρόκειται για βιολογική μέθοδο όπου τα νιτρικά από την άλμη απομακρύνονται με τη βοήθεια βακτηρίων ανθεκτικών στην αλατότητα (McAdam et. al., 2008; Bae et al., 2002; Van der Hoek and Klarwijk, 1988). Η απομάκρυνση περιλαμβάνει την αναγωγή τους σε νιτρώδη (με εφαρμογή εξωτερικής πηγής άνθρακα) με τελικό προϊόν το μοριακό άζωτο το οποίο ελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα. Κατά αυτό τον τρόπο είναι εφικτή η επαναχρησιμοποίηση της άλμης απαλλαγμένης πλέον από νιτρικά. Η διαδικασία περιλαμβάνει: αποθήκευση του συνόλου της άλμης η οποία περιέχει θειικά και νιτρικά → διήθηση για βιολογική απομάκρυνση → διήθηση από φίλτρο άμμου → έλεγχος του pH → αποθήκευση για επαναχρησιμοποίηση. Αν και η εγκατάσταση είναι αποδοτική, έχει αυξημένο επενδυτικό κόστος και απαιτεί κατάλληλους αυτοματισμούς και παρακολούθηση.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η τεχνολογία της ιοντο-ανταλλαγής παρέχει υψηλού βαθμού απομάκρυνση νιτρικών από το νερό ύδρευσης. Συνδέεται βέβαια άμεσα με τη παραγωγή αποβλήτων υψηλής αλατότητας (150-200 mS/cm) και περιεκτικότητας σε νιτρικά (5-10 g/L) κάτι το οποίο δημιουργεί σημαντικά προβλήματα κατά τη εφαρμογή σε κεντρικές μονάδες μεγάλης δυναμικότητας. Ως εκ τούτου, η χρήση των ρητινών παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για μικρά αποκεντρωμένα συστήματα (κατοικίες, ξενοδοχεία) εντός πόλεων και οικισμών, τα οποία είναι συνδεδεμένα σε αποχετευτικό δίκτυο. Στην περίπτωση αυτή, ελεγχόμενη διάθεση της άλμης στο αποχετευτικό δίκτυο μπορεί να συμβάλλει σε έλεγχο της δυσοσμίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Ahmed, M., Shayya, W.H., Hoey, D., Mahendran, A., Morris, R. and Al-Handaly J., 2000. *Use of evaporation ponds for brine disposal in desalination plants*. Desalination, 130: 155-168.
- De Oliveira, A.J.B., de Aguiar, A.P., de Aguiar, M.R.M.P. and de Santa Maria, L.C., 2005. *How to maintain the morphology of styrene-divinylbenzene copolymer beads during the sulfonation reaction*. Materials Letters, 59: 1089– 1094.
- Bae, B.U., Jung, Y.H., Han, W.W. and Shin, H.S., 2002. *Improved brine recycling during nitrate removal using ion exchange*. Water Research, 36: 3330–3340.
- Cevaal, J.N., Surrat, W.B. and Burke, J.E., 1995. *Nitrate removal and water quality improvements with reverse osmosis for Brighton, Colorado*. Desalination, 103: 101-111.
- Clifford, D. and Liu, X., 1993. *Ion exchange for nitrate removal*. Journal AWWA, 85(4): 135-143.

- Clifford, D. and Weber, W.J., 1983. *The determinants of divalent/ monovalent selectivity in anion exchangers*. Reactive Polymers, 1: 77-89.
- Gomez, M.A., Lopez, J.G. and Garcia, E.H., 2000. *Influence of carbon source on nitrate removal of contaminated groundwater in a denitrifying submerged filter*. J. Hazard. Materials, B80: 69-80.
- Hararld, C.E., 1994. *Ion Exchange Theory and Practice*. 2nd Edition, Royal Society of Chemistry.
- Jackson, M.B. and Bolto, B.A., 1990. *Effect of ion-exchange resin structure on nitrate selectivity*. Reactive Polymers, 12: 277-290.
- Kabeel, A.E. and El-Agouz, S.A., 2011. *Review on researches and developments on solar stills*. Desalination, 276: 1-12.
- Matosic, M., Mijatovic, I. and Hodzic, E., 2000. *Nitrate removal from drinking water using ion exchange – comparison of chloride and bicarbonate form of the resins*. Chemical Biochem. Eng., 14: 141-146.
- McAdam, E.J. and Judd, S.D., 2008. *Biological treatment of ion-exchange brine regenerant for re-use: a review*. Separation Purification Technol., 62: 264-272.
- Samatya, S., Kabay, N., Yuksel, U., Arda, M. and Yuksel, M., 2006. *Removal of nitrate from aqueous solution by nitrate selective ion exchange resins*. Reactive Functional Polymers, 66: 1206-1214.
- Schoeman, J.J. and Steyn, A., 2003. *Nitrate removal with reverse osmosis in a rural area in South Africa*. Desalination, 155: 15-26.
- Van der Hoek, J.P. and Klapwijk, A., 1989. *Reduction of regeneration salt requirement and waste disposal in an ion exchange process for nitrate removal from groundwater*. Waste Management, 9: 203-210.
- Van der Hoek, J.P., van der Hoek, W.F. and Klapwijk, A., 1988. *Nitrate removal from groundwater – use of a nitrate selective resin and a low concentrated regenerant*. Water Air Soil Pollut., 37: 41-53.
- Zhang, L., de Schryver, P., de Gussemé, B., de Muynck, W., Boon, N. and Verstraete, W., 2008. *Chemical and biological technologies for hydrogen sulfide emission control in sewer systems: a review*. Water Research, 42: 1-12.

ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΑΡΣΕΝΙΚΟΥ ΚΑΙ ΑΝΤΙΜΟΝΙΟΥ ΑΠΟ ΝΕΡΟ ΠΟΥ ΠΡΟΟΡΙΖΕΤΑΙ ΓΙΑ ΠΟΣΗ

Ελένη Σαζακλή¹, Σταυρούλα Ζούβελου², Ιωάννης Καλαβρουζιώτης²,
Μιχάλης Λεοτσινίδης^{1*}

¹ Εργαστήριο Υγιεινής, Ιατρικό Τμήμα, Πανεπιστήμιο Πατρών,
Η.τ.: mleon@med.upatras.gr

² Τμήμα Διαχείρισης Περιβάλλοντος και Φυσικών Πόρων, Πανεπιστήμιο
Ιωαννίνων.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Rapid Small-Scale Column Test (RSSCT) με υλικό πλήρωσης GFH, εφαρμόστηκε για τη μελέτη αφαίρεσης από το προς πόση νερό, Sb μόνο ή σε συνδυασμό με As. Τέσσερις μικρής κλίμακας στήλες διαστασιολογήθηκαν με βάση προκαθορισμένη στήλη-πilotο με τη παραδοχή της σταθερής διάχυσης. Κάθε στήλη πληρωμένη με GFH τροφοδοτείτο, με σταθερό ρυθμό με απιονισμένο νερό ενοφθαλμισμένο με α) αρσενικό 100 ppb, β) αντιμόνιο 100 ppb, γ) μείγμα As και Sb 100 ppb το καθένα και δ) ένα μείγμα όπως το γ, μετά από αερισμό. Η διαδικασία επαναλήφθηκε με μερικό εξεργασμένο νερό αγωγιμότητας 200μS και με νερό δικτύου. Η κινητική της προσρόφησης περιγράφεται ικανοποιητικά από σιγμοειδείς καμπύλες (μοντέλο Richard, R = 0,995 - 0,999). Η μέθοδος είναι εύκολα εφαρμόσιμη με χαμηλό κόστος κεφαλαίου και λειτουργίας ενώ δε δημιουργεί επικίνδυνα απόβλητα. Η προσροφητική ικανότητα όμως του GFH επηρεάζεται έντονα από την ύπαρξη πυριτικών, χλωριούχων, φωσφορικών κ.λπ. Απαιτούνται πιλοτικές διατάξεις πριν την εφαρμογή σε πραγματική κλίμακα.

As and Sb REMOVAL FOR DRINKING WATER Eleni Sazakli¹, Stavroula Zouvelou², Ioannis Kalavrouziotis², Michalis Leotsinidis^{1*}

¹ Lab of Public Health, Medical School, University of Patras,
E-mail: mleon@med.upatras.gr

² Department of Environmental and Natural Resources Management, University
of Ioannina.

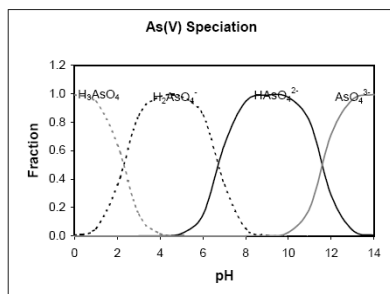
ABSTRACT

Rapid Small-Scale Column Test (RSSCT) in iron oxide packed bed columns was applied to investigate the effectiveness of antimony removal from drinking water, in conjunction or not with arsenic. Four Small-Scale Columns were scaled under the assumption of constant diffusivity. Each column filled with GFH was feeding with deionized water spiked with a) 100 ppb arsenic, b) 100 ppb antimony, c) mixture of As and Sb, 100 ppb each and d) mixture of As and Sb, 100 ppb each, under aeration. The procedure was repeated using partially treated water and tap water. Adsorption kinetics are described quite well by sigmoid curves (Richard model, R = 0.995 – 0.999). The method is applicable with low capital and operational cost and free from by-products formation. The adsorption efficiency in all tests was found to be strongly influenced by the water quality characteristics so pilot experiments are necessary before application in full-scale.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα μεταλλοειδή Αρσενικό (As) και Αντιμόνιο (Sb) μπορούν να εισέλθουν στα φυσικά νερά είτε ως αποτέλεσμα φυσικών διεργασιών, όπως η αποσάθρωση των εδαφών και των πετρωμάτων, είτε ως αποτέλεσμα βιομηχανικής δραστηριότητας, δεδομένου ότι χρησιμοποιούνται ευρέως στην επεξεργασία βαφών και φιλμς, στη μεταλλουργία αλλά και ως εντομοκτόνα. Το αρσενικό βρίσκεται στην επιφάνεια της Γης σε αφθονία $1,5 - 2,0 \text{ g} \cdot \text{ton}^{-1}$, ενώ το αντιμόνιο περίπου σε $0,2 - 0,5 \text{ g} \cdot \text{ton}^{-1}$.

Το αρσενικό συμπεριφέρεται και ως μέταλλο και ως αμέταλλο και μπορεί να βρεθεί σε ανόργανη, οργανική ή μεταλλική μορφή. Οι συνηθέστερες οξειδωτικές του βαθμίδες είναι η τρισθενής As(III) και η πεντασθενής As(V). Οι μορφές αυτές απαντώνται στο έδαφος και στο νερό και καθορίζονται από το pH και το οξειδοαναγωγικό δυναμικό του συστήματος.



Εικόνα 1. Οξειδωτικές βαθμίδες του αρσενικού ανάλογα το pH.

Στα φυσικά υπόγεια νερά, το αρσενικό μπορεί επίσης να υπάρξει ως συνδυασμός των δύο οξειδωτικών βαθμίδων με διαφοροποίηση των σχετικών αναλογιών ανάλογα με την ύπαρξη οξυγόνου: σε πλούσια σε οξυγόνο νερά επικρατεί η πεντασθενής μορφή, ενώ σε έλλειψη οξυγόνου αφθονεί η τρισθενής μορφή. Σε $\text{pH} > 2,3$ επικρατεί η ιονική πεντασθενής βαθμίδα (εικόνα 1), ενώ η τρισθενής εμφανίζεται ως μη ιονικό αρσενικό οξύ H_3AsO_3 σε pH μέχρι 9 (Aragon and Thomson 2002).

Το αρσενικό και το αντιμόνιο ανήκουν στην V_B ομάδα του Περιοδικού Πίνακα, οπότε αναμένεται να έχουν παρόμοιες χημικές ιδιότητες. Το αντιμόνιο είναι ημι-μέταλλο και απαντάται φυσικά στο περιβάλλον, αλλά μπορεί να εισέλθει και ως αποτέλεσμα ανθρώπινων δραστηριοτήτων, δεδομένου ότι χρησιμοποιείται ευρέως στη μεταλλουργία.

Η τοξικότητα του αρσενικού και του αντιμονίου είναι ευρέως γνωστή. Σε πολλές χώρες, όπως η Ινδία, το Μπαγκλαντές και η Κίνα, έχουν αναφερθεί σοβαρά προβλήματα υγείας λόγω έκθεσης σε αρσενικό μέσω κατάποσης ρυπασμένου νερού (Kang *et al.* 2003). Σύμφωνα με το Εθνικό Συμβούλιο Έρευνας (National Research Council), η συνεχής και μακρόχρονη έκθεση σε αρσενικό μέσω του πόσιμου νερού ενοχοποιείται για διάφορες μορφές καρκίνου, όπως ουροδόχου κύστης, πνευμόνων, δέρματος, νεφρών, ήπατος και προστάτη (Pontius *et al.* 1994; NRC 1999; 2002). Από την άλλη, η συνεχώς αυξανόμενη χρήση του αντιμονίου στη βιομηχανία, κυρίως ως επιβραδυντικό φωτιάς, στην κεραμική και αλλού, αυξάνει τους κινδύνους για την ανθρώπινη υγεία. Έχει αναφερθεί ότι η εισπνοή ενώσεων αντιμονίου μπορεί να προκαλέσει πνευμονίτιδα, ίνωση, βλάβη στο νωτιαίο μυελό και καρκίνωμα (Kang *et al.* 2003).

Λαμβάνοντας υπόψη τις επιδράσεις επί της υγείας, η Ειδική Επιτροπή FAO/WHO για τα πρόσθετα τροφίμων (JECFA 1998) έχει θεσπίσει Προσωρινή Ανεκτή Εβδομαδιαία Πρόσληψη (Provisional Tolerable Weekly Intake, PTWI) για το αρσενικό την τιμή $0,015 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ βάρους σώματος, ενώ ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας

(World Health Organization, WHO), και η Ευρωπαϊκή Ένωση έχουν νομοθετήσει Οδηγό – Τιμή για τα πόσιμα νερά τα $10 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$. Αντίστοιχα για το αντιμόνιο έχει οριστεί Ανεκτή Ημερήσια Πρόσληψη (Tolerable Daily Intake, TDI) η συγκέντρωση των $0,006 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ βάρους σώματος (WHO 2003), ενώ η Οδηγός-Τιμή για το πόσιμο νερό είναι $20 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ σύμφωνα με την WHO και $5 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Ένωση (EU 1998; WHO 2003).

Η υψηλή συγγένεια μεταξύ των ιόντων αρσενικού και των σιδηρούχων μεταλλευμάτων (Wilkie and Hering 1996; Raven *et al.* 1998; Goldberg and Johnston 2001) έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως για την απομάκρυνση του αρσενικού από το πόσιμο νερό μέσω προσρόφησης σε μεταλλικά οξειδία κατά τις διεργασίες συσσωμάτωσης ή μέσω προσροφητικών πληρωμένων κλινών, ιονανταλλακτικών ρητινών και συστήματα διαχωρισμού μεμβρανών (Scott *et al.* 1995; McNeill and Edwards 1997; Brandhuber and Amy 1998, 2001; Chen *et al.* 2002; Wingrich and Wolf 2002; DeMarco *et al.* 2003).

Η παρούσα εργασία εστιάζει στην εφαρμογή προσρόφησης πάνω σε άμορφο σιδηρούχο προσροφητικό υλικό για την απομάκρυνση από το πόσιμο νερό του αρσενικού και του αντιμονίου, χωριστά ή σε συνύπαρξη. Το προσροφητικό υλικό Granular Ferric Hydroxide, GFH), είναι ένα συνθετικό υδροξείδιο του σιδήρου που αποτελείται από ελαφρώς κρυσταλλικό $\beta\text{-FeOOH}$ (ειδική επιφάνεια $250\text{-}300 \text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$, πορώδες $75\%\text{-}80\%$). Το GFH περιέχει επίσης ιόντα χλωρίου εφόσον παρασκευάζεται από διάλυμα χλωριούχου σιδήρου με ουδετεροποίηση και καθίζηση (Driehaus *et al.* 1998). Κατά την παρασκευή του δεν εφαρμόζεται ζήρανση και το υλικό πρέπει να διατηρηθεί υγρό για να διατηρήσει την δραστηριότητά του (Driehaus *et al.* 1998; Jekel and Seith, 2000). Είναι εμπορικά διαθέσιμο και σύμφωνα με τους προμηθευτές έχει την ικανότητα να απομακρύνει τόσο το τρισθενές όσο και το πεντασθενές αρσενικό σε επίπεδα ώστε οι συγκεντρώσεις τους να είναι μικρότερες από $5 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ στο πόσιμο νερό.

Η Ταχεία Δοκιμή Στηλών Μικρής Κλίμακας (Rapid Small Scale Column Test, RSSCT) χρησιμοποιεί μία μικρή στήλη που έχει πληρωθεί με προσροφητικό υλικό αλεσμένο σε μικρού μεγέθους σωματίδια για να προσομοιάσει την απόδοση ενός πιλότου ή ενός συστήματος Πλήρους Κλίμακας. Ο σχεδιασμός της RSSCT είναι τέτοιος ώστε να επιτρέπει την υπό κλίμακα μεγέθυνση των δεδομένων για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς κορεσμού (breakthrough) μεγαλύτερων στηλών, λόγω της ομοιότητας των διεργασιών μεταφοράς μάζας και των υδροδυναμικών χαρακτηριστικών. Αρχικά σχεδιάστηκε για την εκτίμηση του ενεργού άνθρακα στην επεξεργασία του νερού (Crittenden *et al.* 1991) και έκτοτε έχει επιτυχώς χρησιμοποιηθεί στην απομάκρυνση του αρσενικού μέσω υλικών μεταλλικού οξειδίου (Dennis 2006; Westerhoff and Benn 2008). Η τεχνική RSSCT είναι ιδιαίτερος χρήσιμη επειδή μειώνει σημαντικά τον απαιτούμενο χρόνο για την εξαγωγή δεδομένων τυπικής απόδοσης.

Τα κύρια μειονεκτήματα των στηλών πιλοτικής κλίμακας που είναι ο μεγάλος χρόνος των πειραμάτων, οι μεγάλες ποσότητες προσροφητικού υλικού και νερού που απαιτούνται, το υψηλό κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας της πειραματικής μονάδας εξαλείφονται με την δοκιμή RSSCT.

Για τον καθορισμό των σχέσεων μεταξύ της καμπύλης κορεσμού (breakthrough curve) σε μικρές και μεγάλες στήλες εφαρμόζονται μαθηματικά μοντέλα (Crittenden *et al.* 1991). Έχουν αναπτυχθεί δύο διαφορετικές προσεγγίσεις σχεδιασμού, μία συνεχούς διάχυσης και μία αναλογικής διάχυσης. Και τα δύο μοντέλα δέχονται την παραδοχή ότι η διασπορά είναι αμελητέα δεδομένου ότι ο ρυθμός υδραυλικής φόρτισης είναι υψηλός στη δοκιμή με μικρές στήλες. Το μοντέλο της συνεχούς διάχυσης θεωρεί ότι η ζώνη μεταφοράς μάζας είναι αποτέλεσμα διάχυσης υμενίου, ενώ η αναλογική διάχυση

υποθέτει ότι η ζώνη μεταφοράς μάζας είναι αποτέλεσμα διασωματιδιακής διάχυσης. Επιπλέον, γίνεται η παραδοχή ότι η διασωματιδιακή διάχυση είναι ίδια στις μικρές και στις μεγάλες στήλες. Τα δύο μοντέλα χρησιμοποιήθηκαν πρόσφατα για την απομάκρυνση του αρσενικού με χρήση πορώδους μεταλλικού (υδρο)οξειδίου ως προσροφητικό υλικό (Metcalf & Eddy 2003).

Το αρσενικό προσροφάται μη αντιστρεπτά στο υλικό και το υλικό μπορεί στη συνέχεια να αποθεθεί με ασφάλεια σε χώρους υγειονομικής ταφής, όπως αποδεικνύουν τα περισσότερα leaching tests. Υπάρχουν αναφορές ότι το συγκεκριμένο προσροφητικό υλικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επεξεργασία περίπου 50.000 με 300.000 όγκους κλίνης (Bed Volumes) ρυπασμένου με αρσενικό νερού χωρίς αντικατάσταση του υλικού (Jekel and Seith 2000).

Λίγα είναι γνωστά για την αποτελεσματική εφαρμογή αυτής της μεθόδου στην απομάκρυνση του αντιμονίου. Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η επιβεβαίωση της αποτελεσματικότητας της απομάκρυνσης του αρσενικού με χρήση του υλικού GFH και η διερεύνηση της απομάκρυνσης του αντιμονίου με παρόμοιο τρόπο. Επιπλέον, έγινε διερεύνηση της ταυτόχρονης απομάκρυνσης αρσενικού και αντιμονίου καθώς και της επίδρασης των ποιοτικών χαρακτηριστικών του νερού σε αυτές τις διεργασίες.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1 ΠΡΟΣΡΟΦΗΤΙΚΟ ΥΛΙΚΟ

Το κοκκώδες υδροξείδιο του σιδήρου (GFH, Bayoxide® E33HC) αγοράστηκε από την εταιρεία Severn Trent. Το υλικό διατηρήθηκε υγρό ώστε να διατηρήσει την προσροφητική του ικανότητα. Πριν τη χρήση το GFH λειοτριβήθηκε, ελήφθη το κλάσμα από 0,2 – 0,45 mm, με τη βοήθεια κατάλληλων κόσκινων και ξεπλύθηκε με απιονισμένο νερό.

2.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΤΑΧΕΙΑΣ ΔΟΚΙΜΗΣ ΣΤΗΛΩΝ ΜΙΚΡΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ (RAPID SMALL-SCALE COLUMN TEST EXPERIMENTS).

Οι εργαστηριακές στήλες σχεδιάστηκαν με υπό κλίμακα σμίκρυνση μιας υποθετικής πιλοτικής στήλης υπό την παραδοχή συνεχούς διάχυσης, με χρήση της εξίσωσης 2.1 (Πίνακας 1).

$$\frac{EBCT_{SC}}{EBCT_{LC}} = \left[\frac{d_{SC}}{d_{LC}} \right]^{2-X} \quad X=0 \quad (2.1)$$

όπου X = εξαρτάται από τη διάχυση των πόρων (Crittenden *et al.*, 1991)

EBCT = χρόνος επαφής με προσροφητικό υλικό

d = διάμετρος σωματιδίου

SC = μικρή στήλη

LC = μεγάλη στήλη

Σύμφωνα με την τρέχουσα βιβλιογραφία, ο παράγοντας X κυμαίνεται από 0 στη συνεχή διάχυση και 1 στην αναλογική διάχυση.

Πίνακας 1. Αντιστοιχία συνθηκών λειτουργίας πιλότου και RSSCT.

Παράμετρος	Πιλότος	Μικρή Στήλη
Empty Bed Contact Time (min)	5	0,37
Διάμετρος Σωματιδίων (mm)	1,2	0,325
Ταχύτητα U (m/h)	5	18,46
Παροχή Q (ml/min)	15124	54,35
Διάμετρος στήλης (cm)	34	1,5
Απαιτούμενος όγκος νερού (m ³)	1089	0,287
Μήκος κλίνης (cm)	41,7	11,3
Χρόνος πειράματος (d)	50	3,67

Τέσσερις γυάλινες στήλες διαμέτρου 1,5 cm και ύψους 1 m χρησιμοποιήθηκαν (εικόνα 2). Κάθε RSSCT στήλη πληρώθηκε με περίπου 200 g του πλυμένου και κοσκινισμένου GFH, ενώ στον πυθμένα κάθε στήλης είχαν προστεθεί γυάλινα σφαιρίδια για ομαλή ροή και βαλοβάμβακας για αποφυγή διαφυγής του υλικού. Εφαρμόστηκε αντίστροφη πλύση στις στήλες με απιονισμένο νερό, μέχρι το εξερχόμενο νερό να διαυγάσει, ώστε να εξασφαλιστεί η πλήρης ύγρανση του υλικού αλλά και ο καθαρισμός του υλικού και η απομάκρυνση τυχόν σωματιδίων. Η ροή μίας τυπικής αντίστροφης πλύσης καθορίστηκε σε 10- 20 ml·min⁻¹.

**Εικόνα 2:** Πειραματική διάταξη μικροστηλών

2.3 ΔΙΑΛΥΜΑΤΑ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ

Διαλύματα As(III) και Sb(III), συγκέντρωσης 500 mg·l⁻¹ παρασκευάστηκαν από τα αντίστοιχα άλατά τους, NaAsO₂ και KSbOC₄H₄O₆. Στις δοκιμές των στηλών χρησιμοποιήθηκαν 4 διαλύματα σε τρεις τύπους νερού. Τα διαλύματα ήταν: i) 100μg·l⁻¹ διάλυμα αρσενικού, ii) 100 μg·l⁻¹ διάλυμα αντιμονίου, iii) διάλυμα 100 μg·l⁻¹ αρσενικού και 100 μg·l⁻¹ αντιμονίου και iv) διάλυμα 100 μg·l⁻¹ αρσενικού και 100 μg·l⁻¹ αντιμονίου υπό αερισμό. Οι τύποι των νερών ήταν: α) απιονισμένο νερό, β) νερό μερικώς επεξεργασμένο με αντίστροφη ώσμωση και γ) νερό βρύσης. Οι χημικές αναλύσεις των δύο τελευταίων τύπων νερού παρουσιάζονται στον πίνακα 2.

Τα διαλύματα τροφοδοσίας εισήχθησαν στις στήλες μέσω δοσιμετρικών αντλιών από πλαστικές φιάλες 50 l με παροχή 54,35 cm³·min⁻¹ και γραμμική ταχύτητα 18,46 m·h⁻¹. Οι στήλες λειτουργούσαν με ροή από πάνω προς τα κάτω (down flow mode).

Πίνακας 2. Χημική ανάλυση νερού βρύσης και μερικώς επεξεργασμένου νερού.

Παράμετρος	Μερικώς επεξεργασμένο νερό	Νερό βρύσης
pH	6,6	7,3
Αγωγιμότητα ($\mu\text{mhos}\cdot\text{cm}^{-1}$)	197	776
Νιτρικά ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1} \text{NO}_3^-$)	15,8	25,1
Νιτρώδη ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1} \text{NO}_2^-$)	0,010	0,010
Αμμώνιο ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1} \text{NH}_4^+$)	<0,05	<0,05
Ολική σκληρότητα ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1} \text{CaCO}_3$)	97	440
Χλωριούχα ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1} \text{Cl}^-$)	1,0	2,1
Θειικά ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1} \text{SO}_4^{2-}$)	14	65
Σίδηρος ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1} \text{Fe}$)	10	20
Φωσφορικά ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1} \text{PO}_4^{3-}$)	0,01	0,05
Αλκαλικότητα ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1} \text{CaCO}_3$)	89	200
Διοξείδιο του πυριτίου ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1} \text{SiO}_2$)	1,70	7,84

2.4 ΑΝΑΛΥΣΗ

Η συλλογή δειγμάτων από την εκροή γινόταν κάθε 7 ώρες περίπου, όταν 20 l διαλύματος είχαν διαπεράσει τη στήλη.

Όλα τα δείγματα διατηρήθηκαν στους 5°C μέχρι τον προσδιορισμό αρσενικού και αντιμονίου. Ο προσδιορισμός As και Sb πραγματοποιήθηκε με Ατομική Απορρόφηση σε διαμόρφωση φούρνου γραφίτη (GFAAS). Ειδικά για τα πρώτα εκπλύματα εφαρμόστηκε η τεχνική Παραγωγής Υδριδίων, δεδομένου ότι οι συγκεντρώσεις των δύο στοιχείων ήταν ιδιαίτερα χαμηλές.

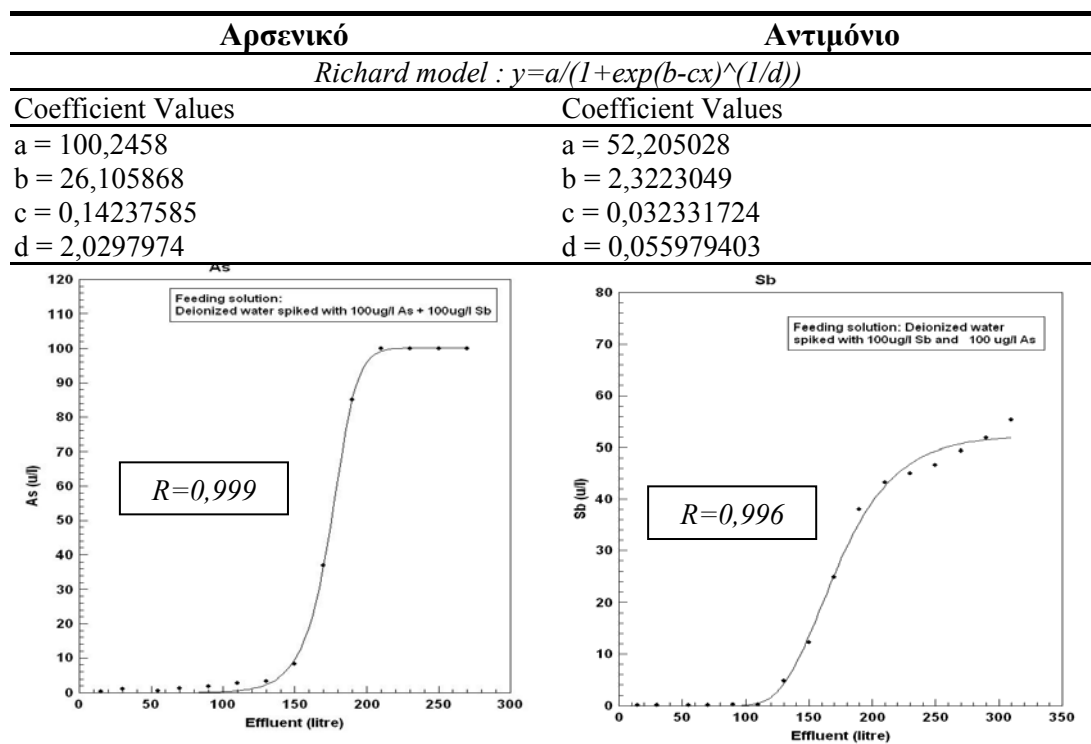
2.5 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗΣ

Η αποτελεσματικότητα του υλικού GFH για την απομάκρυνση των δύο στοιχείων προσδιορίστηκε σε όρους όγκου κλίνης (Bed Volume, BV) μέχρι είτε τη Μέγιστη Επιτρεπτή Συγκέντρωση (MCL) του στοιχείου (As ή Sb) είτε μέχρι τον κορεσμό του υλικού. Ως όγκος κλίνης ορίζεται ο λόγος της ποσότητας του νερού που υπέστη επεξεργασία προς τον όγκο του πληρωτικού υλικού της στήλης. Επιπλέον υπολογίστηκε η ειδική ικανότητα (specific capacity) μέσω της συνολικής ποσότητας του προσροφημένου στοιχείου στο υλικό GFH ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$).

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Οι καμπύλες κορεσμού (breakthrough curves) χαράχτηκαν για κάθε στοιχείο και για όλα τα πειράματα. Το σιγμοειδές μοντέλο Richards βρέθηκε να έχει τη βέλτιστη προσαρμογή για όλες τις καμπύλες. Οι αντίστοιχοι συντελεστές συσχέτισης R βρέθηκαν από 0,995 έως 0,999. Το γράφημα 1 απεικονίζει δύο χαρακτηριστικές καμπύλες που εξήχθησαν από τα πειράματα απομάκρυνσης αρσενικού και αντιμονίου με διάλυμα τροφοδοσίας 100 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ As και 100 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ Sb σε απιονισμένο νερό. Το μοντέλο Richard περιγράφεται από την εξίσωση 3.1.

$$y = \left(\frac{a}{1 + e^{(b-cx)}} \right)^{\frac{1}{d}} \quad (3.1)$$



Γράφημα. 1: Καμπύλες κορεσμού για το αρσενικό και το αντιμόνιο με διάλυμα τροφοδοσίας $100 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ As και $100 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ Sb σε απιονισμένο νερό.

Τελικά δεκαοκτώ (18) καμπύλες κατασκευάστηκαν και η προσροφηθείσα ποσότητα κάθε στοιχείου στο υλικό υπολογίστηκε μετά από ολοκλήρωση σε δύο σημεία: στο σημείο όπου οι συγκεντρώσεις των στοιχείων στο έκπλυμα εξισώθηκαν με την παραμετρική τιμή και στο σημείο κορεσμού του υλικού. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 3. Όπως φαίνεται από τον πίνακα, το υλικό GFH είναι ικανό να προσροφήσει ταυτόχρονα το As και το Sb, από τα διαλύματα τροφοδοσίας που τα περιέχουν και τα δύο.

Ο αριθμός των όγκων κλίνης που απαιτείται μέχρι κορεσμού του υλικού για το αρσενικό στην παρούσα εργασία βρέθηκε να είναι πολύ μικρότερος από αυτόν άλλων ερευνητών. Οι Westerhoff *et al.* (2005) αναφέρουν 2 – 8 φορές υψηλότερους αριθμούς όγκων για στήλες μικρής κλίμακας και υπό την παραδοχή της συνεχούς διάχυσης. Επιπλέον, ο αριθμός των όγκων κλίνης μειώνεται όταν το νερό που χρησιμοποιείται είναι βρύσης σε σχέση με το απιονισμένο. Μία πιθανή εξήγηση θα μπορούσε να είναι η παρουσία ανταγωνιστικών ιόντων στο νερό βρύσης, όπως πυριτικών, φωσφορικών, θεικών κ.λπ.

Το pH των διαλυμάτων τροφοδοσίας με απιονισμένο νερό κυμαινόταν από 5,94 έως 6,12 σε συνθήκες έλλειψης αερισμού, ενώ υπό αερισμό η αντίστοιχη τιμή ήταν 7,06. Οι αντίστοιχες τιμές pH για το μερικώς επεξεργασμένο νερό ήταν 6,12 – 6,78 και 7,04, ενώ για το νερό βρύσης 7,24-7,40 και 8,13.

Πίνακας 3. Ειδική προσροφητική ικανότητα του GFH σε συγκεντρώσεις ίσες με την παραμετρική τιμή για As και Sb και σε πλήρη κορεσμό του υλικού.

Αρσενικό						Αντιμόνιο				
τύπος νερού	Διάλυμα τροφοδοσίας: 100 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ As					Διάλυμα τροφοδοσίας: 100 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ Sb				
	B.V. ¹	x/m	B.V. ²	x/m	C/C ₀	B.V. ¹	x/m	B.V. ²	x/m	C/C ₀
D.W.	7827	1,59	10035	1,82	0,36	6723	1,34	25088	3,94	0,65
P.T.W.	6021	1,17	12543	2,27	0,71	2208	0,44	17060	2,62	0,43
T.W.	2710	0,54	7025	1,06	0,80	1666	0,33	10537	1,51	0,66

Διάλυμα τροφοδοσίας: 100 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ As + 100 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ Sb											
τύπος νερού	As			Sb							
	B.V. ¹	x/m	C/C ₀	B.V. ²	x/m	C/C ₀	B.V. ¹	x/m	B.V. ²	x/m	C/C ₀
D.W.	7544	1,53	0,85	10035	1,77	0,85	6673	1,36	11039	2,00	0,45
P.T.W.	3763	0,72	0,74	12543	1,88	0,74	2659	0,53	14049	2,12	0,52
T.W.	1776	0,35	0,78	5519	0,74	0,78	2669	0,53	13547	1,92	0,74

Διάλυμα τροφοδοσίας: 100 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ As + 100 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ Sb (υπό αερισμό)											
τύπος νερού	As			Sb							
	B.V. ¹	x/m	C/C ₀	B.V. ²	x/m	C/C ₀	B.V. ¹	x/m	B.V. ²	x/m	C/C ₀
D.W.	8068	1,63	0,79	14049	2,29	0,79	10386	2,11	16558	3,14	0,30
P.T.W.	4415	0,87	0,70	15053	2,18	0,70	602	0,12	13547	1,97	0,60
T.W.	1801	0,36	0,80	6522	0,82	0,80	1204	0,24	11039	1,43	0,65

B.V.¹: Bed Volumes που απαιτούνται μέχρι η συγκέντρωση του στοιχείου να φθάσει την παραμετρική τιμή (As: 10 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, Sb: 5 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)

B.V.²: Bed Volumes που απαιτούνται μέχρι κορεσμού του υλικού GFH

x/m: ειδική ικανότητα προσρόφησης του GFH ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)

C/C₀: Λόγος συγκεντρώσεων εκπλύματος προς αρχική τροφοδοσία

D.W.: Απιονισμένο νερό, P.T.W. Μερικώς επεξεργασμένο νερό, T.W.: Νερό βρύσης

Η απομάκρυνση του αντιμονίου ήταν πιο αποτελεσματική από αυτήν του αρσενικού, σε όρους όγκων κλίνης, μέχρι τον κορεσμό του υλικού. Όσον αφορά στα διαλύματα που περιέχουν ταυτόχρονα αρσενικό και αντιμόνιο, παρατηρείται ότι η προσροφηθείσα ποσότητα του αρσενικού δεν επηρεάζεται σημαντικά από την παρουσία του αντιμονίου και αντιστρόφως. Είναι πιθανό τα κέντρα προσρόφησης του αρσενικού να διαφέρουν από αυτά του αντιμονίου ή τουλάχιστον τα δύο στοιχεία να μην είναι ανταγωνιστικά. Ο αερισμός των διαλυμάτων τροφοδοσίας οδηγεί σε ακόμα υψηλότερες προσροφημένες ποσότητες, ειδικά για το αρσενικό. Αυτό είναι αναμενόμενο λόγω της οξειδωσης του As^{+3} σε As^{+5} κατά τον αερισμό. Προηγούμενες έρευνες έχουν καταδείξει την καλύτερη ικανότητα προσρόφησης του πεντασθενούς αρσενικού (Lackovic *et al.* 2000).

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η απομάκρυνση του αντιμονίου από το νερό μέσω προσρόφησης επιτυγχάνεται με ικανοποιητική απόδοση με ταυτόχρονη παρουσία αρσενικού ή όχι. Η ικανότητα προσρόφησης του ενός στοιχείου δε φαίνεται να επηρεάζεται από την παρουσία του άλλου.

Πρέπει όμως να επισημανθεί ότι ο αριθμός των όγκων κλίνης (bed volumes) που απαιτείται μέχρι τον κορεσμό του υλικού είναι 2 -10 φορές μεγαλύτερος από αυτόν που

απαιτείται έως οι συγκεντρώσεις των δύο στοιχείων στα εκπλύματα να εξισωθούν με την αντίστοιχη παραμετρική τιμή. Κατά συνέπεια ένα σύστημα πλήρους κλίμακας θα πρέπει να περιέχει περισσότερες από μία μονάδες σε σειρά ώστε να αποδοθεί η μέγιστη προσροφητική ικανότητα του GFH.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Aragon, A. and Thomson, B., 2002. *Rapid Small-Scale Column Testing For Arsenic Adsorption Media*. Available on:
http://ipcc.utulsa.edu/Conf2002/aragon_thomson_chwirka_50.pdf
- Brandhuber, P., and Amy, G., 1998. *Alternative methods for membrane filtration of arsenic from drinking water*. Desalination, 117: 1–10.
- Brandhuber, P., and Amy, G., 2001. *Arsenic removal by a charged ultrafiltration membrane—Influences of membrane operating conditions and water quality on arsenic rejection*. Desalination, 140: 1–14.
- Chen, A.S.C., Fields, K.A., Sorg, T.J. and Wang, L.L., 2002. *Field evaluation of As removal by conventional plants*. J. Am. Water Works Assoc., 94: 64–77.
- Crittenden, J.C., Reddy, P.S., Arora, H., and Hand, J.T.D.W., 1991. *Predicting GAC performance with Rapid Small-Scale Column Tests*. Journal AWWA, 83:77-87.
- DeMarco, M.J., Sengupta, A.K., and Greenleaf, J.E., 2003. *Arsenic removal using a polymeric/inorganic hybrid sorbent*. Water Res., 37: 164–176.
- Dennis, R., 2006. *Testing Method Enables Rapid Scale-up for Arsenic Treatment Systems*. Available on: www.severntrentservices.com/enews/vol12/arsenic.html
- Driehaus, W., Jekel, M. and Hildebrandt, U., 1998. *Granular ferric hydroxide – a new adsorbent for the removal of arsenic from natural water*. J. Water SRT- Aqua, 47: 30–35.
- European Union, 1998. Council Directive 98/83/EC of 3 November 1998 on the quality of water intended for human consumption.
- Goldberg, S. and Johnston, C.T., 2001. *Mechanisms of arsenic adsorption on amorphous oxides evaluated using macroscopic measurements, vibrational spectroscopy, and surface complexation modeling*. J. Colloid Interface Sci., 234:204–216.
- JECFA (Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives), 1998. *Arsenic* (WHO Food Additives Series 24). Available on:
<http://www.inchem.org/documents/jecfa/jecmono/v024je08.htm>
- Jekel, M. and Seith, R., 2000. *Comparison of conventional and new techniques for the removal of arsenic in a full scale water treatment plant*. Water Supply, 18:628-631.
- Kang, M., Kamei, T., Magara, Y., 2003. *Comparing polyaluminum chloride and ferric chloride for antimony removal*. Water Res., 37: 4171-4179.
- Lackovic, J.A., Nikolaidis, N.P., Dobbs, G.M., 2000. *Inorganic Arsenic Removal by Zero-Valent Iron*. Environ. Eng. Sci., 17: 29-39.
- McNeill, L. S. and Edwards, M., 1997. *Predicting As removal during metal hydroxide precipitation*. J. Am. Water Works Assoc., 89: 75–86.
- Metcalf & Eddy 2003. *Advanced Wastewater Treatment (Chapter 11)* in: Wastewater Engineering Treatment and Reuse, 4th ed. Metcalf & Eddy inc., pp. 1156-1159
- National Research Council (NRC). 1999. *Arsenic in drinking water*. National Academy of sciences, Washington, D.C.

- National Research Council (NRC). 2002. *Arsenic in drinking water* (NRC subcommittee to update the 1999 report arsenic in drinking water). National Academy of sciences, Washington, D.C.
- Pontius, F.W., Brown, K.G. and Chen, C.J., 1994. *Health implications of arsenic in drinking water*. J. Am. Water Works Assoc., 86:52-63.
- Raven, K.P., Jain, A. and Loeppert, R.H., 1998. *Arsenite and arsenate adsorption on ferrihydrite: kinetics, equilibrium, and adsorption envelopes*. Environ. Sci. Technol., 32: 344-349.
- Scott, K.N., Green, J.F., Do, H.D., and McLean, S.J., 1995. *Arsenic removal by coagulation*. J. Am. Water Works Assoc., 87: 114-126.
- Westerhoff, P. and Benn, T., 2008. *Assessing Arsenic Removal by Metal (Hydr)Oxide Adsorptive Media Using Rapid Small Scale Column Tests*. Document EPA/600/R-08/051 April 2008. Available on: <http://www.epa.gov/nrmrl/pubs/600r08051/600r08051.pdf>
- Westerhoff, P., Highfield, D., Badruzzaman, M. and Yoon, Y., 2005. *Rapid small-Scale Column Tests for Arsenate Removal in Iron Oxide Packed Bed Columns*. Journal of Environmental Engineering, 131: 262-271
- WHO 2003. *Antimony in drinking-water*. Background document for preparation of WHO Guidelines for drinking-water quality. Geneva, World Health Organization (WHO/SDE/WSH/03.04/74). Available on: http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/chemicals/antimonysum.pdf
- Wilkie, J. A. and Herring, J.G., 1996. *Adsorption of arsenic onto hydrous ferric oxide: Effects of adsorbate/adsorbent ratios and cooccurring solutes, colloids and surfaces. A: Physicochemical and engineering aspects*. Colloids Surf., A. 107: 97-110.
- Wingrich, H., and Wolf, C., 2002. *Research on the removal of arsenic from drinking water by flocculation with iron solutions and adsorption with granulated iron hydroxide (GEH)*. J. Water Supply Res Technol.-Aqua, 51: 273-281.

ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΩΝ ΑΣΤΙΚΩΝ ΣΤΕΡΕΩΝ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ ΑΠΟ ΤΟΥΣ ΔΗΜΟΥΣ ΤΟΥ ΝΟΜΟΥ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ – ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Σταύρος Γιαννόπουλος¹, Κωσταντίνος Πλάκας², Ειρήνη Δημούδη³,
Ευστάθιος Οικονόμου¹

¹Α.Π.Θ., Τ.Α.Τ.Μ., Τομέας Σ.Υ.Ε., 54124, Θεσσαλονίκη

²Ι.Δ.Ε.Π., Ε.Κ.Ε.Τ.Α. ΤΘ 60361, 6^ο χλμ. Οδού Χαριλάου-Θέρμης, 57001, Θέρμη, Θεσ/νίκη

³Πανεπιστήμιο Μακεδονίας, Τμήμα Τεχνικών Υπηρεσιών, Εγνατία 156, 54006, Θεσσαλονίκη

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτελεί η περιγραφή της υφιστάμενης κατάστασης και των προβλημάτων που αντιμετωπίζουν οι Δήμοι του Νομού Θεσσαλονίκης στη διαχείριση των Αστικών Στερεών Απορριμμάτων (Α.Σ.Α.) με έτος αναφοράς το 2009. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται και σχολιάζεται η πολιτική διαχείρισης των Α.Σ.Α. που ακολουθείται, οι αδυναμίες που διαπιστώθηκαν και γίνονται προτάσεις για τη βελτίωση της διαχείρισης των Α.Σ.Α. σε επίπεδο νομού. Οι σημαντικότερες αλλαγές σε επίπεδο νομού ήταν η έναρξη λειτουργίας του ΧΥΤΑ Μαυροράχης και η παράλληλη διακοπή λειτουργίας της χωματερής των Ταγαράδων και η αδειοδότηση πολλών Συλλογικών Συστημάτων Εναλλακτικής Διαχείρισης με κυρίαρχο αυτό της ανακύκλωσης συσκευασιών, η λειτουργία των οποίων έδωσε τη δυνατότητα σε πολλούς Δήμους να ξεκινήσουν να υλοποιούν σημαντικά προγράμματα ανακύκλωσης, αλλά και διαχείρισης ειδικών αποβλήτων.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Αστικά στερεά απόβλητα, διαχείριση Α.Σ.Α., νομός Θεσσαλονίκης.

MUNICIPAL SOLID WASTE MANAGEMENT BY THE MUNICIPALITIES OF THESSALONIKI PREFECTURE – PROBLEMS AND PERSPECTIVES

Stavros Yannopoulos¹, Kostas Plakas², Irini Dimoudi³, Efstathios Oikonomou¹

¹ Aristotle University of Thessaloniki, School of Rural and Surveying Engineering,
Department of Transportation and Hydraulic Engineering, 54124, Thessaloniki

² Chemical Process and Energy Resources Institute, Centre for Research and Technology –
Hellas, P.O. Box 60361, 6th km Charilaou-Thermi Road, 57001, Thermi, Thessaloniki

³ University of Macedonia, Dept. of Technical Services, Egnatia Str. 156, 54006, Thessaloniki

ABSTRACT

The scope of this paper is to describe the status in municipal solid waste management in the area of Thessaloniki prefecture, as well as the problems faced by the responsible municipalities with reference year of 2009. Specifically, the solid waste management policy and its deficiencies are described and commented, making finally, recommendations regarding the enhancement of the solid waste management at a prefecture level. The most important changes that affected recently the solid waste management in the Prefecture have been the start-up of the sanitary landfill of Mavrorachi, the subsequent termination of Tagarades solid waste disposal site operation, as well as the licensing of many Collective Alternative Waste Management Systems, with packaging recycling being in the centre of the recycling programme of many Municipalities.

KEY WORDS: Urban solid waste, solid waste management, Prefecture of Thessaloniki.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διαχείριση των στερεών αποβλήτων αποτελεί ίσως το σπουδαιότερο περιβαλλοντικό ζήτημα, που απασχολεί σήμερα όλες τις χώρες, δεδομένου ότι έχει ποικίλες διαστάσεις, οικονομικές, πολιτικές, νομικές, τεχνολογικές και κοινωνικές, αφενός για την προστασία της υγείας των ανθρώπων και αφετέρου, επειδή έχει ισχυρή σχέση με τον πολιτισμό, το περιβάλλον και την ποιότητα ζωής των ανθρώπων. Στην Ελλάδα, η διαχείριση των αστικών στερεών αποβλήτων (Α.Σ.Α.) αποτελεί ένα από τα πιο σύνθετα περιβαλλοντικά προβλήματα, ιδιαίτερα για τα μεγάλα αστικά κέντρα. Το εθνικό πλαίσιο της διαχείρισης των στερεών απορριμμάτων διαμορφώθηκε στον τομέα αυτό τα τελευταία, μόλις, δεκαπέντε χρόνια, και προσαρμόστηκε στις επιταγές του κοινοτικού δικαίου.

Σύμφωνα με το ισχύον νομοθετικό καθεστώς (Κ.Υ.Α. 50910/2727/2003), ο σχεδιασμός της διαχείρισης των στερεών αποβλήτων γίνεται, τόσο σε εθνικό, όσο και σε περιφερειακό επίπεδο. Όμως, η αρμοδιότητα για τη διαχείριση των στερεών αποβλήτων, στην οποία συμπεριλαμβάνονται η συλλογή, η μεταφορά, η μεταφόρτωση, η προσωρινή αποθήκευση, η αξιοποίηση και η διάθεση τους, συμπεριλαμβανομένης της εποπτείας των εργασιών αυτών, καθώς και της μετέπειτα φροντίδας των χώρων διάθεσης ανήκει στην πρωτοβάθμια τοπική αυτοδιοίκηση (Δήμοι και Κοινότητες), στην οποία και αποδίδεται η επιτυχία ή η αποτυχία της εφαρμογής των σχεδίων διαχείρισης. Η σπουδαιότητα του ρόλου της Τοπικής Αυτοδιοίκησης υπογραμμίζεται και στο Ν. 3536/2007 (άρθρο 30), ο οποίος καθιστά τους Ο.Τ.Α. αποκλειστικούς φορείς διαχείρισης των στερεών αποβλήτων.

Σύμφωνα με το νομοθετικό αυτό πλαίσιο, οι Ο.Τ.Α. υποχρεούνται να συστήσουν τους Φορείς Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων (Φο.Δ.Σ.Α.), οι οποίοι, υπό τη νομική μορφή Συνδέσμων και Ανώνυμων Εταιριών, αναλαμβάνουν την ολοκληρωμένη διαχείριση των στερεών αποβλήτων στο πλαίσιο της διαχειριστικής τους ενότητας κάθε Περιφέρειας. Μέχρι και τα τέλη του 2010 είχαν συσταθεί Φο.Δ.Σ.Α. σε αρκετές περιφέρειες, είτε έπειτα από διαβούλευση και συνεργασία των εμπλεκόμενων Ο.Τ.Α., είτε υποχρεωτικά όπως προβλέπει η ισχύουσα νομοθεσία (Ν.3536/2007, Ν.3688/2008). Με τις διατάξεις, ωστόσο, του άρθρου 104 του Ν. 3852/2010 ορίζεται ότι μέσα στα διοικητικά όρια κάθε Περιφέρειας και υπό την επιφύλαξη του άρθρου 206 παρ. 6 του νόμου αυτού που αφορά τους νησιωτικούς Δήμους Βορείου, Νοτίου Αιγαίου και Ιονίων Νήσων, οι σύνδεσμοι και οι ανώνυμες εταιρίες που έχουν συσταθεί ως Φο.Δ.Σ.Α. συγχωνεύονται σε ενιαίο σύνδεσμο στον οποίο συμμετέχουν υποχρεωτικά οι Δήμοι όλων των διαχειριστικών ενοτήτων μιας περιφέρειας. Είναι προφανές, λοιπόν, ότι με το Ν. 3852/2010 τροποποιούνται πολλά θέματα σχετικά με την τύχη των υφιστάμενων Φο.Δ.Σ.Α., αλλά και με το ρόλο και τις αρμοδιότητές τους.

Η ιδέα της κοινής διαχείρισης πολλών θεμάτων στερεών αποβλήτων σε επίπεδο περιφέρειας απορρέει όχι μόνο από λόγους οικονομίας κλίμακας, συσώρευσης τεχνογνωσίας και μείωσης διαχειριστικού κόστους, αλλά και από οργανωτικούς λόγους ολοκληρωμένης και συντονισμένης προσέγγισης, καθώς η αλυσίδα του συνολικού φάσματος της διαχείρισης στερεών αποβλήτων είναι ενιαία. Η οικονομία κλίμακας, που εκτιμάται ότι μπορεί να επιτευχθεί με το ν. 3852/2010, αφορά στη μείωση του υψηλού κόστους οδοκαθαρισμού και συλλογής που μπορεί να επιτευχθεί με τον καλύτερο συντονισμό, τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας, τα κοινά εργοτάξια, τις κοινές προμήθειες μεγαλύτερης κλίμακας, τη δυνατότητα εφαρμογής πιλοτικών εφαρμογών, τις αδειοδοτήσεις συλλογής, τα νέα συστήματα συλλογής και χρέωσης σε ολοκληρωμένο επίπεδο διαχείρισης στερεών αποβλήτων, την ενιαία κατάρτιση με δυνατότητα δημιουργίας νέων καθηκόντων και δεξιοτήτων του προσωπικού, τη δημιουργία κοινών πάρκων ανακύκλωσης και κυρίως, με την καλύτερη εξυπηρέτηση του πολίτη. Επιπλέον, αναμένεται ότι θα σταματήσει και το πάρεργο των πρόσθετων υπηρεσιών που παρέχονται από τις υπηρεσίες καθαριότητας και επιβαρύνουν το σχετικό κόστος τους και κατά συνέπεια, το κόστος της διαχείρισης των στερεών αποβλήτων.

Όμως, επειδή οι νέες αλλαγές που έχει επιφέρει το πρόγραμμα Καλλικράτης (ν. 3852/2010) απαιτούν οργάνωση, αλλά και χρόνο για υλοποίηση, παράμετροι οι οποίες δυστυχώς εκλείπουν την παρούσα περίοδο από την Ελλάδα και δεδομένου ότι η διαχείριση των στερεών απορριμμάτων πρέπει να είναι επαρκής και αδιάλειπτη, οι υφιστάμενοι Φο.Δ.Σ.Α. συνεχίζουν να λειτουργούν σήμερα με την ίδια νομική μορφή, δηλαδή του Συνδέσμου ή της Ανώνυμης Εταιρείας, μέχρι τη σύσταση και τη λειτουργία των νέων ενιαίων συνδέσμων σε κάθε περιφέρεια.

Στη Περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας και συγκεκριμένα, στη Μητροπολιτική Ενότητα Θεσσαλονίκης (πρώην νομαρχία Θεσσαλονίκης) αρμόδιος Φο.Δ.Σ.Α. είναι ο Σύνδεσμος Ο.Τ.Α Νομού Θεσσαλονίκης (Σ.ΟΤΑ.Ν.Θ.), ο οποίος θεσμοθετήθηκε από την Πολιτεία το έτος 1970 (ως σύνδεσμος Μείζονος Θεσσαλονίκης) και έχει ως μέλη του 45 πρώην Καποδιστριακούς Δήμους του νομού (14 νυν Καλλικρατικούς Δήμους) (<http://www.anakyklosi.gr/main.php?id=8&lang=el>). Ο Σ.ΟΤΑ.Ν.Θ. είναι μέχρι και σήμερα ο αποκλειστικός υπεύθυνος για την κατασκευή και διαχείριση των εγκαταστάσεων επεξεργασίας και διάθεσης των στερεών αποβλήτων στην Π.Ε. Θεσσαλονίκης, αλλά και για την υλοποίηση των έργων και των δραστηριοτήτων που καθορίζονται στον «Περιφερειακό Σχεδιασμό Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων» (ΠΕΣΔΑ) Περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας», ο οποίος εγκρίθηκε με την Απόφαση του Γενικού Γραμματέα Περιφέρειας 639/22.12.2005. Ο Περιφερειακός Σχεδιασμός αποτελεί την εξειδίκευση στο χώρο της Κεντρικής Μακεδονίας των γενικών κατευθύνσεων που περιλαμβάνονται στον Εθνικό Σχεδιασμό Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων (Ε.Σ.Δ.Α.) και αποτυπώνει το επίπεδο και το χαρακτήρα των επεξεργασιών, των συναινέσεων και της πολιτικής και επιστημονικής εμπειρίας την περίοδο σύνταξής του (2005) καθώς και τις προτεραιότητες εκείνης της εποχής.

Η παρακολούθηση της υφιστάμενης κατάστασης της διαχείρισης των στερεών απορριμμάτων αποτελεί χρήσιμο εργαλείο για τον έλεγχο της υλοποίησης των δεσμεύσεων που τέθηκαν σε όλα τα επίπεδα της διοίκησης και της αυτοδιοίκησης, με σκοπό την αποτελεσματική προώθηση των έργων και δράσεων που περιλαμβάνονται στον Περιφερειακό Σχεδιασμό. Προς αυτή την κατεύθυνση, πραγματοποιήθηκε έρευνα με αντικείμενο την καταγραφή της υφιστάμενης κατάστασης σε ότι αφορά στη διαχείριση των Αστικών Στερεών Απορριμμάτων (Α.Σ.Α.), δηλαδή οικιακά, εμπορικά, οδοκαθαρισμού κ.λπ. σε επίπεδο νομού (νυν Π.Ε. Θεσσαλονίκης), με έτος αναφοράς το 2009. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τα κυριότερα αποτελέσματα της έρευνας, ενώ γίνονται εποικοδομητικές προτάσεις για τον περιορισμό ή και την εξάλειψη των καταγεγραμμένων προβλημάτων που εντοπίστηκαν. Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε και τα αναλυτικά αποτελέσματα της έρευνας μπορούν να αναζητηθούν στην αντίστοιχη μελέτη των συγγραφέων, η οποία εκπονήθηκε υπό την αιγίδα του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας – Τμήμα Κεντρικής Μακεδονίας (Γιαννόπουλος κ.α., 2010).

2. ΤΑΥΤΟΤΗΤΑ ΕΡΕΥΝΑΣ

Η έρευνα πραγματοποιήθηκε κατά το χρονικό διάστημα 4 Μαρτίου έως 30 Σεπτεμβρίου 2009 (διάρκεια 7 περίπου μήνες), για τους σκοπούς της οποίας συντάχθηκε ειδικό ερωτηματολόγιο, το οποίο στάλθηκε στις αρμόδιες υπηρεσίες (Τεχνικές Υπηρεσίες, Αντιδημαρχίες Καθαριότητας) των 45 πρώην Καποδιστριακών Δήμων του νομού. Η σύνταξη του ερωτηματολογίου βασίστηκε σε ερωτήσεις με σκοπό τη δημιουργία μιας πλήρους δομημένης βάσης πληροφοριών, που να καλύπτει όλους τους άξονες έρευνας που συνθέτουν το αντικείμενο της διαχείρισης των Α.Σ.Α και συγκεκριμένα:

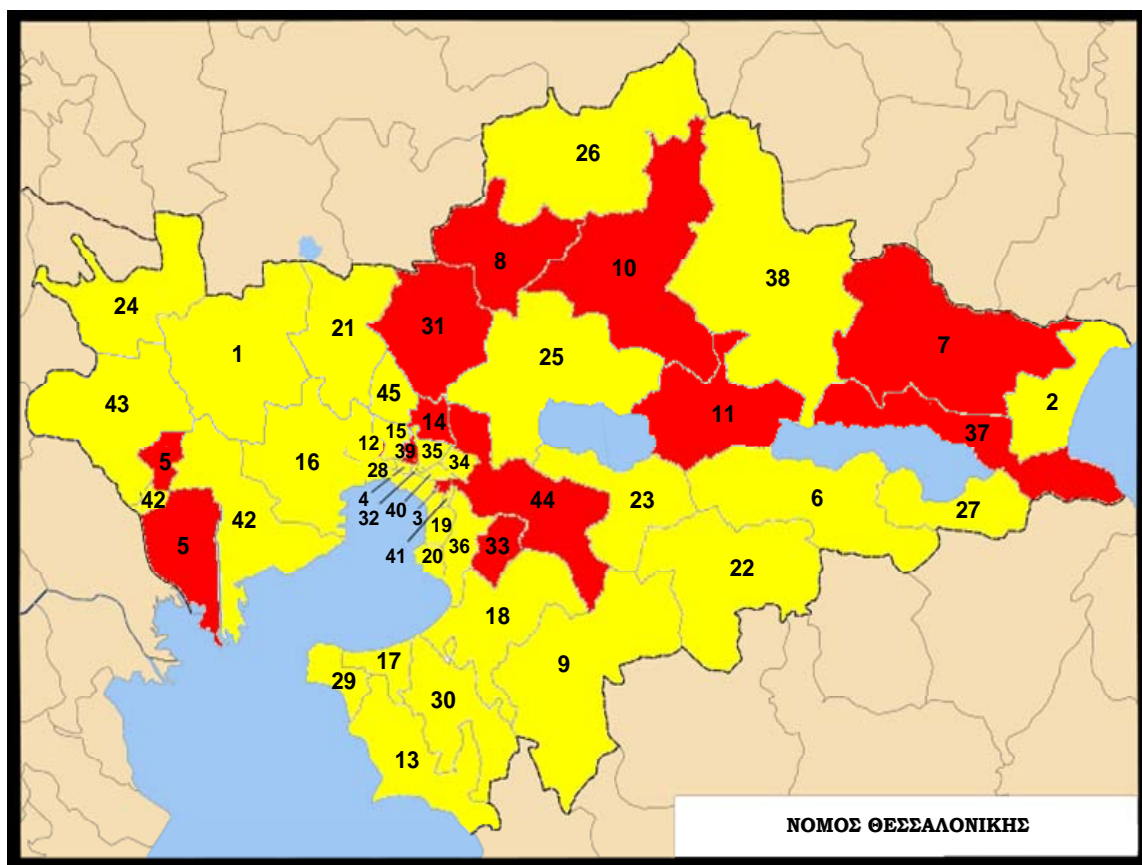
- α. Τα χαρακτηριστικά του Δήμου.
- β. Την ποσότητα και τη σύνθεση των Α.Σ.Α.
- γ. Την προσωρινή αποθήκευση των Α.Σ.Α.

- δ. Τη συλλογή Α.Σ.Α.
 ε. Τη μεταφορά των Α.Σ.Α. στη θέση επεξεργασίας ή διάθεσης.
 στ. Την ανάκτηση υλικών – ανακύκλωση και Σ.Σ.Ε.Δ της Ε.Ε.Α.Α.(Σύστημα Συλλογικής Εναλλακτικής Διαχείρισης της Ελληνικής Εταιρείας Ανακύκλωσης Αξιοποίησης).
 ζ. Γενικές Ερωτήσεις (τέλη, πρόστιμα, κ.λπ.).

Από τους 45 Δήμους του νομού συμμετείχαν στην έρευνα οι 33, δηλαδή ποσοστό 73,3% (Πίνακας 1). Σημειώνεται ότι από τους 13 Δήμους του πολεοδομικού συγκροτήματος Θεσσαλονίκης, συμμετείχαν στην έρευνα οι έντεκα (11) (ποσοστό 85%). Στο Σχήμα 1 σημειώνονται οι πρώην Καποδιστριακοί Δήμοι του Νομού Θεσσαλονίκης (περιοχή μελέτης) σύμφωνα με την αρίθμηση που δίνεται στον Πίνακα 1. Με κίτρινο φόντο σημειώνονται οι Δήμοι που συμμετείχαν στην έρευνα, ενώ με κόκκινο αυτοί που δεν συμμετείχαν.

Πίνακας 1: Κατάλογος των πρώην Καποδιστριακών Δήμων Ν. Θεσσαλονίκης, στον οποίο επισημαίνονται οι Δήμοι που συμμετείχαν στην έρευνα.

a/a	Δήμος	Συμμετοχή στην έρευνα	a/a	Δήμος	Συμμετοχή στην έρευνα
1	Αγίου Αθανασίου	ΝΑΙ	24	Κουφαλίων	ΝΑΙ
2	Αγίου Γεωργίου	ΝΑΙ	25	Λαγκαδά	ΝΑΙ
3	Αγίου Παύλου	-	26	Λαχανά	ΝΑΙ
4	Αμπελοκήπων	ΝΑΙ	27	Μαδύτου	ΝΑΙ
5	Αξιού	-	28	Μενεμένης	ΝΑΙ
6	Απολλωνίας	ΝΑΙ	29	Μηχανιώνας	ΝΑΙ
7	Αρέθουσας	-	30	Μίκρας	ΝΑΙ
8	Ασσήρου	-	31	Μυγδονίας	-
9	Βασιλικών	ΝΑΙ	32	Νεαπόλεως	ΝΑΙ
10	Βερτίσκου	-	33	Πανοράματος	-
11	Εγνατίας	-	34	Πεύκων	ΝΑΙ
12	Ελευθερίου – Κορδελιού	ΝΑΙ	35	Πολίχνης	ΝΑΙ
13	Επανομής	ΝΑΙ	36	Πυλαίας	ΝΑΙ
14	Ευκαρπίας	-	37	Ρεντίνας	-
15	Ευόσμου	ΝΑΙ	38	Σοχού	ΝΑΙ
16	Εχεδώρου	ΝΑΙ	39	Σταυρουπόλεως	-
17	Θερμαϊκού	ΝΑΙ	40	Συκεών	ΝΑΙ
18	Θέρμης	ΝΑΙ	41	Τριανδρίας	ΝΑΙ
19	Θεσσαλονίκης	ΝΑΙ	42	Χαλάστρας	ΝΑΙ
20	Καλαμαριάς	ΝΑΙ	43	Χαλκηδόνος	ΝΑΙ
21	Καλλιθέας	ΝΑΙ	44	Χορτιάτη	-
22	Καλλινδοίων	ΝΑΙ	45	Ωραιοκάστρου	ΝΑΙ
23	Κορώνειας	ΝΑΙ			



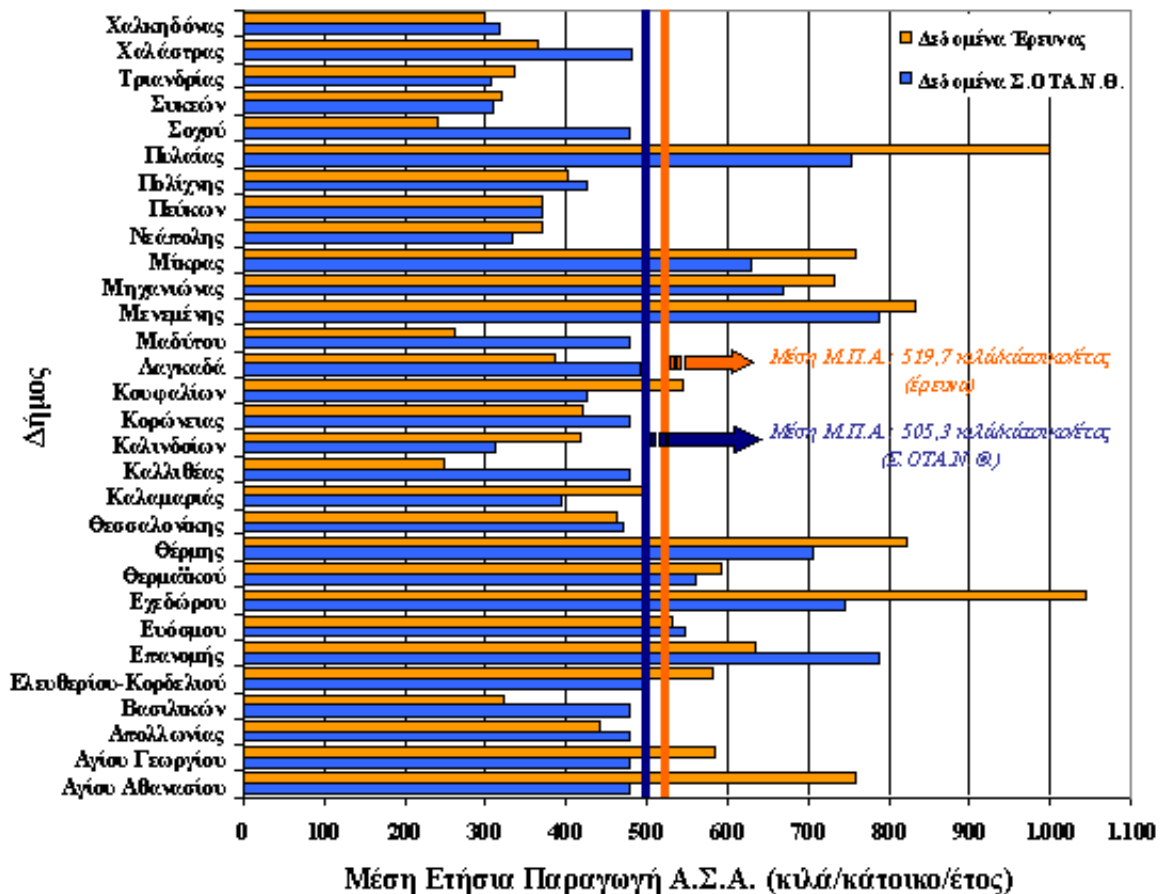
Σχήμα 1: Περιοχή μελέτης (πρώην Καποδιστριακοί Δήμοι Νομού Θεσσαλονίκης). Με κίτρινο φόντο σημειώνονται οι Δήμοι που συμμετείχαν στην έρευνα, ενώ με κόκκινο αυτοί που δεν συμμετείχαν.

Ο συνολικός πληθυσμός των 33 Δήμων ανέρχεται σε 933.305 κατοίκους (απογραφή 2001) και αντιπροσωπεύει ποσοστό 88,22% επί του συνολικού πληθυσμού του νομού. Το μεγαλύτερο μέρος του πληθυσμού του νομού κατοικεί στο πολεοδομικό συγκρότημα Θεσσαλονίκης και σε άλλα αξιόλογα οικιστικά κέντρα όπως είναι ο Λαγκαδάς, ο Εχέδωρος και η Ανατολική Περιαστική Ζώνη (Δήμοι Πυλαίας, Θέρμης, Θερμαϊκού). Ο πραγματικός πληθυσμός κάθε Δήμου διαφέρει από ελάχιστα έως σημαντικά, σε σχέση με εκείνον της απογραφής του 2001. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με τις εκτιμήσεις των Δήμων που συμμετείχαν στην έρευνα, οι διαφορές μεταξύ της απογραφής του 2001 και του πραγματικού πληθυσμού κυμαίνονται από 1% (Δήμος Μαδύτου) έως και 210% (Δήμος Πεύκων), με τους περισσότερους Δήμους να εκτιμούν τον πραγματικό τους πληθυσμό κατά 35% περίπου μεγαλύτερο σε σχέση με την επίσημη απογραφή. Σημειώνεται ότι σε ορισμένους παραθαλάσσιους Δήμους, η αυξημένη τουριστική ανάπτυξη κατά την περίοδο του καλοκαιριού, οδηγεί σε σημαντική αύξηση του πραγματικού πληθυσμού. Στην περίπτωση, για παράδειγμα, του Δήμου Αγίου Γεωργίου, ο πραγματικός θερινός πληθυσμός μπορεί να αυξηθεί περισσότερο από 500% (40.000 κάτοικοι έναντι των 6.500 του απογεγραμμένου).

3. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΣΤΙΚΩΝ ΣΤΕΡΕΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

Στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται η Μέση Ετήσια Παραγωγή (Μ.Ε.Π.) Α.Σ.Α. (κιλά/άτομο/έτος) με βάση την απογραφή του έτους 2001 για 30 Δήμους του νομού (λείπουν οι Δήμοι Αμπελοκήπων, Λαχανά και Ωραιοκάστρου, οι οποίοι συμμετείχαν μεν στην έρευνα, αλλά δεν διέθεταν στοιχεία), σύμφωνα με: (α) την παρούσα έρευνα (πορτοκαλί χρώμα) και

(β) τα ζυγολόγια του Σ.ΟΤΑ.Ν.Θ. (2009). Στην προκειμένη περίπτωση, ως Α.Σ.Α. θεωρήθηκαν τα στερεά απόβλητα που προέρχονται από την ανθρώπινη δραστηριότητα, παράγονται στους χώρους διαβίωσης, εργασίας, ψυχαγωγίας και γενικότερα, στους χώρους αστικού περιβάλλοντος, όπως αναφέρονται στα παραρτήματα του άρθρου 17 της Κ.Υ.Α 50910/2727/22-10-2003, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη τα απορρίμματα εκσκαφών, κατασκευών και κατεδαφίσεων (Α.Ε.Κ.Κ.).



Σχήμα 2: Μέση Ετήσια Παραγωγή Α.Σ.Α. για το έτος 2009 (κιά/κάτοικο/έτος) για 30 Δήμους του νομού Θεσσαλονίκης σύμφωνα με την έρευνα (πορτοκαλί χρώμα) και τα ζυγολόγια του Σ.ΟΤΑ.Ν.Θ. (μπλέ χρώμα).

Όπως διαπιστώνεται από το Σχήμα 2 η Μέση Ετήσια Παραγωγή Α.Σ.Α. με βάση την απογραφή του έτους 2001 ανέρχεται σύμφωνα με την παρούσα έρευνα σε 519,7 κιά/κάτοικο/έτος, ενώ με βάση τα ζυγολόγια του Σ.ΟΤΑ.Ν.Θ. σε 505,3 κιά/άτομο/έτος. Σημειώνεται ότι στην Ε.Ε. των 27 Κρατών Μελών με έτος αναφοράς το 2006 η Μ.Ε.Π. ανέρχεται σε 517 κιά/άτομο/έτος (OECD, 2006), ενώ στην Ελλάδα έμμεσα προκύπτει ότι ανέρχεται σε 416,5 κιά/άτομο/έτος με βάση τα στοιχεία του έτους 2001. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με την Κ.Υ.Α. 50910/2727/22-12-2003 η μέση ημερήσια παραγωγή Α.Σ.Α. ανά κάτοικο ανέρχεται σε 1,14 κιά/ημέρα, οπότε με αναγωγή προκύπτει ότι η Μ.Ε.Π. ανέρχεται σε 416,5 (=1,14x365) κιά/άτομο/έτος. Από την ιστοσελίδα του Υ.Π.Ε.Κ.Α. (<http://www.minenv.gr/anakyklosi/general/general.html>) προκύπτει ότι η μέση ετήσια παραγωγή Α.Σ.Α. στην Ελλάδα ανέρχεται σε 480κιά/κάτοικο δηλαδή 1,32 κιά/άτομο/ημέρα. Επίσης, από το Σχήμα 2 διαπιστώνεται ότι ο Νομός Θεσσαλονίκης χαρακτηρίζεται από μία έντονα ανομοιόμορφη κατανομή παραγωγής Α.Σ.Α. με αρκετούς Δήμους να εμφανίζουν διπλάσια ή και τριπλάσια μέση ετήσια παραγωγή Α.Σ.Α. σε σχέση με

άλλους Δήμους. Ομοίως, διαπιστώνεται ότι 13 Δήμοι έχουν παραγωγή Α.Σ.Α. μεγαλύτερη από το μέσο όρο του νομού, αλλά και το μέσο όρο σε επίπεδο χώρας και Ε.Ε. των 27 Κρατών Μελών.

Από την έρευνα διαπιστώθηκαν σημαντικές διαφορές στα δεδομένα παραγωγής Α.Σ.Α. για τους 14 από τους 30 Δήμους των στοιχείων που δίνουν οι Δήμοι σε σχέση με αυτά που προκύπτουν από τα ζυγολόγια του Σ.ΟΤΑ.Ν.Θ. (Γιαννόπουλος κ.α., 2010). Οι διαφορές αυτές θα πρέπει να οφείλονται στην εμπειρική προσέγγιση που κάνουν οι Ο.Τ.Α. για τα Α.Σ.Α. που παράγουν, εφόσον δεν τηρούν ζυγολόγια ανά είδος παραγομένου στερεού απορρίμματος (ογκώδη, αδρανή, επαγγελματικά – βιομηχανικά) και το ίδιο ακριβώς συμβαίνει με τα διαθέσιμα ζυγολόγια του Σ.ΟΤΑ.Ν.Θ. Πάντως, σε κάθε περίπτωση αποδεικνύεται η ανάγκη εφαρμογής ενός αξιόπιστου συστήματος καταγραφής και ταξινόμησης των παραγόμενων στερεών αποβλήτων, και όχι μόνο αυτών που διαχειρίζονται οι Ο.Τ.Α. ή αυτών που διατίθενται στο Χ.Υ.Τ.Α. Η βάση δεδομένων θα πρέπει να συνδέεται και να έχει αναφορές στο σύστημα περιβαλλοντικής αδειοδότησης και ελέγχου όλων των δραστηριοτήτων του δημόσιου και του ιδιωτικού τομέα.

Στον Πίνακα 2 δίνεται η Μοναδιαία Παραγωγή Απορριμμάτων για έξι από τους Δήμους του νομού, που συμμετείχαν στην έρευνα, με δυναμικά πληθυσμιακά χαρακτηριστικά. Οι τιμές που δίνονται στον Πίνακα 2 είναι σημαντικά μεγαλύτερες από την τιμή 0,8 κιλά/κάτοικο/ημέρα που προτείνεται στη βιβλιογραφία ως παράμετρος σχεδιασμού συστημάτων διαχείρισης Α.Σ.Α. και δεικνύουν ως καταλληλότερη τιμή αυτή του 1,2 κιλά/κάτοικο/ημέρα. Σύμφωνα με τον Παναγιωτακόπουλο (2002), η τιμή Μοναδιαίας Παραγωγής Απορριμμάτων ίση με 0,8 κιλά/κάτοικο/ημέρα προέκυψε από δειγματοληπτικές έρευνες που έλαβαν χώρα στην Αττική και είναι ενδεικτική των δεδομένων των ελληνικών πόλεων κατά την περασμένη δεκαετία. Επίσης, διαπιστώνεται ότι στους 4 από τους 6 Δήμους, η Μοναδιαία Παραγωγή Απορριμμάτων είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από τη μέση τιμή 1,32 κιλά/άτομο/έτος σε επίπεδο χώρας σύμφωνα με το Υ.Π.Ε.Κ.Α. (<http://www.minenv.gr/anakyklosi/general/general.html>). Οι παρατηρήσεις αυτές υπογραμμίζουν τη σπουδαιότητα της καταγραφής της υφιστάμενης κατάστασης παραγωγής Α.Σ.Α. ξεχωριστά για κάθε Δήμο και της συλλογής αξιόπιστων δεδομένων τα οποία να μπορούν να οδηγήσουν στον ακριβέστερο δυνατό σχεδιασμό συστημάτων διαχείρισης Α.Σ.Α.

Πίνακας 2: Μοναδιαία Παραγωγή Απορριμμάτων (κιλά/άτομο/ημέρα) στα μεγάλα αστικά κέντρα του Ν. Θεσσαλονίκης (έτος αναφοράς 2009).

Δήμος	Μ.Π.Α. (κιλά/άτομο/ημέρα)
Ωραικάστρου	2,0
Θέρμης	1,9
Πυλαίας	1,6
Μενεμένης	1,6
Θεσσαλονίκης	1,2
Καλαμαριάς	0,9

4. ΠΡΟΣΩΡΙΝΗ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΑΣΤΙΚΩΝ ΣΤΕΡΕΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

Στα πλαίσια της έρευνας, οι Δήμοι του νομού Θεσσαλονίκης προσκλήθηκαν να περιγράψουν το είδος και το πλήθος των διαθέσιμων μέσων προσωρινής αποθήκευσης (Μ.Π.Α.), καθώς και τους χώρους τοποθέτησης των μέσων αυτών. Συνολικά, σε 32 Δήμους του νομού (δεν έδωσε στοιχεία ο Δήμος Μηχανιώνας), είναι εγκατεστημένοι λίγο

περισσότεροι από 55.000 κάδοι με συνολική ονομαστική χωρητικότητα περίπου 45×10^6 λίτρα. Ανάλογα με το υλικό (μεταλλικό ή πλαστικό) ή τη μέθοδο μεταφοράς ενός περιέκτη (σταθερός, τροχήλατος, απορριμματοκιβώτιο-container), στο νομό Θεσσαλονίκης χρησιμοποιούνται 9 διαφορετικά είδη κάδων, τα οποία χαρακτηρίζονται από διαφορετικές ονομαστικές χωρητικότητες. Χρησιμοποιούνται, κυρίως, μεταλλικοί και πλαστικοί τροχήλατοι κάδοι χωρητικότητας που κυμαίνεται από 120 έως 1.100 λίτρα, με την πλειοψηφία (~78%) των Δήμων να επιλέγει κάδους μεγάλης χωρητικότητας δηλαδή των 1.100 λίτρων.

Τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν ότι οι Δήμοι του πολεοδομικού συγκροτήματος Θεσσαλονίκης, χαρακτηρίζονται από μικρή αναλογία διαθέσιμου όγκου κάδων ανά κάτοικο, η οποία κυμαίνεται από 11,7 έως 32,5 λίτρα/κάτοικο. Το γεγονός αυτό αποδίδεται προφανώς στην υψηλή πληθυσμιακή πυκνότητα των Δήμων του πολεοδομικού συγκροτήματος, η οποία δεν επιτρέπει τη χωροταξική κάλυψη του Δήμου με ακόμα μεγαλύτερο πλήθος περιεκτών.

Όσον αφορά στη χωροθέτηση των Μ.Π.Α. διαπιστώθηκε ότι αυτή διαφέρει από Δήμο σε Δήμο, καθώς επηρεάζεται σε σημαντικό βαθμό από τα πολεοδομικά χαρακτηριστικά του Δήμου, όπως είναι ο τύπος και η μορφή των κτιρίων, των πεζοδρομίων, των δρόμων, κ.λπ. Στην πλειοψηφία των Δήμων του νομού, η τοποθέτηση των κάδων προσωρινής αποθήκευσης των Α.Σ.Α. γίνεται σε ειδικές αποτμήσεις επί των πεζοδρομίων (72,7%), καθώς και σε ελεύθερους κοινόχρηστους χώρους (69,7%). Το ένα τρίτο, περίπου, των Δήμων καταφεύγει στην κατασκευή ειδικών πλαισίων ακινητοποίησης των κάδων επί του οδοστρώματος (36,4%), ενώ μόλις 5 Δήμοι έχουν τοποθετήσει τα Μ.Π.Α. σε ειδικούς χώρους περιορισμένης πρόσβασης.

5. ΣΥΛΛΟΓΗ ΑΣΤΙΚΩΝ ΣΤΕΡΕΩΝ ΑΠΟΒΑΗΤΩΝ

Μετά την προσωρινή αποθήκευση των Α.Σ.Α., σε κάδους και σε απορριμματοκιβώτια (containers), ακολουθεί η συλλογή και η μεταφορά τους σε χώρους επεξεργασίας-αξιοποίησης και τελικής διάθεσης. Σημαντικό παράγοντα βελτιστοποίησης, προς αυτή την κατεύθυνση, αποτελεί η συχνότητα αποκομιδής των απορριμμάτων. Γενικά, η συχνότητα αποκομιδής έγκειται στην εκάστοτε πολιτική των Δήμων, η οποία εξαρτάται από το μέγεθος του οικισμού, την πυκνότητα δόμησης και το βιοτικό επίπεδο των κατοίκων.

Από την έρευνα διαπιστώθηκε η υιοθέτηση διαφορετικών πολιτικών αποκομιδής των Α.Σ.Α. από τους Δήμους του νομού. Συγκεκριμένα, η συχνότητα συλλογής κυμαίνεται από 2 έως 7 φορές την εβδομάδα, ανάλογα με την περιοχή όπου γίνεται η συλλογή και την πολιτική που υιοθετεί ο κάθε Δήμος. Στα μεγάλα αστικά κέντρα του νομού η αποκομιδή των Α.Σ.Α. είναι καθημερινή σε ποσοστό 100% (Δήμοι εντός και περιφερειακά του πολεοδομικού ιστού της Θεσσαλονίκης), ενώ μόλις σ' ένα Δήμο (Καλλινδοίων) η συλλογή των Α.Σ.Α. λαμβάνει χώρα μόνο μία φορά την εβδομάδα. Κοινή πρακτική για τους Δήμους με απομακρυσμένους οικισμούς και μέση - μικρή πληθυσμιακή πυκνότητα αποτελεί η συλλογή των Α.Σ.Α. 2-3 φορές την εβδομάδα (Δήμοι Βασιλικών, Ελευθερίου-Κορδελιού, Θέρμης, Καλλιθέας, Κουφαλίων, Μαδύτου, Σοχού, Χαλκηδόνας) σε ποσοστό από 10 έως και 100%, ενώ σε δύο Δήμους (Αγίου Αθανασίου και Απολλωνίας) καθημερινά εκκενώνονται σχεδόν οι μισοί κάδοι λόγω της έλλειψης εξοπλισμού και προσωπικού. Γενικά, μεγάλη συχνότητα αποκομιδής των Α.Σ.Α. δεν είναι πάντοτε ενδεικτικό γνώρισμα υψηλής στάθμης προσφερόμενων υπηρεσιών. Σημειώνεται ότι στη σημερινή εποχή η τάση είναι να ελαχιστοποιείται, κατά το δυνατόν, η συχνότητα αποκομιδής.

Από την έρευνα διαπιστώθηκε, επίσης, ότι η αποκομιδή των Α.Σ.Α., σε απομακρυσμένα Δημοτικά Διαμερίσματα (Δ.Δ.) ενός Δήμου, πραγματοποιείται συνήθως 1 με 2 φορές την εβδομάδα, ενώ Οικισμοί και Δ.Δ. που βρίσκονται σε σχετικά μικρή απόσταση από το αστικό κέντρο ενός Δήμου εξυπηρετούνται 2-3 φορές την εβδομάδα. Χαρακτηριστικά

αναφέρεται το παράδειγμα του Δήμου Θέρμης, όπου τα Α.Σ.Α. του Δημοτικού Διαμερίσματος Θέρμης συλλέγονται καθημερινά, ενώ των Δημοτικών Διαμερισμάτων Τριαδίου, Νέας Ραιδεστού, Ταγαράδων, Νέου Ρυσίου, αλλά και των εργοστασίων της περιοχής συλλέγονται 2-3 φορές την εβδομάδα.

Η συλλογή και η διαχείριση των ογκωδών και των αδρανών - μάζων αποτελεί δυσεπίλυτο πρόβλημα σε πολλούς Δήμους του νομού, αλλά και σε ολόκληρη την Ελλάδα. Το πρόβλημα της αποκομιδής ογκωδών και αδρανών απορριμμάτων, που παρατηρείται στην πλειοψηφία των Δήμων του νομού, μεγαλώνει συνεχώς, μετά την έναρξη λειτουργίας των Χ.Υ.Τ.Α., όπου για διαφορετικούς λόγους δεν επιτρέπεται η παραλαβή – διάθεση των αποβλήτων αυτών. Αποτέλεσμα της κατάστασης αυτής είναι η δημιουργία μικρών «χωματερών» στα πεζοδρόμια από ογκώδη αντικείμενα που απορρίπτουν οι πολίτες και τα οποία είναι δύσκολο για τους Δήμους να τα συλλέξουν.

Σε αντιδιαστολή με τα μάζα, τα ογκώδη απορρίμματα (π.χ. έπιπλα) συλλέγονται από τους περισσότερους Δήμους (σε ποσοστό 62,5%) με ειδικά οχήματα και εξειδικευμένο εργατικό δυναμικό, κατόπιν τηλεφωνικής επικοινωνίας με την υπηρεσία καθαριότητας του Δήμου και σύμφωνα με αυτά που ορίζονται στον Κανονισμό Καθαριότητας καθενός από αυτούς. Σε ορισμένους Δήμους του νομού, οι δημότες καταβάλλουν ειδικό τέλος ανά ογκώδες αντικείμενο που αποκομίζεται, το ύψος του οποίου καθορίζεται κατ' έτος με σχετικές αποφάσεις του Δημοτικού Συμβουλίου κατά τα οριζόμενα στον Κώδικα Δήμων και Κοινοτήτων (Ν. 3463/2006).

Η διάθεση των ογκωδών απορριμμάτων στο Χ.Υ.Τ.Α. Μαυροράχης προϋποθέτει την κατάλληλη επεξεργασία και θρυμματισμό τους, καθώς ο Χ.Υ.Τ.Α. δεν διαθέτει ακόμα τις κατάλληλες υποδομές για το σκοπό αυτό (π.χ. τεμαχιστής-σπαστήρας). Επομένως, ο Σ.Ο.Τ.Α.Ν.Θ. και οι Ο.Τ.Α. που ενδιαφέρονται θα πρέπει, είτε να προμηθευτούν κατάλληλο για το σκοπό αυτό εξοπλισμό, είτε να αναθέσουν τη διαχείριση των υλικών αυτών σε ιδιώτες με σημαντικό, ωστόσο, για το Δήμο κόστος. Μέχρι σήμερα, δεν είναι πλήρως καταγεγραμμένο και αδειοδοτημένο το σχέδιο διαχείρισης ογκωδών και οικοδομικών απορριμμάτων των Ο.Τ.Α. Οι Ο.Τ.Α. και ο Σ.Ο.Τ.Α.Ν.Θ. έχουν την αποκλειστική ευθύνη εξεύρεσης λύσεως για την προσωρινή αποθήκευση των παραπάνω υλικών.

Ο Χ.Υ.Τ.Α. Μαυροράχης είναι το πρώτο έργο του Περιφερειακού Σχεδιασμού Διαχείρισης Απορριμμάτων που υλοποιήθηκε και λειτουργεί στο Νομό Θεσσαλονίκης, αν εξαιρέσουμε τη Μονάδα Ανακύκλωσης Θέρμης καθώς και τα έργα (Σ.Μ.Α.) που προϋπήρχαν της έγκρισης του Σχεδιασμού. Ωστόσο, η μη παράλληλη λειτουργία και άλλων συνοδευτικών-υποστηρικτικών έργων απαξιώνει τη λειτουργία του Χ.Υ.Τ.Α. αυτού και υπάρχει κίνδυνος, είτε να μειωθεί υπερβολικά ο προσδόκιμος χρόνος λειτουργίας του, είτε να μην τηρείται πλήρως το πρωτόκολλο παραλαβής απορριμμάτων.

Η σημαντικότερη καθυστέρηση που καταγράφεται σήμερα στη διαχείριση των ογκωδών αποβλήτων και των Αποβλήτων Εκσκαφών, Κατασκευών και Κατεδαφίσεων (Α.Ε.Κ.Κ.) καθιστά σκόπιμη, εκτός των άλλων προγραμματιζόμενων έργων, και την άμεση προμήθεια σπαστήρων – μονάδων επεξεργασίας, με τη βοήθεια των οποίων θα μπορούσε να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της διάθεσης των παραπάνω υλικών, αλλά και του κόστους διαχείρισης από την πλευρά των Δήμων. Μέχρι τη λειτουργία αντίστοιχων υποδομών σε δημοτικό ή διαδημοτικό ή νομαρχιακό επίπεδο θεωρείται απαραίτητο οι Ο.Τ.Α. ή ο Σ.Ο.Τ.Α.Ν.Θ. να συνεργάζονται με αδειοδοτημένες επιχειρήσεις και σε καμία περίπτωση να μην διαθέτουν ή να μην αποθηκεύουν ανεπεξέργαστα αυτά τα απόβλητα.

6. ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΑΣΤΙΚΩΝ ΣΤΕΡΕΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

Στο σύνολο των 33 Δήμων που συμμετείχαν στην έρευνα, μόλις το 24% δήλωσε ότι εξυπηρετείται από Σταθμό Μεταφόρτωσης Απορριμμάτων (Σ.Μ.Α.).

Από τα στοιχεία της έρευνας προέκυψε ότι τα απορριμματοφόρα των Δήμων διανύουν καθημερινά απόσταση 17.000 περίπου χλμ. για τη μεταφορά των Α.Σ.Α. από τους κάδους προσωρινής αποθήκευσης έως τον ΧΥΤΑ Μαυροράχης. Από αυτά τα 4.000 χλμ. περίπου αντιστοιχούν σε δρομολόγια των απορριμματοφόρων του Δήμου Θεσσαλονίκης. Εκτιμάται ότι, αν δεν λειτουργούσε ο Σ.Μ.Α. του Δήμου Θεσσαλονίκης, θα έπρεπε τα απορριμματοφόρα των Δήμων να διανύουν επιπλέον απόσταση 4.000 χλμ. σε καθημερινή βάση. Διαπιστώθηκε, επίσης, ότι σημαντικά μεγάλες αποστάσεις διανύουν τα απορριμματοφόρα Δήμων του νομού με μεγάλο πληθυσμό που βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση από τον Χ.Υ.Τ.Α. Μαυροράχης, όπως είναι οι Δήμοι Καλαμαριάς και Θερμαϊκού, οι οποίοι δεν εξυπηρετούνται από Σ.Μ.Α. Με βάση το πλήθος των δρομολογίων και των αποστάσεων που διανύουν τα απορριμματοφόρα των Δήμων αυτών, αλλά των γνωστών προβλημάτων στη λειτουργία των υπηρεσιών καθαριότητας των Ο.Τ.Α. μετά την έναρξη λειτουργίας του Χ.Υ.Τ.Α. Μαυροράχης, συνάγεται υπάρχει μεγάλη ανάγκη για το νομό η κατασκευή και η λειτουργία του Σ.Μ.Α. ΒΔ Τομέα για το βορειοδυτικό Πολεοδομικό Συγκρότημα Θεσσαλονίκης. Η εξυπηρέτηση Δήμων του νομού στο νέο Σ.Μ.Α. αναμένεται να ευνοήσει, επίσης, και τους Ο.Τ.Α. της Ανατολικής Θεσσαλονίκης με σημαντικό πληθυσμό και μεγάλη παραγωγή Α.Σ.Α. (Καλαμαριά, Πυλαία, Θερμαϊκός, Θέρμη). Συγκεκριμένα, η μεταφορά μέρους των Α.Σ.Α. του Δήμου Θεσσαλονίκης στο Σ.Μ.Α. ΒΔ Τομέα αναμένεται να αυξήσει τη διαθέσιμη δυναμικότητα του υπάρχοντος Σ.Μ.Α., προσφέροντας κατά τον τρόπο αυτό τη δυνατότητα μεταφόρτωσης ενός σημαντικού ποσοστού των απορριμμάτων των Δήμων της Ανατολικής Θεσσαλονίκης στο Σ.Μ.Α. του Δήμου Θεσσαλονίκης.

7. ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΥΛΙΚΩΝ – ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ

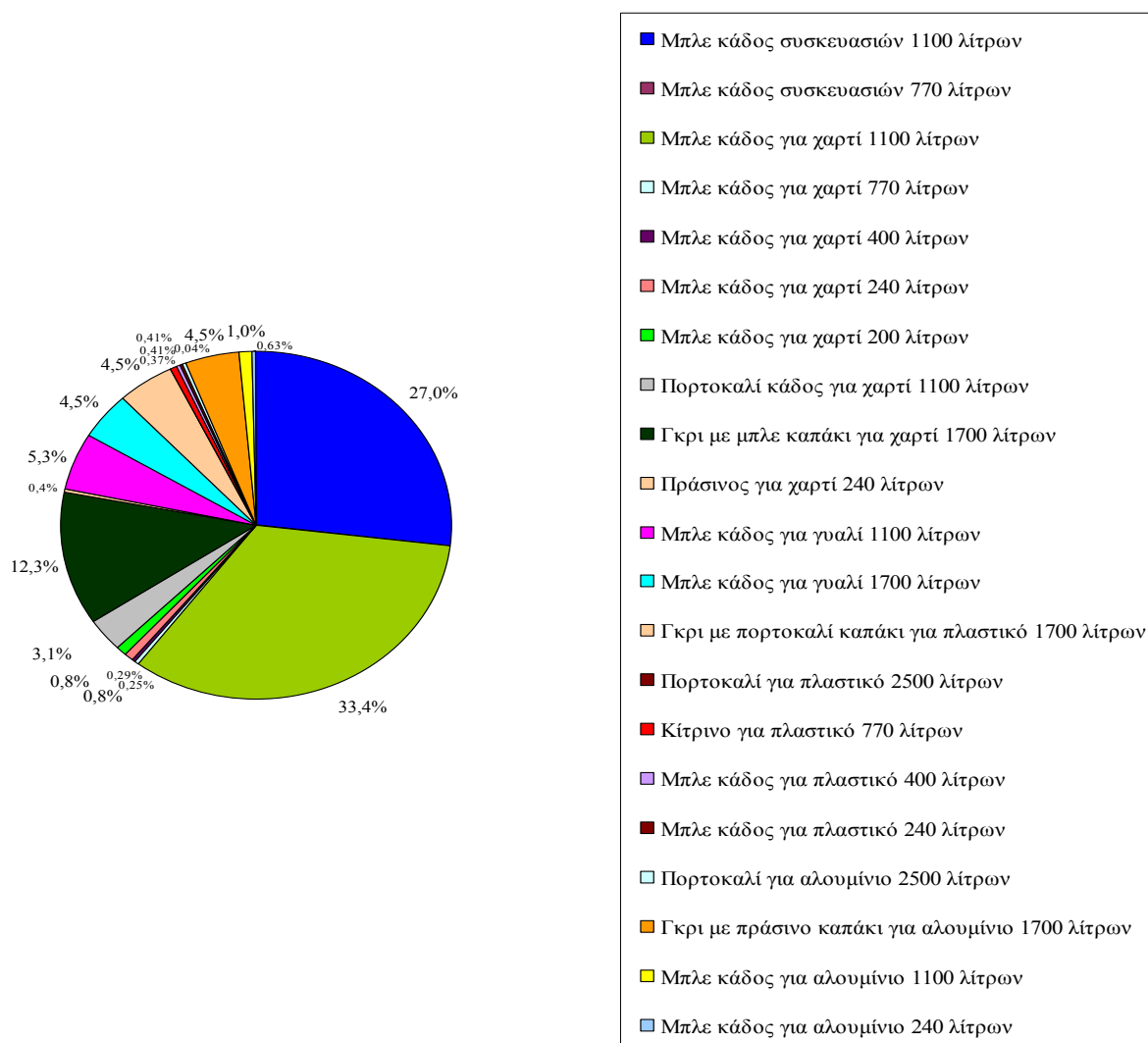
Στο Νομό Θεσσαλονίκης, οι δράσεις ανακύκλωσης, όπως και η διαχείριση των Α.Σ.Α. πραγματοποιούνται από τους Ο.Τ.Α., οι οποίοι για το σκοπό αυτό συνεργάζονται με την Ελληνική Εταιρεία Αξιοποίησης Ανακύκλωσης Α.Ε. (Ε.Ε.Α.Α.), είτε μέσω του Σ.ΟΤΑ.Ν.Θ. (ποσοστό 67% των συμμετεχόντων Δήμων με πληθυσμό 700.000 κατοίκων περίπου), είτε με απευθείας συνεργασία μαζί της (ποσοστό 33% των συμμετεχόντων Δήμων με πληθυσμό 350.000 κατοίκων περίπου).

Οι Δήμοι που έχουν απευθείας συνεργασία με την Ε.Ε.Α.Α. χρησιμοποιούν μόνο ένα είδος κάδου (μπλε, πλαστικός των 1100 λίτρων), στον οποίο αποθηκεύονται προσωρινά οι συσκευασίες κάθε είδους υλικού, που στη συνέχεια οδηγούνται για αξιοποίηση. Στους Δήμους που συνεργάζονται μέσω του Σ.ΟΤΑ.Ν.Θ. με την Ε.Ε.Α.Α., τα μέσα προσωρινής αποθήκευσης των υλικών προς ανακύκλωση παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλομορφία, τόσο ως προς το υλικό, όσο και ως προς το χρώμα, τον όγκο και το υλικό του κάδου. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται 21 διαφορετικά είδη κάδων ανακύκλωσης (Σχήμα 3).

Οι Δήμοι που συνεργάζονται απευθείας με την Ε.Ε.Α.Α. παρουσιάζουν καλύτερη οργάνωση για την εξυπηρέτηση των δημοτών τους, σε σχέση με τους Δήμους που συνεργάζονται με τον Σ.ΟΤΑ.Ν.Θ., όχι μόνο στη χωρητικότητα των κάδων ανακύκλωσης, αλλά και στη συχνότητα αποκομιδής των ανακυκλούμενων υλικών. Συγκεκριμένα, οι Δήμοι αυτοί (Επανομής, Θερμαϊκού, Θέρμης, Καλαμαριάς, Καλλιθέας, Λαγκαδά, Μηχανιώνας, Πεύκων και Πυλαίας) αποκομίζουν τα υλικά ανακύκλωσης, είτε καθημερινά, είτε κάθε δεύτερη μέρα, συχνότητα που κρίνεται ιδιαίτερα ικανοποιητική. Σημειώνεται ότι η συχνότητα αποκομιδής των περισσοτέρων Δήμων που συνεργάζονται με τον Σ.ΟΤΑ.Ν.Θ. είναι κάθε τρίτη μέρα, ενώ Δήμος Κορώνειας πραγματοποιεί εβδομαδιαία αποκομιδή και ο Δήμος Χαλάστρας μια φορά το μήνα.

Ο Σ.ΟΤΑ.Ν.Θ. διαχειρίζεται το Κέντρο Διαλογής Ανακυκλώσιμων Υλικών (Κ.Δ.Α.Υ.) Ταγαράδων, ενώ η Ε.Ε.Α.Α. χρηματοδότησε και κατασκεύασε στη Θέρμη το Κ.Δ.Α.Υ. Θέρμης, που εξυπηρετεί τους Δήμους που έχουν απευθείας συνεργασία μαζί της. Σύμφωνα με

τα επίσημα στοιχεία, το σύνολο των εισερχομένων υλικών στα δύο Κ.Δ.Α.Υ. για το έτος 2008 ανήλθε σε 19.000 τόνους. Από την ποσότητα αυτή ποσοστό 65% (12.000 τόνοι περίπου) αφορά υλικά προς ανακύκλωση που οδηγούνται στο Κ.Δ.Α.Υ. Θέρμης και ποσοστό 35% υλικά που συλλέγει ο Σ.Ο.Τ.Α.Ν.Θ. και οδηγεί στο Κ.Δ.Α.Υ. Ταγαράδων. Η διαφορά απόδοσης ανάμεσα στις δύο περιπτώσεις γίνεται πιο διακριτή, αν ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι ο πληθυσμός που εξυπηρετεί το Κ.Δ.Α.Υ. Θέρμης είναι σχεδόν ο μισός από τον αντίστοιχο που εξυπηρετεί το Κ.Δ.Α.Υ. Ταγαράδων.



Σχήμα 3: Είδη κάδων ανακύκλωσης που χρησιμοποιούν οι Δήμοι του Ν. Θεσσαλονίκης που υλοποιούν δράσεις ανακύκλωσης σε συνεργασία με τον Σ.Ο.Τ.Α.Ν.Θ.

Αναφορικά με την ποσότητα των ανακυκλούμενων υλικών που συλλέγεται ανά κάτοικο, με βάση το έτος 2008 διαπιστώθηκε ότι οι Δήμοι με απευθείας συνεργασία με την Ε.Ε.Α.Α. παρουσιάζουν ικανοποιητικά αποτελέσματα, που προσεγγίζουν τα αντίστοιχα ευρωπαϊκών χωρών. Ανάμεσα στους Δήμους αυτούς, σημειώνεται ότι ο Δήμος Θέρμης υπερέχει σημαντικά των υπολοίπων Δήμων με 65 κιλά/κάτοικο/έτος.

Σχετικά με τα αξιοποιήσιμα υλικά από τις δράσεις ανακύκλωσης διαπιστώνεται μια σημαντική απόδοση στη συλλογή και στην ανακύκλωση χαρτιού, ενώ η απόδοση στα άλλα υλικά συσκευασιών (πλαστικό, γυαλί, μέταλλο) χαρακτηρίζεται από μέτρια έως μηδαμινή. Στον τομέα αυτό υποχρεωτική θεωρείται η ανάπτυξη στοχευμένων δράσεων σε ειδικά υλικά

ανακύκλωσης με στόχο τους μεγάλους παραγωγούς, παράλληλα με ενιαία εκστρατεία δημοσιοποίησης και διαφήμισης σε επίπεδο νομού.

Όσον αφορά στις συμβάσεις που έχουν συνάψει οι Δήμοι για τη διαχείριση των ειδικών αποβλήτων, προέκυψε ότι από τους 33 Δήμους που συμμετείχαν στην έρευνα, οι 24 έχουν συνεργασία για τη διαχείριση των ηλεκτρικών συσκευών (Α.Η.Η.Ε.), οι 23 για τις ηλεκτρικές στήλες/μπαταρίες, οι 17 για τα χρησιμοποιημένα ορυκτέλαια, οι 13 για τη διαχείριση των ελαστικών και οχημάτων και οι 5 για τους συσσωρευτές. Μόνο οι Δήμοι Θεσσαλονίκης, Καλαμαριάς και Ωραιοκάστρου διαπιστώθηκε ότι συνεργάζονται και για τις πέντε κατηγορίες αποβλήτων. Σημειώνεται, όμως, ότι ενώ ζητήθηκαν στην έρευνα και τα στοιχεία των συμβάσεων σε ορισμένες περιπτώσεις δεν δόθηκαν. Συνάγεται, λοιπόν, ότι είναι απόλυτη ανάγκη να προσπαθήσουν οι Ο.Τ.Α. να εξαντλήσουν τις δυνατότητες εκμετάλλευσης των Συλλογικών Συστημάτων Εναλλακτικής Διαχείρισης (Σ.Σ.Ε.Δ.) με το μικρότερο δυνατό κόστος για τους Ο.Τ.Α. προς όφελος των πολιτών.

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Η διαχείριση των απορριμμάτων δεν αποτελεί μόνο αντικείμενο μιας τεχνικής διαδικασίας αλλά απαιτεί συνολική και ολοκληρωμένη αντιμετώπιση του προβλήματος. Η Τοπική Αυτοδιοίκηση στο νομό Θεσσαλονίκης οφείλει να προσαρμόσει την πολιτική της στις νέες μεθόδους διαχείρισης, να τηρήσει τις υποχρεώσεις που απορρέουν από την εφαρμογή της νομοθεσίας, να αναπτύξει συνεργασίες και να αναλάβει ενεργό ρόλο στην ενημέρωση και ευαισθητοποίηση των πολιτών.

Σε επίπεδο νομού και ευρύτερα σε επίπεδο Περιφέρειας υπάρχει δυνατότητα, αλλά και αναγκαιότητα, τυποποίησης των συστημάτων και των μέσων αποκομιδής, αλλά και σαφούς προσδιορισμού των ρευμάτων ανακύκλωσης και του είδους της “διαλογής στην πηγή” που θα εφαρμοστεί. Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους οι Ο.Τ.Α. μπορούν και πρέπει να αναπτύξουν ειδικές και προσαρμοσμένες δράσεις, όπως είναι η ανακύκλωση και η εναλλακτική διαχείριση των ζυμώσιμων υλικών με δράσεις οικιακής κομποστοποίησης, αλλά και ευρύτερες δράσεις, όπως είναι τα σχέδια απορρύπανσης προστατευόμενων περιοχών, ακτών και ρεμάτων, μόνιμου και περιοδικού καθαρισμού ακτών, διαχείρισης λιμενικών αποβλήτων από αλιευτικά καταφύγια και τουριστικές μαρίνες, ειδικά διαχειριστικά σχέδια για γεωργικά – κτηνοτροφικά και απόβλητα κήπων και γενικά, για τις κατηγορίες ειδικών στερεών αποβλήτων με σημαντική παραγωγή στον κάθε Ο.Τ.Α.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η πρόταση δημιουργίας και χωροθέτησης «πάρκων ανακύκλωσης» και κέντρων συλλογής ειδικών στερεών αποβλήτων. Πρέπει να γίνει κατανοητό από τους Ο.Τ.Α., όλων των μεγεθών, ότι πρέπει να επενδύσουν σε ανθρώπινο επιστημονικό δυναμικό και σε τεχνογνωσία για να πετύχουν απόδοση, οικονομία και ποιότητα στις υπηρεσίες τους. Σημειώνεται ιδιαίτερα η ανάγκη αξιοποίησης της δημοτικής αστυνομίας για τον έλεγχο εφαρμογής του Κανονισμού Καθαριότητας. Στο πλαίσιο των νέων αναγκών των Ο.Τ.Α. περιλαμβάνεται και η εφαρμογή δράσεων δημοσιοποίησης και συνεχούς πληροφόρησης των πολιτών με στόχο την υποστήριξη του σχεδίου διαχείρισης στερεών αποβλήτων. Στην κατεύθυνση αυτή η δημιουργία τοπικών πυρήνων (π.χ. σχολεία) θα έχει να επιδείξει υψηλή αποτελεσματικότητα.

Για το λόγο αυτό ιδιαίτερη σημασία αποκτά για τους Ο.Τ.Α. του νομού Θεσσαλονίκης η αποτελεσματική λειτουργία, τόσο του υφιστάμενου νομαρχιακού Φο.Δ.Σ.Α., όσο και του μελλοντικού ενιαίου περιφερειακού Φο.Δ.Σ.Α., που θα αναλάβει όλες τις υπερτοπικές λειτουργίες στη διαχείριση των απορριμμάτων. Χωρίς να θίγεται η αυτονομία στη λειτουργία του κάθε Δήμου και με ενεργό ρόλο των Ο.Τ.Α. ο περιφερειακός Σύνδεσμος μπορεί να αξιοποιήσει τη νέα εποχή και μετά από αναγνώριση των τοπικών αναγκών να λειτουργήσει ως πόλος τεχνογνωσίας και καινοτομίας στη διαχείριση των απορριμμάτων. Το μέγεθος των

διευρυμένων αρμοδιοτήτων των Φο.Δ.Σ.Α. τους δίνει την δυνατότητα δημιουργίας περαιτέρω standards (π.χ. τυποποίηση εξοπλισμού διαχείρισης στερεών απορριμμάτων κ.λπ.) και όχι κάθε Δήμος να προμηθεύεται χωρίς σχεδιασμό και χωρίς συμβατότητα ορισμένες φορές με τα standards (ELOT-EN) στη διαχείριση των στερεών απορριμμάτων.

Η συνέργεια των ανωτέρω δράσεων με την προώθηση των έργων επεξεργασίας των στερεών αποβλήτων στη Π.Ε. Θεσσαλονίκης και γενικότερα, στην Περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας, σε συνδυασμό με τη διεύρυνση των διαχειριζόμενων στερεών αποβλήτων από τον ενιαίο Σύνδεσμο σε όλα τα είδη αυτών, και όχι μόνο στα οικιακά, θα αποδώσουν άμεσα σημαντική προστιθέμενη αξία σε όλες τις περιβαλλοντικές δράσεις, στην προστασία του περιβάλλοντος και στη βελτίωση της ποιότητας ζωής σε ολόκληρη την Περιφέρεια.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς ευχαριστούν το Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας – Τμήμα Κεντρικής Μακεδονίας για την τεχνική και υλική υποστήριξη της έρευνας που πραγματοποιήθηκε και τους αρμόδιους για θέματα διαχείρισης Α.Σ.Α. των Ο.Τ.Α. του νομού για την ευγενική ανταπόκριση και την αγαστή συνεργασία τους, ελπίζουν δε ότι τα αποτελέσματα της έρευνας θα βοηθήσουν τους αρμόδιους φορείς στον καλύτερο σχεδιασμό της διαχείρισης των Α.Σ.Α. του νομού.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Γιαννόπουλος, Σ., Δημούδη, Ε. και Πλάκας, Κ. 2010. *Διαχείριση των Αστικών Στερεών Αποβλήτων στο Νομό Θεσσαλονίκης*. ΤΕΕ/TKM. Available to: http://www.tkmactions.tee.gr/sections/6_Omades_Ergasias/5_Periballontos/28.pdf.
- Κ.Υ.Α. (Κοινή Υπουργική Απόφαση) Η.Π. 50910/2727/16-12-2003 *Μέτρα και όροι για τη Διαχείριση Στερεών Αποβλήτων*. Εθνικός και Περιφερειακός Σχεδιασμός. (ΦΕΚ 1009/τ. Β/22-12-2003).
- Νόμος 3463/2006 *Κύρωση του Κώδικα Δήμων και Κοινοτήτων* (Φ.Ε.Κ. 114/τ.Α/8-6-2006).
- Νόμος 3536/2007 *Ειδικές ρυθμίσεις θεμάτων μεταναστευτικής πολιτικής και λοιπών ζητημάτων αρμοδιότητας Υπουργείου Εσωτερικών, Δημόσιας Διοίκησης και Αποκέντρωσης* (Φ.Ε.Κ. 42/τ.Α/23-2-2007).
- Νόμος 3688/2008 *Πολιτιστικό Κέντρο Ελληνικής Αστυνομίας και Άλλες Διατάξεις* (Φ.Ε.Κ. 163/τ.Α/5-8-2008).
- Νόμος 3852/2010 *Νέα Αρχιτεκτονική της Αυτοδιοίκησης και της Αποκεντρωμένης Διοίκησης - Πρόγραμμα Καλλικράτης* (Φ.Ε.Κ. 87/τ.Α/7-6-2010).
- Ο.Ε.Κ.Δ., 2009. *OECD Factbook 2006. Economic, Environmental and Social Statistics*. Available to: <http://masetto.sourceoecd.org/pdf/factbook2009/302009011e-08-02-02.pdf>
- Παναγιωτακόπουλος, Δ.Χ., 2002. *Βιώσιμη Διαχείριση Αστικών Στερεών Αποβλήτων*. Εκδόσεις Ζυγός, Θεσσαλονίκη, 502 σελ.
- Σ.ΟΤΑ.Ν.Θ. 2009. Πίνακας Συνολικού Τονάζ για το έτος 2009, Τελών Χρήσης, Εισφορών 2009 και προβλεπόμενων Εισφορών 2010 για τη Διαχείριση Αστικών Στερεών Αποβλήτων 42 Δήμων του Νομού Θεσσαλονίκης.

**ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΠΙΕΣΗΣ ΕΥΤΡΟΦΙΣΜΟΥ ΣΤΗΝ ΥΠΟ-
ΑΝΑΣΥΣΤΑΣΗ ΛΙΜΝΗ ΚΑΡΛΑ: ΕΙΝΑΙ ΕΦΙΚΤΗ Η ‘ΚΑΛΗ
ΟΙΚΟΛΟΓΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ’ ΜΕΧΡΙ ΤΟ 2015;**

Ιφ. Κάγκαλου^{1,3}, Κ. Κορμάς¹, Χ. Λασπίδου²

¹ Τμ. Ιχθυολογίας & Υδατ. Περιβ/ντος, Σχ. Γεωπονικών Επιστημών, Παν/μιο Θεσσαλίας, Βόλος, ikagalou@uth.gr

² Τμ. Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, Παν/μιο Θεσσαλίας, Βόλος.

³ Φορέας Διαχείρισης Περιοχής Οικοανάπτυξης Κάρλας- Μαυροβουνίου, Κεφαλοβρύσου- Βελεστίνου, Στεφανοβίκειο, Μαγνησίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η Οδηγία –Πλαίσιο (2000/60/ΕΚ) για τη θέσπιση πλαισίου κοινοτικής δράσης στον τομέα της πολιτικής των υδάτων θέτει το νομοθετικό πλαίσιο για την ορθή διαχείριση και προστασία των υδατικών πόρων ενώ ο βασικός στόχος της Οδηγίας είναι η αποτροπή της περαιτέρω υποβάθμισης όλων των υδάτων και η επίτευξη μιας «καλής οικολογικής κατάστασης» μέχρι το 2015. Η επαναδημιουργούμενη λίμνη Κάρλα αποτελεί ένα λιμναίο οικοσύστημα υπό επαναδημιουργία μετά την ολική αποξήρανσή της στην δεκαετία του 1960. Παρά το γεγονός ότι αποτελεί επίσης μια προστατευόμενη περιοχή- ανήκοντας στο δίκτυο NATURA 2000, εν τούτοις δέχεται ήδη πλήθος ανθρωπογενών πιέσεων. Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η εκτίμηση της πίεσης από την εισροή θρεπτικών, κυρίως φωσφόρου, στην Κάρλα και οι επιπτώσεις στην τροφική της κατάσταση με δεδομένες τις παρούσες υδρολογικές συνθήκες.

**EVALUATION OF THE EUTROPHICATION PRESSURE IN THE
RESTORED LAKE KARLA: HOW REALISTIC IS THE GOAL
FOR ‘GOOD ECOLOGICAL STATUS’ BY 2015?**

If. Kagalou^{1,3}, K. Kormas¹, C. Laspidou²

¹ Department of Ichthyology & Aquatic Environment, School of Agricultural Sci., University of Thessaly, Volos, Greece, ikagalou@uth.gr

² Department of Civil Engineering, Polytechnic School, University of Thessaly, Volos, Greece

³ Management body of the region of Karla- Mavrovouni- Kefalovryso- Velestino, Stefanovikeio Magnesia, Greece

ABSTRACT

Among the objectives of the Water Framework Directive (WFD 2000/60/EC) are the establishment of a framework for the protection and the achievement of “good ecological status” for all water bodies. In Europe, Lake Karla is one of the few examples of a lake ecosystem that has been dried in the 60s and now is has been restored. Although it is listed as a Natura 2000 site, it continues facing high anthropogenic pressures. The objective of this study is to evaluate the inflowing nutrient loading and its consequences on the lake trophic state.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Είναι γνωστό ότι η διατήρηση και η διαχείριση των υδάτινων πόρων—ιδιαίτερα των γλυκών νερών—σχετίζεται άμεσα με την βιώσιμη ανάπτυξη, συμπεριλαμβάνοντας επομένως κοινωνικές, οικονομικές και περιβαλλοντικές συνιστώσες (Moss et al., 2003). Πρόσφατα, σε διεθνές επίπεδο, έχει αναγνωρισθεί ως αναγκαιότητα η επίλυση των προβλημάτων υποβάθμισης των υδάτινων οικοσυστημάτων, τα οποία κυρίως οφείλονται σε ανθρωπογενείς πιέσεις, επηρεάζοντας άμεσα την βιοποικιλότητά τους καθώς επίσης τα αγαθά και τις υπηρεσίες τους (Carpenter et al., 1999).

Η οικολογική κατάσταση ενός υδάτινου οικοσυστήματος, αλλά και η εξέλιξή του, εξαρτώνται από πολλούς βιοτικούς και αβιοτικούς παράγοντες του ίδιου του συστήματος, αλλά και από φυσικές ή/και ανθρωπογενείς διεργασίες. Ιδιαίτερα η οικολογική κατάσταση των λιμνών επηρεάζεται άμεσα από τους εξής παράγοντες (Premazzi and Chiaudani, 1992):

- α) τον ευτροφισμό ως αποτέλεσμα υπερβολικής εισροής θρεπτικών στοιχείων και οργανικού φορτίου
- β) τους υδρολογικούς και φυσικούς παράγοντες που έχουν ως αποτέλεσμα την αυξομείωση της στάθμης
- γ) την συνεχή ιζηματοπόθεση εξ' αιτίας φαινομένων διάβρωσης στην λεκάνη απορροής
- δ) την ρύπανση από τοξικές ή/και ανεπιθύμητες ουσίες
- ε) την εισβολή ξενικών/αλλόχθονων ειδών χλωρίδας και πανίδας.

Ο προσδιορισμός της οικολογικής κατάστασης και η προστασία των Ευρωπαϊκών λιμναίων οικοσυστημάτων αποτελεί (και) νομική υποχρέωση όλων των Κρατών-Μελών μετά την συμφωνία για εφαρμογή της Ευρωπαϊκής Οδηγίας-πλαίσιο για τα Ύδατα (2000/60/EC). Η Οδηγία-πλαίσιο αποτελεί, μάλλον, το πλέον ολοκληρωμένο θεσμικό εργαλείο για την διατήρηση όλων των κατηγοριών υδατινών οικοσυστημάτων, αναδεικνύοντας την αναγκαιότητα για « αποτροπή της περαιτέρω υποβάθμισης και απόκτηση καλής οικολογικής κατάστασης μέχρι το 2015». Πολλές Ευρωπαϊκές λίμνες αντιμετωπίζουν δυσκολίες στην επίτευξη του προαναφερόμενου στόχου που θέτει η Οδηγία-πλαίσιο ενώ το 90% των Ελληνικών λιμνών αντιμετωπίζει σοβαρά προβλήματα υποβάθμισης (ευτροφισμός, παρουσία τοξικών και ανεπιθύμητων ουσιών, κυριαρχία κυανοβακτηρίων, μείωση της βιοποικιλότητας κ.λ.π), ενώ η πρόβλεψη για «καλή οικολογική κατάσταση μέχρι το 2015» είναι αρνητική (Kagalou, 2010).

Η λίμνη Κάρλα αποτελεί περιοχή με ιδιαίτερο ενδιαφέρον δεδομένου ότι: α) αποτελεί το μεγαλύτερο περιβαλλοντικό & αναπτυξιακό έργο της Χώρας κατά τις τελευταίες Προγραμματικές περιόδους, β) συνιστά σπουδαίο θύλακα βιοποικιλότητας και ως εκ τούτου συγκαταλέγεται στο δίκτυο περιοχών Natura 2000. Είναι σαφές ότι η Κάρλα παρουσιάζει επίσης εξαιρετικά μεγάλο επιστημονικό ενδιαφέρον για τον λόγο ότι είναι ένα σύστημα του οποίου οι λειτουργίες διακόπηκαν βίαια ενώ το πείραμα «επαναδημιουργίας του» ως πραγματικό λειτουργικό οικοσύστημα παραμένει να αποδειχθεί. Η γνώση των λειτουργιών του θα οδηγήσει σε ακριβέστερο σχεδιασμό της διαχείρισής του, γεγονός που αποτελεί, ακόμη, ζητούμενο εάν υπολογίσει κανείς τις πολλές και ενδεχομένως αλληλοσυγκρουόμενες χρήσεις που προτείνονται από την Πολιτεία και τους τοπικούς φορείς.

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η εκτίμηση της πίεσης από την εισροή θρεπτικών, κυρίως φωσφόρου, στην Κάρλα και οι επιπτώσεις στην τροφική της κατάσταση, με δεδομένες τις παρούσες υδρολογικές συνθήκες. Διερευνάται επίσης το κατά πόσο είναι εφικτός ο περιβαλλοντικός στόχος που θέτει η Οδηγία-Πλαίσιο για 'καλή οικολογική κατάσταση' μέχρι το 2015.

2. ΥΔΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1. Η ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η λίμνη Κάρλα ($39^{\circ} 29'02''\text{N}$, $22^{\circ} 51'41''\text{E}$) εντοπίζεται στο νοτιοανατολικό άκρο της πεδιάδας της Λάρισας με την μορφή κλειστής επιμήκους λεκάνης. Η φυσική λεκάνη απορροής της λίμνης καταλάμβανε συνολική έκταση 1.663 km^2 η οποία όμως τροποποιούνταν ανάλογα με τις εισροές και τις εκροές κάθε έτους (Πίνακας 1). Η υδρολογική λεκάνη της λίμνης Κάρλας ανήκει στην ευρύτερη λεκάνη απορροής του ποταμού Πηνειού (Σχήμα 1).

Η αποξήρανση της λίμνης Κάρλας επιτεύχθηκε με τη δημιουργία σήραγγας, η οποία διοχέτευε τα νερά της λίμνης στον Παγασητικό Κόλπο (Ζαλίδης, 1995). Η σήραγγα αυτή κατασκευάστηκε το διάστημα 1957–1960, είχε μήκος $10,5 \text{ km}$ και παροχετευτική ικανότητα $8,5 \text{ m}^3/\text{s}$.

Η λίμνη σήμερα βρίσκεται υπό καθεστώς πλήρωσης καθώς αποστραγγίστηκε το 1962 μέσω της προαναφερόμενης σήραγγας αφήνοντας μόνιμες μικρής έκτασης ελώδεις περιοχές. Η δομή και η λειτουργία της λίμνης ήταν άμεσα συνδεδεμένη με τον ποταμό Πηνειό, καθώς τα πλημμυρικά φαινόμενα του Πηνειού παρείχαν νερό στην Κάρλα πλούσιο σε θρεπτικά συστατικά. Το παραπάνω στοιχείο, σε συνδυασμό με την πλούσια βιοποικιλότητα, χαρακτήριζαν την λίμνη ως εύτροφη αλλά με μεγάλη σταθερότητα πριν από την αποξήρανσή της (Αναπιάδης, 1956).

Η απόφαση για την επαναπλήρωση της λίμνης λήφθηκε στη δεκαετία του '90 εκτρέποντας νερό από τον ποταμό Πηνειό, όμως η πραγματική πλήρωσή της ξεκίνησε το Σεπτέμβριο του 2009, αφού πρώτα είχαν κατασκευαστεί περιφερειακά αναχώματα συνολικού μήκους $13,5 \text{ km}$ (ανατολικό 2.660 m και δυτικό 10.840 m) (Zalidis et al., 2005). Σήμερα ο ταμιευτήρας της πρώην λίμνης καταλαμβάνει έκταση 38 km^2 και έχει μέγιστο βάθος τα 2 m . Επιπλέον, ο ταμιευτήρας δέχεται εισροές κυρίως από τον Πηνειό ποταμό αλλά και από τις βροχοπτώσεις, τις πηγές του Βελεστίνου και το ρέμα Ασμάκι.



Σχήμα 1. Απεικόνιση λίμνης Κάρλας και θέση των σταθμών δειγματοληψίας

Πίνακας 1. Το μέγεθος της λεκάνης απορροής της λίμνης Κάρλας από το 1937 ως το 1952 (Τζιάτζιος, 2010)

Χρονική περίοδος	Έκταση λεκάνης απορροής (km ²)
Πριν το 1937	> 1.672
1937 – 1945	1.672
1945 – 1949	1.334
1949 – 1952	1.075

Το γεωλογικό υπόβαθρο της περιοχής συνιστούν πετρώματα της Πελαγονικής ζώνης και ιζήματα του Νεογενούς και Τεταρτογενούς (Μούμου, 2007) ενώ το κλίμα στην περιοχή χαρακτηρίζεται ως εύκρατο Μεσογειακού τύπου με χαρακτηριστικά την θερμή-ξηρή θερινή περίοδο και την ήπια βροχερή χειμερινή.

2.2. ΤΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Τα επιστημονικά δεδομένα που αφορούν στο οικοσύστημα της λίμνης Κάρλας πριν την αποξήρανση περιορίζονται αποκλειστικά στην μελέτη Ananiadis (1956). Υδρολογικά δεδομένα που αφορούν στην επαναδημιουργούμενη λίμνη Κάρλα παρέχονται από τους Gerakis (1992), Loukas et al., (2008), Myloroulos and Sidiropoulos (2009), Sidiropoulos et al. (2012), ΥΠΕΧΩΔΕ (2004), ενώ από το 2011 ο Φορέας Διαχείρισης Λίμνης Κάρλας πραγματοποιεί καταγραφές της στάθμης του νερού αλλά και προσδιορισμό της ποιότητας του νερού σε 4 σταθμούς δειγματοληψίας για πρώτη φορά μετά την αποξήρανσή της. Δεδομένα ποιότητας του νερού (θερμοκρασία, pH, ηλεκτρική αγωγιμότητα, διαλελυμένο οξυγόνο, NO₃-N, NO₂-N, NH₄-N, SRP, χλωροφύλλη-α) της λίμνης Κάρλας παρουσιάζονται αναλυτικά σε προγενέστερη εργασία μας, καθώς επίσης και λεπτομερής ανάλυση των δειγματοληψιών και της μεθοδολογίας (Papadimitriou et al. 2010) που ακολουθείται. Για την εκτίμηση του οργανικού φορτίου και των θρεπτικών στοιχείων που εισρέουν στην λίμνη από την λεκάνη απορροής χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα της τεχνικής μελέτης «Σύστημα Διαχείρισης Νερών, Εδαφών και Οικοσυστημάτων Κάρλας» (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2004). Για την εκτίμηση της ρυπαντικού φορτίου του ποταμού Πηνειού χρησιμοποιήθηκε αντίστοιχη βάση δεδομένων (Παρατηρητήριο Πηνειού, Λάρισα, 2010).

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

3.1 ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ

Η πρώην λίμνη Κάρλα, όπως άλλωστε πολλές καρστικές λίμνες της Ελλάδας, δεν είχε φυσική επιφανειακή εκροή και η εκφόρτιση πραγματοποιούνταν μέσω καρστικών καταβοθρών προς τον Παγασητικό κόλπο. Στην επαναδημιουργούμενη λίμνη Κάρλα, η εκφόρτιση προβλέπεται να πραγματοποιείται μέσω τεχνητής σήραγγας προς τον Παγασητικό κόλπο η οποία όμως προς το παρόν είναι εκτός λειτουργίας. Έτσι οι υδατικές απώλειες, σήμερα, περιορίζονται στην εξάτμιση, στην απόληψη νερού για άρδευση και στις υπόγειες διαφυγές. Συνοπτικά, η εξίσωση του υδρολογικού ισοζυγίου για την 'επαναδημιουργούμενη' λίμνη Κάρλα περιγράφεται ως εξής:

$$\Delta h = P + R_s + R_t - E - W - R_g \quad (3.1)$$

Όπου,

Δh είναι η ετήσια μεταβολή της στάθμης (mm)

P είναι το ετήσιο ύψος βροχόπτωσης (mm)

R_s είναι η ετήσια επιφανειακή απορροή μέσω των περιμετρικών συλλεκτήρων

R_t είναι η ετήσια εισροή μέσω των κατασκευασθέντων τάφρων (1T και 2T) (mm)

E είναι το ετήσιο ύψος εξάτμισης (mm)

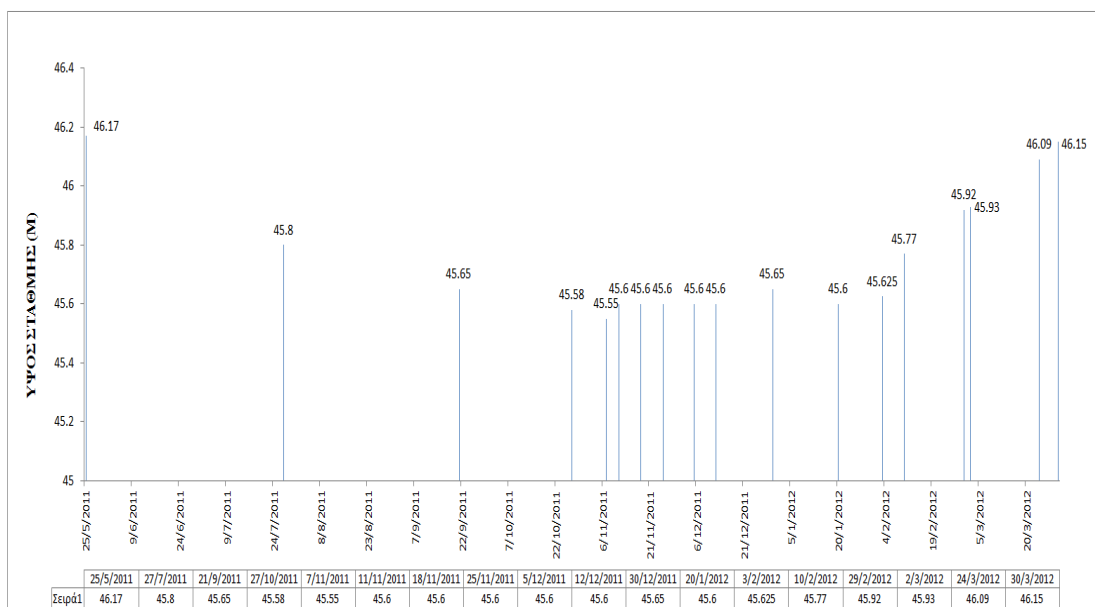
W αντιστοιχεί στο ετήσιο ποσό απολήψεων για άρδευση (mm)

R_g είναι οι υπόγειες διαφυγές (mm).

Στον Πίνακα 2 παρουσιάζεται η διακύμανση του όγκου και της στάθμης του νερού, ενώ παραστατικά η διακύμανση της στάθμης παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.

Πίνακας 2. Μεταβολή της στάθμης και του όγκου της λίμνης Κάρλας για την χρονική περίοδο Μάιος 2011- Μάρτιος 2012.

Ημερομηνία	X-Στάθμη (m)	Y-Όγκος ($\times 10^6 \text{ m}^3$)
25/5/2011	46.17	50
27/7/2011	45.8	38
21/9/2011	45.65	30
27/10/2011	45.58	29
7/11/2011	45.55	28.5
11/11/2011	45.6	29.5
18/11/2011	45.6	29.5
25/11/2011	45.6	29.5
5/12/2011	45.6	29.5
12/12/2011	45.6	29.5
30/12/2011	45.65	30
20/1/2012	45.6	29.5
3/2/2012	45.625	29.8
10/2/2012	45.77	35
29/2/2012	45.92	42
2/3/2012	45.93	42
24/3/2012	46.09	45
30/3/2012	46.15	48.5



Σχήμα 2. Διακύμανση της στάθμης για την χρονική περίοδο Μάιος 2011- Μάρτιος 2012

Πριν την αποξήρανση, η λίμνη Κάρλα διατηρούσε ικανοποιητικό όγκο νερού έτσι ώστε να εξυπηρετείται η λειτουργία ενός μεγάλου υδροβιότοπου, η φόρτιση του υπόγειου υδροφορέα και οι ανθρώπινες ανάγκες της εποχής. Σήμερα πέραν του πρωταρχικού περιβαλλοντικού ρόλου του νέου συστήματος, ο ταμιευτήρας οφείλει να εξυπηρετήσει αφ' ενός τις αρδευτικές ανάγκες της περιοχής αφ' ετέρου τις αυξημένες υδρευτικές ανάγκες των κατοίκων. Σε κάθε περίπτωση όμως ο ταμιευτήρας οφείλει να διατηρεί στάθμη μεγαλύτερη από το όριο (46,4 m) το οποίο κρίνεται απαραίτητο για την οικολογική ισορροπία του συστήματος.

3.2. ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΝΕΡΟΥ-ΘΡΕΠΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Αυξημένες συγκεντρώσεις θρεπτικών στοιχείων σε μηνιαία δείγματα νερού παρατηρήθηκαν κατά τα έτη 2010 και 2011. Συγκεκριμένα οι τιμές της συγκέντρωσης του διαλυμένου φωσφόρου για το διάστημα Απρίλιος-Νοέμβριος 2010 (SRP, Soluble Reactive Phosphorous) κυμάνθηκαν μεταξύ 1.5-3.15 mg/L, των νιτρικών (NO₃-N) μεταξύ 0.2-0.8 mg/L και του αμμωνιακού αζώτου (NH₄-N) μεταξύ 0.38-1.99 mg/L (Papadimitriou et al., 2010). Αντίστοιχα, το έτος 2011, κατά την ίδια χρονική περίοδο, τιμές του διαλυμένου φωσφόρου κυμάνθηκαν σε χαμηλότερα μεν αλλά επίσης σε υψηλά επίπεδα (0,05-0,77mg/L) , των νιτρικών μεταξύ 0.1-1.27mg/L και των αμμωνιακών μεταξύ 0.01-1.74mg/L. Οι τιμές των θρεπτικών στοιχείων συνοδεύονταν και από ιδιαίτερα υψηλές τιμές χλωροφύλλης-α (Chl a). Για τη μεν πρώτη χρονική περίοδο καταγράφηκαν τιμές μεταξύ 0,078 και 0,525 mg/L (Papadimitriou et al. , 2010), ενώ τους θερινούς μήνες του 2011 (Μάιος-Οκτώβριος), οι τιμές χλωροφύλλης-α κυμάνθηκαν μεταξύ 0,060 και 0,410 mg/L σημειώνοντας τις μέγιστες τιμές τον μήνα Ιούλιο. Η έναρξη εισροής νερού από τον Πηγεϊό τον Δεκέμβριο του 2010 και η αύξηση του όγκου του νερού φαίνεται ότι ελάττωσε σημαντικά τις συγκεντρώσεις φωσφόρου στο νερό παρά το γεγονός ότι απέχουν κατά πολύ από το όριο των 0.05 mg/L το οποίο έχει τεθεί ως το ανώτατο όριο αποφυγής ευτροφικών συνθηκών σε ρηχές λίμνες της Μεσογείου (Beklioglu et al., 2007). Αντίθετα δεν παρατηρήθηκε αντίστοιχη μείωση στις συγκεντρώσεις του ανόργανου αζώτου (νιτρικών και αμμωνιακών ιόντων).

Εφαρμόζοντας τα συστήματα κατάταξης OECD (1982) και Carlson trophic state index (TSI, 1977) και χρησιμοποιώντας τις συγκεντρώσεις χλωροφύλλης-α (εξίσωση 1), η λίμνη Κάρλα κατά τη διάρκεια των δυο περιόδων παρακολούθησης κατατάσσεται στην ευτροφική/υπερτροφική κατάσταση ($>25\mu\text{g/L}$ και $>56\mu\text{g/L}$ σύμφωνα με OECD και Carlson TSI, αντίστοιχα).

$$TSI(\text{Chl-}\alpha)=10*[6-(2,04-0,68\text{LnChl-}\alpha)/\text{Ln}2] \quad (3.2.1)$$

Ο λόγος αζώτου/φωσφόρου χρησιμοποιείται συχνά για την πρόβλεψη του περιοριστικού παράγοντα ανάπτυξης της φυτοπλακτονικής βιομάζας, παρέχοντας ένα σημαντικό εργαλείο διαχείρισης. Στην περίπτωση της λίμνης Κάρλας και τα δυο θρεπτικά στοιχεία βρίσκονται σε περίσσεια με αποτέλεσμα ο λόγος DIN (NO_3+NH_4)/SRP να μεταβάλλεται συνεχώς εμφανίζοντας έντονη διακύμανση (0.35-23.5)

3.3 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗΣ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ ΤΗΣ ΛΙΜΝΗΣ ΜΕ ΘΡΕΠΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΛΕΚΑΝΗ ΑΠΟΡΡΟΗΣ

Η απορροή φωσφόρου από την λεκάνη απορροής προς την λίμνη Κάρλα εκτιμάται πολύ υψηλότερη από την «κρίσιμη» τιμή η οποία προκαλεί ευτροφικές συνθήκες σε μια ρηχή λίμνη. Σύμφωνα με τον Vollenweider (1976) για περιπτώσεις λιμνών μέσου βάθους περίπου 5m, προτείνεται ως κρίσιμο φορτίο την ποσότητα $0.13\text{ g/P m}^{-2}\text{ year}^{-1}$

Με δεδομένο ότι η απορροή θρεπτικών (N, P) εξαρτάται από τις υφιστάμενες χρήσεις γης αλλά και από τις κτηνοτροφικές δραστηριότητες στην περιοχή (Mattikalli and Richards, 1996; UNEP/MAP, 2002) χρησιμοποιήθηκαν κατάλληλοι συντελεστές φόρτισης (Reckhow, 1980; WHO, 1978) ενώ αναλυτικά δεδομένα για τις υφιστάμενες χρήσεις γης, το είδος και την έκταση των καλλιεργειών και το ζωικό κεφάλαιο της περιοχής ελήφθησαν από την Τεχνική Μελέτη Κάρλας (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2004). Το ετήσιο φορτίο φωσφόρου που απορρέει στη λίμνη από ορεινές απορροές εκτιμήθηκε σε 5408 kg, από την πεδινή-αγροτική περιοχή σε 4734 kg και από την υπόλοιπη βοσκολιβαδική έκταση σε 25350 kg. Έτσι, εκτιμήθηκε η απορροή φωσφόρου στην σημερινή έκταση της λίμνης σε $0.934\text{ g/P m}^{-2}\text{ year}^{-1}$.

Αντίστοιχα, το συνολικό ετήσιο φορτίο αζώτου (ως άθροισμα διαλυμένου ανόργανου αζώτου, DIN) ανέρχεται σε 39.10^4 kg (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2004) και αντιστοιχεί σε εισροή προς την λίμνη ποσότητας $10.26\text{ g/N m}^{-2}\text{ year}^{-1}$. Συγκρίνοντας την λειτουργία στο αγρο-οικοσύστημα της περιοχής Κάρλας με αντίστοιχα οικοσυστήματα σε Ευρωπαϊκό επίπεδο, προκύπτει ότι, αναφορικά με τις συγκεντρώσεις των θρεπτικών στοιχείων στο νερό, λειτουργεί με βάση την «περίσσεια σε φώσφορο και σε άζωτο» (Isermann, 1990; Brouwer et al., 1995), ερμηνεύοντας έτσι την διακύμανση του προαναφερόμενου λόγου DIN/SRP. Με δεδομένο τον καθοριστικό ρόλο και των δυο θρεπτικών στοιχείων στην ανάπτυξη ευτροφικών συνθηκών, οι οποίες ήδη περιγράφηκαν, η μείωση των μεταφερόμενων ποσοτήτων από την ξηρά στο νερό κρίνεται ως απαραίτητο μέτρο προστασίας και στην περίπτωση της Κάρλας.

3.4 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΚΡΙΣΙΜΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΦΩΣΦΟΡΟΥ

Χρησιμοποιήθηκε το βασικό μοντέλο Vollenweider (1976), το οποίο βασίζεται σε ισοζύγιο μάζας σταθερής κατάστασης και σε εμπειρικές σχέσεις ανάμεσα σε φορτία θρεπτικών, κατακράτηση ιζήματος, συγκεντρώσεις στη λίμνη και παραγωγή ή βιομάζα

φυτοπλαγκτού. Το θεωρητικό υπόβαθρο είναι η αρχή αντιδραστήρα συνεχούς ανάδευσης (continuously stirred tank reactor—CSTR). Βασίζεται δηλαδή στην υπόθεση ότι οι συγκεντρώσεις σε όλο τον όγκο της λίμνης είναι χωρικά σταθερές. Διάφορες προσπάθειες έχουν ήδη γίνει για τη μοντελοποίηση θρεπτικών συστατικών και ιζημάτων στην επαναδημιουργούμενη λίμνη Κάρλα (Laspidou et al., 2011, Laspidou and Vaina, 2009), αλλά σε κάθε περίπτωση η σύνθεση μιας οργανωμένης βάσης δεδομένων με μετρήσεις της ποσότητας και ποιότητας των υδάτων στη λίμνη Κάρλα κρίνεται απαραίτητη.

Η πιο απλή μορφή του μοντέλου Vollenweider (1976) συνδέει τη συγκέντρωση φωσφόρου στη λίμνη (P , $[M][L]^{-3}$) με τα εξωτερικά φορτία φωσφόρου (L_p , επιφανειακή φόρτιση μάζας φωσφόρου στη λίμνη ανά μονάδα χρόνου, $[M][L]^{-2} [T]^{-1}$), το ύψος της παροχής αυτών των φορτίων (q_s , $[L][T]^{-1}$) και το χρόνο υδραυλικής παρακράτησης της λίμνης (τ_w [T]), ο λόγος του όγκου της λίμνης V $[L]^3$ δια της παροχής Q $[L]^3[T]^{-1}$) και είναι η ακόλουθη:

$$P = \frac{L_p}{q_s} \cdot \frac{1}{1 + \sqrt{\tau_w}} \quad (3.4.1)$$

Εφαρμόζοντας το παραπάνω μοντέλο στα δεδομένα της λίμνης Κάρλας, μπορούμε να υπολογίσουμε τη συγκέντρωση φωσφόρου μέσα στη λίμνη με βάση τα φορτία φωσφόρου που εισρέουν. Αυτό που έχει μεγαλύτερο ενδιαφέρον όμως είναι να καθορίσουμε το κρίσιμο φορτίο φωσφόρου $\left(\frac{L_p}{q_s}\right)_{crit} [M][L]^{-3}$ πάνω από το οποίο, θα επικρατούν στη λίμνη ευτροφικές συνθήκες. Αν χρησιμοποιήσουμε το όριο των 50 $\mu\text{g/L}$ το οποίο έχει τεθεί ως το ανώτατο όριο αποφυγής ευτροφικών συνθηκών σε ρηχές λίμνες της Μεσογείου (Romo et al., 2005, Beklioglu et al., 2007), μπορούμε να υπολογίσουμε αυτή την κρίσιμη ποσότητα για τρεις διαφορετικούς υδραυλικούς χρόνους παραμονής που αντιστοιχούν σε φυσιολογικές συνθήκες καθώς και συνθήκες ξηρασίας, και έντονης βροχόπτωσης για την περιοχή Κάρλας σύμφωνα με τους Moustaka et al. (2002). Για τους υπολογισμούς των κρίσιμων φορτίων φωσφόρου που φαίνονται στον Πίνακα 3, χρησιμοποιούμε την παρακάτω εξίσωση:

$$\left(\frac{L_p}{q_s}\right)_{crit} = 50 \cdot (1 + \sqrt{\tau_w}) \quad (3.4.2)$$

Πολλαπλασιάζοντας τις κρίσιμες συγκεντρώσεις με τους αντίστοιχους όγκους της λίμνης, υπολογίζουμε τα κρίσιμα φορτία φωσφόρου (σε kg). Προφανώς, τα ανώτατα επιτρεπτά φορτία είναι πολύ υψηλότερα από αυτά που πράγματι εισρέουν στη λίμνη σήμερα ετησίως, όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα (35.492 kg ετησίως συνολικά). Είναι αναμενόμενο λοιπόν να δημιουργούνται συνθήκες ευτροφισμού.

Λαμβάνοντας υπ' όψιν τις ήδη ευρισκόμενες τιμές συγκεντρώσεων των θρεπτικών στοιχείων, της χλωροφύλλης-α αλλά και την διακύμανση των βιολογικών στοιχείων από προγενέστερες έρευνες στην λίμνη Κάρλα (Oikonomou et al., 2012, Papadimitriou et al., 2010), προκύπτει ότι ήδη στον παρόντα χρόνο το οικοσύστημα διανύει περίοδο ευτροφικών/υπερτροφικών συνθηκών. Η σημαντικότερη ίσως ένδειξη την οποία αξιολογεί ως ιδιαίτερης σημασίας παράμετρο η Οδηγία-Πλαίσιο είναι η συχνή παρουσία και παραμονή τοξικών ειδών κυανοβακτηρίων (Oikonomou et al., 2012, Papadimitriou et al., 2010). Φαίνεται ότι στην παρούσα φάση η Κάρλα λειτουργεί

αποκλειστικά ως ταμιευτήρας νερού και ως αποδέκτης εισροών θρεπτικών στοιχείων με ελάχιστο χρόνο ανανέωσης νερού. Εφαρμόζοντας τις κατευθυντήριες γραμμές και τα όρια που θεσπίζει η Οδηγία-Πλαίσιο για την τυπολογία των «θερμών» Μεσογειακών λιμνών (Moss et al., 2003, ΕΕΑ, 1999) και με τις σημερινές συνθήκες, η οικολογική κατάσταση της λίμνης Κάρλας κατατάσσεται στις κατηγορίες «φτωχή» ή/και «κακή».

Πίνακας 3. Εκτίμηση κρίσιμων φορτίων φωσφόρου σε διαφορετικές υδρολογικές συνθήκες

Μεταβλητές	Ξηρό Έτος (1999-2000)	Μέσο Έτος (1988-1989)	Υγρό Έτος (1990-1991)
τ_w (year)	0.417	0.173	0.181
V (m ³)	2.85×10^7	3.45×10^7	5.00×10^7
$\left(\frac{L_p}{q_s}\right)_{crit} \left(\frac{\mu g}{l}\right)$	16.5	14.2	14.3
Κρίσιμο Φορτίο (kg P)	93.8	97.8	143

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τα αποτελέσματά μας προκύπτει ότι η επαναδημιουργούμενη λίμνη Κάρλα υφίσταται σοβαρές ανθρωπογενείς πιέσεις οι οποίες οδηγούν στην διαμόρφωση ευτροφικών συνθηκών. Σαφώς πρόκειται για τεχνητό υδατικό σύστημα του οποίου η κατασκευή δεν έχει αποπερατωθεί, ανήκει στα ιδιαίτερος τροποποιημένα υδάτινα σώματα ενώ κρίνεται ως αμφίβολο το «να πετύχει τον περιβαλλοντικό στόχο της Οδηγίας- Πλαίσιο». Απαιτείται δραστική μείωση του εισερχόμενου φορτίου από σημειακές και μη-σημειακές πηγές ρύπανσης και άμεση ενεργοποίηση των εκροών (λειτουργία αρδευτικού συστήματος και ασφαλής και ελεγχόμενη χρήση εκροής προς τον Παρασητικό κόλπο). Η αποκατάσταση του οικοσυστήματος της ‘νέας’ λίμνης Κάρλας προϋποθέτει την συνεχή παρακολούθηση όλων των παραμέτρων (βιοτικών και αβιοτικών) που προτείνονται με βάση την Οδηγία-Πλαίσιο και την υιοθέτηση ενός ισχυρού θεσμικού πλαισίου ρύθμισης όλων των δραστηριοτήτων στην λεκάνη απορροής.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Ananiadis, C., I., 1956. *Limnological study of Lake Karla*. Bulletin De l' Institut Oceanographique. 1083: 1-19.
- Beklioglu, M., Romo, S., Kagalou, I., Quintana, X., and Bécares, E., 2007. *State of the art in the functioning of shallow Mediterranean lakes: workshop conclusions*. Hydrobiologia 584: 317-326.
- Brouwer, F.M., Godeschalk, F.E., Hellegers, P.J. and Kelholt, H.J. 1995. *Mineral balances at farm level in the European Union*. Agricultural Economics Research Institute, The Hague.
- Carpenter, S., Ludwig, D., Brock, W., 1999. *Management of eutrophication for lakes subject to irreversible change*. Ecological Applications, 9:751-771.

- European Communities (2000). *Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for community action in the field of water policy*. Official journal of the European Communities L327(43): 1–72
- EEA (1999). *Environmental indicators: Typology and overview*, European Environment Agency, Technical Report, no 25
- Iserman, K.,1990. *Share of agriculture in nitrogen and phosphorus emissions to surface waters of Western Europe against the background of eutrophication*. Fertilizer Research, 26: 253-269.
- Gerakis, P.A.,1992. *Former Lake Karla rehabilitation case study, conservation and management of Greek wetlands*. IUCN, Gland, Switzerland 429-489
- Kagalou I. 2010.*Classification and management issues of Greek lakes under the European Water Framework Directive: a DPSIR approach*. Journal of Environmental Monit.12:2207-2215.
- Laspidou C.S., I. Kakoulidis and A. Loukas 2011. “*Ecosystem simulation modeling of nitrogen dynamics in the constructed wetland Carla in Greece*” Desalination and Water Treatment 33:61-67
- Laspidou C.S. and Vaina V. 2009. *Ecosystem modeling of sediment dynamics in the constructed wetland Carla in Central Greece*. International Journal of Design & Nature and Ecodynamics, 3(4): 273-280
- Loukas, A., Mylopoulos, N., Vasiliades, L.,2007.*A Modeling System for the Evaluation of Water Resources Management Strategies in Thessaly, Greece*. Water Resource and Management 21: 1673–1702
- Mattikalli N, Richards K.,1996. *Estimation of surface water quality changes in response to land use changes: application of the export coefficient model using remote sensing and GIS system*. J Environ Manage 48:263–282
- Moss, B., D. Stephen, C. Alvarez, E. Becares, W. van de Bund, S. E. Collings, et al.,2003. *The determination of ecological status in shallow lakes—a tested system (ECOFRAME) for implementation of the European Water Framework Directive*. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems 13: 507–549
- Moustaka, E., Mylopoulos N. and Loukas A.,2002.*Demand Assessment of the Restored Lake Karla Operation Under Different Hydrological and Water Scenarios*. 6th International Conference of Protection and Restoration of the Environment, Skiathos, pp. 207-215.
- Mylopoulos,N.,Sidiropoulos,P.,2009.*Groundwater management under hydrogeologic uncertainty in an overexploited aquifer*. Global Groundwater Resources and Management: Selected Papers from International Geological Congress Oslo (Norway).
- Oikonomou A, Katsiapi M, Karayanni H, Moustaka-Gouni M, Kormas K.,2012. *Plankton microorganisms coinciding with two consecutive mass fish kills in a newly reconstructed lake*. The Scientific World Journal doi:10.1100/2012/504135
- Papadimitriou, T., Stampouli, Z., Kagalou, I.,2010. *Preliminary results on the cyanotoxicity in the "new" Lake Karla (Thessaly-Greece)*. 12th International Conference on Environmental Science and Technology, Rhodes
- Premazzi, G., Chiaudani, G.,1992. *Ecological quality of surface waters. Quality Assessment, schemes for European Community Lakes*. EEC, EUR 14563. Milan, Italy: Environmental Institute, University of Milan.
- Reckhow, K. H., 1980. *Empirical lake models for phosphorus: development, applications, limitations and uncertainty*. In Scavia, D. & A. Robertson (eds), Perspectives in Lake Ecosystem Modeling. Ann Arbor Science. Ann Arbor, USA.

- Romo, S., Villena, M. J., Sahuquillo, M., Soria, J., Giménez, M., Alfonso, T., Vicente, E., & Miracle, R., 2005. *Response of a shallow Mediterranean lake to nutrient diversion: does it follow similar patterns as northern shallow lakes?* *Freshwater Biology*, 50, 1706–1717.
- ΥΠΕΧΩΔΕ 2004. (Greek Ministry of Environment, Regional Planning and Public Works (2004) Τελική Μελέτη για την κατασκευή του ταμιευτήρα Κάρλας..
- UNEP/MAP ,2002. *Guidelines for the preparation of the baseline budget of pollutany release-methodology and Emission factors*, Technical report
- Vollenweider, R. A., 1976. *Advances in defining critical load levels for phosphorus in lake eutrophication*. *Mem. Inst. Ital. Idrobiol.*33: 53–83
- WHO ,1978. *Technical report animal wastes*. Copenhagen
- Zalidis, G.C., Takavakoglou, V., A, Bilas, G., Katsavouni, S., 2005. *Re-establishing a sustainable wetland at former Lake Karla, Greece, using Ramsar restoration guidelines*. *Environmental Management* 34: 875-886

ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ ΠΑΤΑΤΑΣ (ΑΒΠ) ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΒΙΟΑΙΘΑΝΟΛΗΣ

Δ. Αράπογλου¹, Θ. Βαρζάκας², Α. Βλυσίδης³, Χ. Δουλιγέρης⁴, Κ. Ισραηλίδης¹

¹Εργαστ. Βιοτεχνολογίας, ΕΛΓΟ –ΔΗΜΗΤΡΑ, Σοφ. Βενιζέλου 1, 14123
Λυκόβρυση, ΑΘΗΝΑ, Email: cisrailides@nagref.gr

²ΤΕΙ Καλαμάτας, Τμ. Τεχνολογίας Γεωργικών Προϊόντων, Σχολή Γεωπονίας
Email: theovarzakas@yahoo.gr

³Εργ. Οργανικής & Περιβαλλοντικής Τεχνολογίας, ΕΜΠ, Email: avlys@tee.gr

⁴Παν. Πειραιά, Email : cdoulig@unipi.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διαχείριση των αποβλήτων της βιομηχανίας πατάτας (ΑΒΠ) είναι ένα πρόβλημα που απασχολεί όλες τις βιομηχανίες πατάτας στην Ευρώπη. Εντούτοις μία ολοκληρωμένη και φιλική προς το περιβάλλον λύση δεν έχει ακόμη βρεθεί. Μία πιθανή λύση στο πρόβλημα αυτό είναι η παραγωγή βιοαιθανόλης από τα απόβλητα αυτά. Τα ΑΒΠ περιέχουν επαρκείς ποσότητες αμύλου, κυτταρίνης, ημικυτταρίνης και ζυμώσιμα σάκχαρα και μπορεί να χρησιμεύσουν ως πρώτη ύλη για την παραγωγή βιοαιθανόλης. Τα ΑΒΠ μετά από κατάλληλη υδρόλυση και ζύμωση με τη ζύμη *S. cerevisiae* παράγαν αιθανόλη 6,97 g L⁻¹. Η απόδοση του προϊόντος Y-p/s ήταν 0.467 (46,7%). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα ΑΒΠ, ένα υποπροϊόν με μηδενική προστιθέμενη αξία, αποτελεί ένα πολλά υποσχόμενο υπόστρωμα για την παραγωγή αιθανόλης.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Βιοαιθανόλη, απόβλητα, βιομηχανία πατάτας, *S. cerevisiae*

MANAGEMENT OF POTATO PEEL WASTES (PPW) FOR ETHANOL PRODUCTION

D. Arapoglou¹, Th. Varzakas², A. Vlyssides³, Ch. Douligieris⁴,
C. Israilides¹

¹Lab of Biotechnology, ELGO –DEMETRA, 1, Sof. Venizelou St., Lycovrissi
14123, Athens, Greece. Tel.:+30210284594 E-mail: dimarap@yahoo.com

²Technological Educational Institution of Kalamata, School of Agriculture, Dept.
of Technology Agricultural Products. E-mail: theovarzakas@yahoo.gr

³National Technical University of Athens, Dept. of Chemical Engineering,
E-mail: avlys@tee.gr

⁴Univercity of Pireus, E-mail: cdoulig@unipi.gr

ABSTRACT

The problem of potato peel waste (PPW) management causes great concern to the potato industries in Europe και an integrated και environmental friendly solution is yet to be found και is under investigation. The potato peel is a zero value waste of the potato processing plants. The PPW contain sufficient quantities of starch, cellulose, hemicellulose and fermentable sugars and can serve as an ethanol feedstock. A number of the batches of PPW were hydrolysed with various enzymes and/or acid, and then fermented by *Saccharomyces cerevisiae* var. *bayanus* to determine fermentability and ethanol production. The results demonstrated that PPW, a by-product of the potato industry is an agroindustrial waste with potential utilisation for ethanol production.

KEY WORDS: bio-ethanol, wastes, potato industries, fermentation, *S. cerevisiae*

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια, έχουν αυξηθεί οι έρευνες για την ανάπτυξη και την εμπορική παραγωγή αιθανόλης, ως το πιο πολλά υποσχόμενο βιοκαύσιμο από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Σε πολλές χώρες στην Ευρώπη, συνιστάται η χρήση της βιοαιθανόλης ως εναλλακτικό καύσιμο ή συμπλήρωμα βενζίνης σε ποσά μέχρι 15% (Mojonovic et al, 2006). Πολλές χώρες εφαρμόζουν ήδη προγράμματα για την προσθήκη αιθανόλης στη βενζίνη. Η παραγωγή αιθανόλης σαν καύσιμο έχει αυξηθεί σημαντικά, γιατί πολλές χώρες αναζητούν τη μείωση των εισαγωγών πετρελαίου, την ενίσχυση της αγροτικής οικονομίας και τη βελτίωση της ποιότητας του αέρα. Η παγκόσμια παραγωγή της αιθυλικής αλκοόλης ανέρχεται σε περίπου 51.000 εκατομμύρια λίτρα, με τις ΗΠΑ και τη Βραζιλία να είναι οι μεγαλύτεροι παραγωγοί. Κατά μέσο όρο, το 73% της παγκόσμιας παραγωγής αιθανόλης αντιστοιχεί σε αιθανόλη για καύσιμο, 17% σε αιθανόλη ποτών και το 10% σε βιομηχανική αιθανόλη (Sanchez and Cardona, 2008).

Η οδηγία της ΕΕ για τη βιο-αιθανόλη απαιτεί από τα κράτη μέλη να θεσπίσουν νομοθεσία σχετικά με τη χρήση των καυσίμων από ανανεώσιμες πηγές. Το 2005, το ποσοστό αυτό θα έπρεπε να καλύπτει το 2% της συνολικής κατανάλωσης καυσίμων, ενώ το 2010 η ποσοστωση θα έπρεπε να αυξηθεί σε 5,75% ή και περισσότερο (Berna, 1998). Η ετήσια παραγωγή βιοαιθανόλης στην ΕΕ, ανήλθε σε $6 \times 10^6 \text{ m}^3$ κατά το 2006.

Μεταξύ των ενεργειακών καλλιιεργειών που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή αιθανόλης σαν καύσιμο, το ζαχαροκάλαμο είναι η κύρια πρώτη ύλη σε τροπικές χώρες όπως η Βραζιλία και η Ινδία. Αντίθετα στη Βόρεια Αμερική και την Ευρώπη, η αιθανόλη εξάγεται από αμυλούχα υλικά · κυρίως το καλαμπόκι. Εκτιμάται ότι η πρώτη ύλη (στην περίπτωση του καλαμποκιού) επιβαρύνει κατά το ήμισυ το συνολικό κόστος παραγωγής (46%). Για την επίτευξη του ελάχιστου κόστους παραγωγής, η αιθανόλη θα μπορούσε να προέρχεται από άλλες πρώτες ύλες, εκτός του καλαμποκιού. Για παράδειγμα, τα τελευταία χρόνια έχει ενταθεί η έρευνα για την αξιοποίηση λιγνοκυτταρινούχων υλικών ως πρώτης ύλης. Αυτές οι πρώτες ύλες συνήθως περιγράφονται με τον όρο «βιομάζα» και περιλαμβάνουν τα ξυλώδη γεωργικά υπολείμματα, τα αστικά στερεά απόβλητα και τις ενεργειακές καλλιέργειες.

Μια πιθανή λύση για την επίτευξη του ελάχιστου κόστους παραγωγής είναι η χρήση των αποβλήτων της βιομηχανίας πατάτας ως πρώτης ύλης για την παραγωγή αιθανόλης. Το πρόβλημα της διαχείρισης των αποβλήτων στη βιομηχανία πατάτας, είναι έντονο σε πολλές χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Εντούτοις δεν έχει ακόμα εφαρμοστεί, καμία περιβαλλοντικά φιλική μέθοδος επεξεργασίας τους. Οι φλούδες πατάτας, ειδικότερα, είναι ένα υποπροϊόν με μηδενική προσθετική αξία. Ενώ η κατανάλωση της πατάτας έχει μειωθεί, τα μεταποιημένα προϊόντα της, όπως οι τηγανιτές πατάτες, τα τσιπς και ο πουρές πατάτας αυξάνονται συνεχώς (ZMP, 2000). Μέρος της παραγωγικής διαδικασίας αυτών των προϊόντων, είναι το αρχικό στάδιο της αποφλοιώσεως της πατάτας. Το ποσοστό που απομακρύνεται κυμαίνεται από 15% έως 40%, ανάλογα με τη διαδικασία που εφαρμόζεται, (Scieber et al, 2001). Η παραγωγή αποβλήτων είναι 90 kg ανά τόνο εισροής πατάτας και κατανέμεται σε 50 kg φλούδες, 30 kg άμυλο και 10 kg αδρανείς ύλες.

Τα ΑΒΠ περιέχουν σημαντικές ποσότητες αμύλου, κυτταρίνης, ημικυτταρίνης και ζυμώσιμων σακχάρων και μπορεί να χρησιμεύσουν ως πρώτη ύλη για την παραγωγή αιθανόλης. Το άμυλο είναι μια υψηλής απόδοσης πρώτη ύλη για την παραγωγή αιθανόλης, ωστόσο απαιτείται προηγούμενη υδρόλυση του. Το άμυλο υδρολύεται παραδοσιακά με τη βοήθεια οξέων, αλλά η εξειδίκευση των ενζύμων (αμυλάσες), οι ήπιες συνθήκες αντίδρασης τους και η απουσία δευτερευόντων αντιδράσεων, έχουν οδηγήσει στην αντικατάσταση των οξέων από τις αμυλάσες. Η τεχνολογία επεξεργασίας άμυλου περιλαμβάνει αρχικά δύο στάδια, την ενζυματική διαλυτοποίηση και την σακχαροποίηση. Η διαδικασία αυτή μετατρέπει το άμυλο σε γλυκόζη, που στη συνέχεια ζυμώνεται σε αιθανόλη από ζύμες *Saccharomyces sp.* (Gray

et al, 2006). Τα ένζυμα έχουν πολλά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με την όξινη υδρόλυση. Δρουν σε ηπιότερες συνθήκες, είναι βιοδιασπώμενα, μειώνουν την κατανάλωση ενέργειας και νερού, ενώ ταυτόχρονα βελτιώνεται η απόδοση και μειώνονται οι ποσότητες των υποπροϊόντων.

Η κυτταρίνη με τη σειρά της είναι μια δομική ένωση, που αποτελείται αποκλειστικά από γλυκόζες που συνδέονται με β -1,4 γλυκοζιδικούς δεσμούς. Λόγω αυτής της σύνδεσης, η κυτταρίνη είναι κρυσταλλική και συμπαγής πράγμα που την καθιστά ιδιαίτερα ανθεκτική. Η ημικυτταρίνη αποτελείται από μια κεντρική αλυσίδα ξυλανών (ενωμένων με β -1,4 γλυκοζιδικούς δεσμούς) με διακλαδώσεις αποτελούμενες από μαννόζη, αραβινόζη, γαλακτόζη, γαλακτουρονικό οξύ κλπ. Η στρατηγική για τη χρήση των ενζύμων, για την παραγωγή βιοαιθανόλης από το άμυλο, περιλαμβάνει δύο στάδια: την διαλυτοποίηση και τη σακχαροποίηση. Η διαλυτοποίηση της α -αμυλάσης πραγματοποιείται από θερμοάντοχα βακτήρια, όπως *Bacillus licheniformis* ή στελεχών *Escherichia coli* και *Bacillus subtilis*, τα οποία μειώνουν το ιξώδες, και μετατρέπουν το άμυλο σε δεξτρίνες. Στη σακχαροποίηση τα ένζυμα μετατρέπουν τις παραγόμενες δεξτρίνες σε γλυκόζη (Sanchez and Cardona, 2008).

Σε αυτό το άρθρο, πραγματοποιήθηκε μια σειρά πειραμάτων, υδρόλυσης ΑΒΠ με διάφορα ένζυμα, καθώς και με οξέα, και ακολούθησε ζύμωση με *Saccharomyces cerevisiae* var. *Bayanus* για την παραγωγή βιο-αιθανόλης. Επίσης μελετήθηκε η αποδοτικότητα της βιομετατροπής και της παραγωγής αιθανόλης.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Δείγματα αποβλήτων της βιομηχανίας πατάτας (ΑΒΠ) παρελήφθησαν από το Εργαστήριο Βιοτεχνολογίας του Εθνικού Ιδρύματος Αγροτικής Έρευνας (www.nagref.gr) στην Ελλάδα και αμέσως ξηράθηκαν. Η υγρασία προσδιορίστηκε σε φούρνο ξήρανσης στους 105°C έως σταθερού βάρους. Τα ολικά σάκχαρα υπολογίστηκαν χρωματομετρικά σύμφωνα με τη μέθοδο του Dubois et al. (1956). Τα ανάγοντα σάκχαρα υπολογίστηκαν σύμφωνα με τη μέθοδο του dinitrosalicylic acid (στα 575 nm), Miller (1959), και εκφράστηκαν σε g L^{-1} γλυκόζης. Για τον προσδιορισμό των ολικών υδατανθράκων, πραγματοποιήθηκε μια αρχική υδρόλυση του δείγματος με HCl 0,5 M για 30 λεπτά στους 90 °C και ακολούθως μέτρηση των σακχάρων. Η περιεχόμενη πρωτεΐνη εκτιμήθηκε με τη μέθοδο Kjeldahl, πολλαπλασιάζοντας το μετρούμενο άζωτο (N) με 6,25. Οι λιπαρές ουσίες μετρήθηκαν με την μέθοδο Soxhlet (AOAC, 1995). Η ανάλυση της συγκέντρωσης σε βαρέα μέταλλα έγινε με ατομική απορρόφηση, σύμφωνα με τις επίσημες μεθόδους για την εξέταση του νερού και υγρών αποβλήτων, (ΑΡΗΑ, 1989). Το άμυλο μετρήθηκε ποσοτικά με kit της Boehringer Mannheim / R-Biopharm, Kit. Cat. No 10207748035. Η αιθανόλη μετρήθηκε με kit της Boehringer Mannheim / R-Biopharm, Kit.Cat. No. 10 176 290 035.

2.1 ΜΙΚΡΟΟΡΓΑΝΙΣΜΟΣ

Η ζύμη *Saccharomyces cerevisiae* var. *bayanus* χρησιμοποιήθηκε για τη ζύμωση των υδρολυμένων αποβλήτων βιομηχανίας πατάτας. Ο μικροοργανισμός προήλθε από την συλλογή του Εργ. Βιοτεχνολογίας του ΕΘΙΑΓΕ. Για την παραγωγή του απαραίτητου εμβόλιου, η ζύμη αναπτύχθηκε αναερόβια σε κωνική φιάλη 250 ml υπό ανάδευση στους 32 °C για 48 h. Το υγρό υπόστρωμα της καλλιέργειας αποτελούσαν από yeast extract (3 g/L), peptone (3,5 g/L), KH_2PO_4 (2 g/L), $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (1 g/L), $(\text{NH}_2)_2\text{SO}_4$ (1 g/L), glucose (10 g/L) και αποσταγμένο νερό. Έξι % εμβόλιο χρησιμοποιήθηκε για τον εμβολιασμό των ΑΒΠ.

2.2 ENZYMA

Για την ενζυμική υδρόλυση των ΑΒΠ χρησιμοποιήθηκαν τα κάτωθι ενζυμικά σκευάσματα, τα οποία τα προμηθευτήκαμε από την Novozymes A/S, Denmark:

- Viscozyme L (V). Η ενεργότητα του Viscozyme L ήταν 120 Fungal Beta-Glucanase (FBG) units/ml.
- Ternamyl 120L (T). Το Ternamyl 120L είναι μία θερμοάντοχη αμυλάση από *Bacillus licheniformis*. Η ενεργότητα του ενζύμου ήταν 120 KNU/g (kilo Novo units of α -amylase).
- Liquozyme Supra (L). Το Liquozyme Supra είναι μια θερμοάντοχη α -amylase από *Bacillus licheniformis*. Η δραστηριότητα του ενζύμου ήταν 200 KNU/g.
- Celluclast 1.5L (C). Το Celluclast 1.5L είναι μία υγρή κυτταρινάση με ενεργότητα 1500 Novo Cellulase units (NCU)/ml. Παράγεται από επιλεγμένα στελέχη του *Trichoderma reesei*.

2.3 ΟΞΙΝΗ ΥΔΡΟΛΥΣΗ

Σε κωνική φιάλη 250 ml Erlenmayer προστέθηκαν 40 g ΑΒΠ (που περιείχαν 85% υγρασία, 6 g ξηρά ουσία και 52,09 % άμυλο ανά ξηρό βάρος), 0,5 % NH_4NO_3 , 0,1 % Peptone και 120 ml HCl 0.5 M. Το μίγμα αποστειρώθηκε στους 121 °C για 15 min. Κατά τη διάρκεια της αποστείρωσης οι υδατάνθρακες των ΑΒΠ, λόγω της όξινης υδρόλυσης, μετατράπηκαν σε ζυμώσιμα σάκχαρα. Μετά την αποστείρωση, το pH του μίγματος διορθώθηκε σε 4,15 με NaOH (1 M).

2.4 ΕΝΖΥΜΙΚΗ ΥΔΡΟΛΥΣΗ

Δύο g από ξηρά απόβλητα πατατοβιομηχανίας (ΑΒΠ) αναμίχθηκαν με 100 ml απιονισμένο νερό. Ακολούθως το μίγμα επεξεργάστηκε με ένζυμα σε δύο ή τρία στάδια. Το πρώτο στάδιο, διαλυτοποίηση, πραγματοποιήθηκε με Ternamyl 120 L στους 85 °C και pH 6,0 και χρόνο αντίδρασης 1 h, ή εναλλακτικά με Liquozyme Supra στους 55 °C, pH 5,5 και χρόνο αντίδρασης 20 h. Το δεύτερο στάδιο, σακχαροποίηση, πραγματοποιήθηκε στους 44 °C, pH 4,6 για 2,5h χρόνο αντίδρασης με το Viscozyme. Ένα επιπλέον στάδιο προστέθηκε χρησιμοποιώντας το Celluclast για την διάσπαση της κυτταρίνης, στους 50 °C, pH 5 για 2 h χρόνο αντίδρασης. Στο τέλος του κάθε σταδίου της ενζυμικής υδρόλυσης, πραγματοποιούνταν απενεργοποίηση του ενζύμου για 10 min στους 95 °C και pH 4,6.

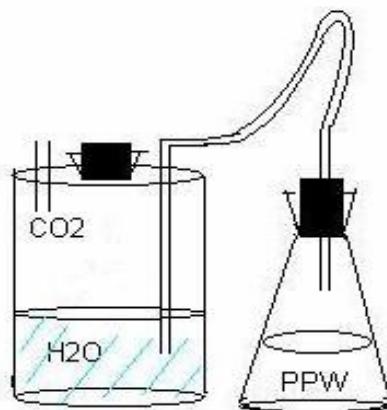
Οι συνδυασμοί των ενζύμων που δοκιμάστηκαν ήταν οι ακόλουθοι:

- a. Liquozyme Supra (L) 1 % (v/w) και Viscozyme (V) 6 FBG Units.
- b. Ternamyl 120L (T) 0,24 KNU και Viscozyme (V) 6 FBG Units.
- c. Ternamyl 120L (T) 0,48 KNU και Viscozyme (V) 12 FBG Units.
- d. Ternamyl 120L (T) 2,4 KNU και Viscozyme (V) 12 FBG Units.
- e. Ternamyl 120L (T) 0,24 KNU, Viscozyme (V) 6 FBG Units και Celluclast (C) 0,5 %
- f. Ternamyl 120L (T) 0,24 KNU, Viscozyme (V) 12 FBG Units και Celluclast (C) 1 %
- g. Ternamyl 120L (T) 0,24 KNU, Viscozyme (V) 24 FBG Units και Celluclast (C) 2 %

2.5 ΖΥΜΩΣΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΙΘΑΝΟΛΗΣ ΑΠΟ ΤΑ ΥΔΡΟΛΥΜΑΤΑ ΤΩΝ ΑΒΠ.

Τα υδρολύματα του αμύλου που παράχθηκαν λόγω της όξινης και της ενζυμικής υδρόλυσής του, ζυμώθηκαν με καλλιέργεια (48h) *Saccharomyces cerevisiae var. bayanus* υπό αναερόβιες συνθήκες (pH 5,0, 32 °C 100 rpm) σε 250 ml Erlenmayer Flask με παγίδα αέρα (Εικόνα 1). Το εμβόλιο ήταν 6% (v/v) και η ζύμωση διήρκησε δύο ημέρες.

Πραγματοποιήθηκαν δύο επαναλήψεις κάτω από τις ίδιες συνθήκες και η μέση τιμή τους δίνεται στα παρουσιαζόμενα αποτελέσματα.



Εικόνα 1. Πειραματική συσκευή για την αναερόβια παραγωγή βιοαιθανόλης από ΑΒΠ (PPW: υδρολύματα των ΑΒΠ).

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Η σύσταση των αποβλήτων βιομηχανίας πατάτας (ΑΒΠ) δίνεται στον Πίνακα 1, ενώ η ανάλυση σε βαρέα μέταλλα στον Πίνακα 2.

Πίνακας 1. Χημική σύσταση Αποβλήτων Βιομηχανίας Πατάτας (ΑΒΠ)

Parameters	% Ξηρού βάρους (Ξ.Β.)
Moisture %	85,06 %
Nitrogen % Ξ.Β.	1,3 %
Protein (Ntot *6.25) % Ξ.Β.	8 %
Total Soluble Sugar % Ξ.Β.	1 %
Total Carbohydrate % Ξ.Β.	58,7 %
Reducing sugar % Ξ.Β.	0,61 %
Fat % Ξ.Β.	2,6 %
Ash % Ξ.Β.	6,34 %
Starch % Ξ.Β.	52,14 %

Πίνακας 2. Σύσταση σε βαρέα μέταλλα των Αποβλήτων Βιομηχανίας Πατάτας (ΑΒΠ)

a/a	PARAMETER	Value (mg kg ⁻¹)
1	Cd	3,66±0,54
2	Total Cr	16,66±1,4
3	Cu	2,66±0,5
4	Pb	74,01±8,3
5	Zn	271±23
6	Ni	253±45
7	Ca	1345±85
8	Na	543±38
9	K	2185±122
10	Fe	1850±210

Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 1, τα Απόβλητα της Βιομηχανίας Πατάτας (ΑΒΠ) έχουν υψηλό περιεχόμενο σε άμυλο (52% d.w.) αλλά τα ανάγοντα – ζυμώσιμα σάκχαρα ήταν πολύ χαμηλά. Για το λόγο αυτό δεν είναι δυνατή η απευθείας ζύμωση του αρχικού προϊόντος, και μια αρχική υδρόλυση του είναι απαραίτητη για την επιτυχία της ζύμωσης.

3.1 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΙΘΑΝΟΛΗΣ ΑΠΟ ΑΒΠ.

3.1.1 Όξινη υδρόλυση.

Μετά την όξινη υδρόλυση των ΑΒΠ, η συγκέντρωση των ολικών σακχάρων ήταν $19,37 \text{ g L}^{-1}$ ενώ τα ανάγοντα σάκχαρα ήταν $18,15 \text{ g L}^{-1}$. Μετά το τέλος της ζύμωσης τα ολικά σάκχαρα μειώθηκαν σε $4,34 \text{ g L}^{-1}$ και τα ανάγοντα σάκχαρα σε $4,06 \text{ g L}^{-1}$. Η κατανάλωση σε ανάγοντα σάκχαρα κατά τη διάρκεια της ζύμωσης ήταν $14,08 \text{ g L}^{-1}$.

Η συγκέντρωση της αιθανόλης που παράχθηκε κατά τη διάρκεια της ζύμωσης ήταν $6,97 \text{ g L}^{-1}$. Έτσι η απόδοση $Y_{p/s}$ ($\text{g προϊόντος/g καταναλισκόμενων σακχάρων}$) ήταν 0,463 (46,3%). Αυτή η τιμή αντιστοιχεί στο 92,6 % της max θεωρητικά υπολογιζόμενης τιμής. Σύμφωνα με την εξίσωση μετατροπής της γλυκόζης σε αιθανόλη, από 1 mol γλυκόζης παράγονται 2 mol αιθανόλης και 2 mol διοξειδίου του άνθρακα. Η θεωρητική παραγωγή αιθανόλης είναι $0,51 \text{ kg αιθανόλης / kg γλυκόζης}$. Ωστόσο, πρακτικά, μια ποσότητα γλυκόζης χρησιμοποιείται από τους μικροοργανισμούς για την ανάπτυξή τους και για την κάλυψη των ενεργειακών τους αναγκών. Έτσι η πραγματική απόδοση δεν υπερβαίνει το 95 % (Badger, 2002).

3.1.2 Ενζυμική υδρόλυση.

Ο βαθμός της υδρόλυσης του περιεχόμενου αμύλου των ΑΒΠ εξαρτάται από διάφορους παράγοντες από την συγκέντρωση του αρχικού προϊόντος, τον τύπο και τη συγκέντρωση των χρησιμοποιούμενων ενζύμων, καθώς και από τις συνθήκες της υδρόλυσης όπως pH, θερμοκρασία κλπ.

Αρχικά διερευνήθηκε η δυνατότητα του κάθε ενζύμου, να διασπάσει μόνο του το περιεχόμενο άμυλο των ΑΒΠ. Η χρήση του Ternamyl απελευθέρωσε $4,65 \text{ g L}^{-1}$, του Liquozyme $4,03 \text{ g L}^{-1}$ και το Viscozyme μόνο $0,7 \text{ g L}^{-1}$. Τα Ternamyl και Liquozyme χρησιμοποιούνται για την διαλυτοποίηση του αμύλου, ενώ το Viscozyme για την σακχαροποίηση. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η χρήση μόνο ενζύμων σακχαροποίησης δεν είναι αποδοτική και η χρήση των ενζύμων της διαλυτοποίησης, σαν αρχικό στάδιο της υδρόλυσης του αμύλου, είναι απαραίτητη.

Στον Πίνακα 3, δίνονται οι τιμές των συγκεντρώσεων των αναγόντων σακχάρων που απελευθερώθηκαν κατά τη διάρκεια της ενζυμικής υδρόλυσης, τα εναπομείναντα ανάγοντα σάκχαρα μετά το τέλος της ζύμωσης, από το *S. cerevisiae var. bayanus* καθώς και η κατανάλωση των σακχάρων κατά τη διάρκεια της ζύμωσης.

Λόγω του χαμηλού ποσού αναγόντων σακχάρων που απελευθερώθηκαν, καθώς και του μεγάλου απαιτούμενου χρόνου αντίδρασης, (20 h), απορρίψαμε το Liquozyme για τη διαλυτοποίηση του αμύλου και επιλέξαμε το Ternamyl με υψηλότερη υδρόλυση σε ανάγοντα σάκχαρα και με σημαντικά μικρότερο χρόνο αντίδρασης (1 h).

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η χρησιμοποίηση του Celluclast αύξησε το περιεχόμενο σε ανάγοντα σάκχαρα, λόγω της πρόσθετης διάσπασης της κυτταρίνης. Υψηλότερες συγκεντρώσεις ενζύμων οδήγησαν σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις απελευθερωμένων αναγόντων σακχάρων. Ο ενζυμικός συνδυασμός με την μεγαλύτερη απελευθέρωση αναγόντων σακχάρων $18,48 \text{ g L}^{-1}$, ήταν ο (g) Ternamyl 0,24 KNU + Viscozyme 24 FBGU + Celluclast 2 %. Με αυτό το συνδυασμό, η συγκέντρωση των αναγόντων σακχάρων στο τέλος της ζύμωσης ήταν $1,93 \text{ g L}^{-1}$. Έτσι η κατανάλωση σακχάρων ανήλθε σε $16,55 \text{ g L}^{-1}$.

Πίνακας 3. Ανάγοντα σάκχαρα που απελευθερώθηκαν από την ενζυμική υδρόλυση των ΑΒΠ, εναπομείναντα σάκχαρα στο τέλος της ζύμωσης των ΑΒΠ και συνολική κατανάλωση σακχάρων.

	Enzyme Combinations	Hydrolysate reducing sugar g L^{-1}	Reducing sugar after fermentation g L^{-1}	Consumed sugar g L^{-1}
a	Liquozyme 1 % (v/w) + Viscozyme 6 FBGU	14,06	1,46	12,60
b	Ternamyl 0,24 KNU + Viscozyme 6 FBGU	10,27	1,09	9,18
c	Ternamyl 0,48 KNU + Viscozyme 12 FBGU	16,82	1,82	15,00
d	Ternamyl 2,4 KNU + Viscozyme 12 FBGU	14,68	1,61	13,07
e	Ternamyl 0,24 KNU + Viscozyme 6 FBGU + Celluclast 0,5 %	16,99	2,03	14,96
f	Ternamyl 0,24 KNU + Viscozyme 12 FBGU+ Celluclast 1 %	18,32	2,11	16,21
g	Ternamyl 0,24 KNU + Viscozyme 24 FBGU+ Celluclast 2 %	18,48	1,93	16,55

Πίνακας 4. Παραγωγή αιθανόλης (g L^{-1}), απόδοση και % της max θεωρητικά υπολογιζόμενης τιμής κατά τη ζύμωση των ΑΒΠ.

	Enzyme Combinations	Ethanol g L^{-1}	Y p/s	% max θεωρητικά υπολογιζόμενης τιμής
a	Liquozyme 1 % (v/w) + Viscozyme 6 FBGU	5,82	0,462	92,40
b	Ternamyl 0,24 KNU + Viscozyme 6 FBGU	4,22	0,459	91,80
c	Ternamyl 0,48 KNU + Viscozyme 12 FBGU	7,00	0,467	93,38
d	Ternamyl 2,4 KNU + Viscozyme 12 FBGU	6,02	0,460	92,10
e	Ternamyl 0,24 KNU + Viscozyme 6 FBGU + Celluclast 0,5 %	6,82	0,456	91,24
f	Ternamyl 0,24 KNU + Viscozyme 12 FBGU+ Celluclast 1 %	7,50	0,463	92,54
g	Ternamyl 0,24 KNU + Viscozyme 24 FBGU+ Celluclast 2 %	7,58	0,458	91,64

Στον Πίνακα 4 δίνεται η παραγωγή αιθανόλης κατά τη διάρκεια της ζύμωσης, (g L^{-1}), η απόδοση σε προϊόν της διαδικασίας Y p/s ($\text{g προϊόντος} / \text{g καταναλισκόμενων σακχάρων}$) και το % της max θεωρητικά υπολογιζόμενης τιμής με τη χρήση διαφόρων

ενζυμικών συνδυασμών. Σε όλες τις περιπτώσεις, η ζύμη *S. cerevisiae* παράγαγε υψηλές ποσότητες αιθανόλης ($6 - 7,6 \text{ g L}^{-1}$), με την εξαίρεση του συνδυασμού (b) που έδωσε χαμηλή παραγωγή σε αιθανόλη ($4,2 \text{ g L}^{-1}$). Η απόδοση σε αιθανόλη $Y_{p/s}$ ($\text{g προϊόντος} / \text{g καταναλισκόμενων σακχάρων}$) ήταν περίπου 0,46. Σε όλες τις περιπτώσεις η παραγωγή αιθανόλης αντιστοιχούσε σε πάνω από το 91% της μέγιστης θεωρητικά υπολογιζόμενης τιμής.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Είναι φανερό, ότι η ενζυμική υδρόλυση των ΑΒΠ, απελευθέρωσε περισσότερα ανάγοντα σάκχαρα, συγκριτικά με την όξινη υδρόλυση. Ο συνδυασμός των ενζύμων με την μεγαλύτερη απελευθέρωση σακχάρων $18,48 \text{ g L}^{-1}$ ήταν Ternamyl 0,24 KNU + Viscozyme 24 FBGU + Celluclast 2 % και παρήχθησαν $7,78 \text{ g L}^{-1}$ αιθανόλης. Η απόδοση παραγωγής της αιθανόλης αντιστοιχεί στο 91,6 % της max θεωρητικά υπολογιζόμενης τιμής.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η κρίσιμη παράμετρος για την παραγωγή αιθανόλης από υδρολύματα ΑΒΠ, είναι ο συνδυασμός των χρησιμοποιούμενων ενζύμων για την υδρόλυση του αμύλου, και η δόση που χρησιμοποιείται. Αυτά είναι υπεύθυνα για την υψηλότερη ή χαμηλότερη απελευθέρωση αναγόντων σακχάρων. Ακολούθως η ζύμωση με *S. cerevisiae* έχει τη δυνατότητα να μετατρέπει τα σάκχαρα αυτά σε αιθανόλη, με πολύ υψηλή απόδοση.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι, τα απόβλητα της βιομηχανίας πατάτας (ΑΒΠ), ένα παραπροϊόν με μηδενικό κόστος μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά για την παραγωγή βιοαιθανόλης. Η παραγωγή αιθανόλης από ΑΒΠ είναι μια εφικτή επιλογή υπό την προϋπόθεση ότι αυτό θα επιβεβαιωθεί από τεχνικό-οικονομικές μελέτες. Επίσης, η προθυμία των εταιριών να συμμετέχουν και να αφιερώσουν πόρους προς αυτή την κατεύθυνση θα παίζει σημαντικό ρόλο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- American Public Health Association (APHA). 1989. *Standard Methods for the examination of water and wastewater*, 17th edn, Washington D.C.
- AOAC., 1995. *Official Methods of Analysis of AOAC International*, 16th edn., ed. P. Cunniff. AOAC International, Arlington, Virginia, USA.
- Arapoglou D., Vlyssides A., Varzakas Th., Haidemenaki K., Malli V., Marchant R. and Israilides C., 2009. *Alternative ways for potato industries waste utilisation*. Proc. 11th Inter. Conf. Envir. Sci. Techn., CEST2009, September 3-5, 2009, Chania, Crete, GREECE.
- Berna G., 1998. *Integrated biomass system*. Luxembourg: Office for Official Publications of the EC; p27.
- Badger, P.C., 2002. *Ethanol from cellulose: A general review*. In: J. Janick and A. Whipkey (Editors), Trends in new crops and new uses. ASHS Press, Alexandria, VA. pp. 17-21.
- Dubois M., Gills K.A., Hamilton J.K., Rebers P.A. and Smith F., 1956. *Colorimetric method for determination of sugars and related substances*. Anal. Chem., 28: 350-356.
- Gray A.K., Zhao L. and Emptage M., 2006. *Bioethanol*. Current Opinion in Chemical Biology, 10: 141-146.

- Miller G.L., 1959. *Use of dinitro-salicylic acid reagent for determination of reducing sugar*. Anal Chem, 31: 426-428.
- Mojovic L., Nikolic S., Rakin M. and Vukasinovic M., 2006. *Production of bioethanol from corn meal hydrolyzates*. Fyvel, 85: 1750-1755.
- Sanchez O. and Cardona C., 2008. *Trends in biotechnological production of fuel ethanol from different feedstocks*. Bioresource Technology, 99: 5270-5295.
- Scieber A., Stintzing F.C. and Carle A., 2001. *By-products of plant food processing as a source of functional compounds – recent developments*. Trends in Food Science and Technology, 1: 401-413.
- ZMP (Zentrale Markt- und Preisberichtsstelle GmbH), 2000. *ZMP-Marktbilanz Kartoffeln*. Bonn, ZMP.

**ΥΔΡΕΥΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΧΕΤΕΥΣΗ ΣΤΗ ΜΙΝΩΙΚΗ ΚΡΗΤΗ:
ΜΑΘΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΚΑΤΑΘΗΚΕΣ
Α. Ν. Αγγελάκης**

Ινστιτούτο Ηρακλείου, Εθνικό Ίδρυμα Αγροτικών Ερευνών, 711 10 Ηράκλειο,
info@a-angelakis.gr.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αρχαιολογικές και άλλες μαρτυρίες υποδεικνύουν ότι στην Κρήτη, κατά τη διάρκεια της μεσο-μινωικής περιόδου, εφαρμόστηκαν προωθημένες υδραυλικές και υγειονομικές τεχνικές στη διαχείριση του πόσιμου νερού και των υγρών αποβλήτων των μινωικών οικισμών. Αυτές συμπεριλαμβάνουν την κατασκευή και χρήση υδραγωγείων, υδατοδεξαμενών, δικτύων υδροδότησης, κρηνών, λουτρών και άλλων εγκαταστάσεων υγιεινής, καθώς και συστημάτων αποχέτευσης και διάθεσης των υγρών αποβλήτων και των νερών της βροχής. Η υδραυλική και αρχιτεκτονική λειτουργία των συστημάτων ύδρευσης και αποχέτευσης στα ανάκτορα και τους οικισμούς θεωρούνται ως ένα από τα πιο αξιόλογα χαρακτηριστικά του μινωικού πολιτισμού. Τα συστήματα αυτά ήταν τόσο προηγμένα ώστε να μπορούν να συγκριθούν με τα αντίστοιχα σύγχρονα συστήματα, που καθιερώθηκαν μόλις στο δεύτερο μισό του 19^{ου} αιώνα στις ευρωπαϊκές και αμερικανικές πόλεις.

**WATER SUPPLY AND SEWAGE IN MINOAN CRETE:
LESSONS AND LEGACIES
A.N. Angelakis**

Institute of Iraklion, National Foundation for Agricultural Research, 711 10
Iraklion, Greece, info@a-angelakis.gr).

ABSTRACT

Archaeological and other evidence indicate that, during the Middle Bronze Age, advanced water supply, wastewater, and stormwater management and sanitary techniques were practised in Minoan settlements. These include the construction and use of aqueducts, water cisterns, fountains, bathrooms and other sanitary facilities, as well as wastewater and stormwater sewer systems. The hydraulic and architectural function of water supply network and sewer systems in palaces and cities are regarded as one of the salient characteristics of the Minoan civilization. These systems were so advanced that can be compared with the modern systems, which were established only in the second half of the 19th century in European and American cities.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Για να πάμε μπροστά πρέπει να κοιτάζουμε και προς τα πίσω
Θεόδωρος Κολοκοτρώνης (1770-1843)

Παρ' όλο που λίγα είναι γνωστά για την προμινωική εποχή (πριν από το *ca.* 3200 π.χ.), σοβαρές ιστορικές, αρχαιολογικές και άλλες αποδείξεις παραπέμπουν σε μια αναδύομενη πολιτιστική ανάπτυξη εκείνης της περιόδου στην Κρήτη. Η σοβαρή «πολιτιστική έκρηξη», που συναντάται στη συνέχεια, αναφέρεται σε πολλά πολιτιστικά και επιστημονικά θέματα, τυπικά της εποχής μας, όπως η αρχιτεκτονική, ο πολεοδομικός σχεδιασμός, ο υγιεινός και καλαίσθητος τρόπος ζωής, η πρόοδος στη γεωργία, στη δασοπονία και στη ναυτιλία και η περιβαλλοντική και κοινωνική ευαισθησία (Angelakis and Spyridakis, 2010; Angelakis and Spyridakis, 2012). Αυτή η πολιτιστική άνθιση ήταν εντονότερη κατά τη διάρκεια των σχετικά ψυχρών και υγρών περιόδων (Angelakis and Spyridakis, 1996a).

Επιπλέον, δεν είναι τυχαίο ότι υδραυλικά και άλλα τεχνικά έργα, που σχετίζονται με τη διαχείριση των υδατικών πόρων σε επίπεδο λεκάνης απορροής και την ανάπτυξη υδατικών πόρων (όπως είναι τα υδραγωγεία, στέρνες, πηγάδια, τα λουτρά και οι τουαλέτες, τα πλυσταριά, οι δεξαμενές αποθήκευσης και διανομής νερού και τα αποχετευτικά δίκτυα, συμπεριλαμβανομένων των θέσεων διάθεσης των εκροών των αποβλήτων), είναι γνωστά, τουλάχιστο σ' ό,τι αφορά τις βασικές αρχές τους, από το *ca.* 3200 π.Χ. και μετά (κατά τη πρωτομινωική περίοδο, *ca.* 3200-2000 π.Χ.). Γενικά διαπιστώνεται ότι οι περίοδοι έντονης κοινωνικής ανάπτυξης και πολιτιστικών εκρήξεων, όπως και τα παραδοσιακά κριτήρια επιλογής των θέσεων εγκατάστασης και ανάπτυξης των τοπικών κοινωνιών, σχετίζονται με τις συνθήκες προστασίας, την καλαισθησία και το περιβάλλον, την επάρκεια τροφών και κυρίως τη διαθεσιμότητα υδατικών πόρων (Angelakis *et al.*, 2012a).

Η αρχή ότι το παρελθόν αποτελεί το κλειδί για το μέλλον έχει ιδιαίτερη σημασία, όταν αναφέρεται σε αντικείμενα υδατικών πόρων. Σε πολλά τέτοια αντικείμενα οι βασικές αρχές σχεδιασμού και κατασκευής τους αναφέρονται στην εποχή του Μινωικού πολιτισμού. Αρχαιολογικές και άλλες μαρτυρίες υποδεικνύουν ότι στην Κρήτη, κατά τη διάρκεια της Μέσης Μινωικής περιόδου (*ca.* 2000-1600 π. Χ), εφαρμόστηκαν προωθημένες υδραυλικές και υγειονομικές τεχνικές στη διαχείριση του νερού των Μινωικών οικισμών (Angelakis and Spyridakis, 2012). Μια εντυπωσιακή ένδειξη σχετική με αυτό καταδεικνύεται από τις προωθημένες τεχνικές που εφαρμόστηκαν στην ύδρευση και αποχέτευση την περίοδο αυτή. Αυτές συμπεριλαμβάνουν διάφορες επιστημονικές περιοχές των υδατικών πόρων, καθώς επίσης της υδρολογίας του υπόγειου νερού, τα δίκτυα νερού, και κυρίως εκείνων της οικιστικής χρήσης, την αξιοποίηση και χρήση επιφανειακών πόρων, την κατασκευή λουτρών και άλλων κατασκευών υγιεινής και κάθαρσης, των συστημάτων αποχέτευσης και διάθεσης υγρών αποβλήτων και των νερών της βροχής, και τέλος, της χρησιμοποίησης νερού για αναψυχή (Angelakis *et al.*, 2012a). Η υδραυλική και αρχιτεκτονική λειτουργία των συστημάτων υδροδότησης και αποχέτευσης στα ανάκτορα και τους οικισμούς, θεωρούνται ως ένα από τα πιο αξιόλογα χαρακτηριστικά του Μινωικού πολιτισμού. Τα συστήματα αυτά ήταν τόσο προηγμένα, ώστε να μπορούν να συγκριθούν με τα αντίστοιχα σύγχρονα συστήματα, που καθιερώθηκαν μόλις στο δεύτερο μισό του 19ου αιώνα στις ευρωπαϊκές και αμερικανικές πόλεις (Angelakis and Spyridakis, 2010; Angelakis and Spyridakis, 2012).

Οι υδροτεχνολογίες, που αναπτύχθηκαν την εποχή αυτή, επηρεάστηκαν τόσο από τις τοπικές υδρογεωλογικές, όσο κι από τις κλιματικές συνθήκες. Στη Μινωική εποχή παρατηρείται εναλλαγή μακρών σειρών ετών υγρών-ψυχρών και θερμών-ξηρών

περιόδων, με την πολιτιστική άνθιση να συντελείται κυρίως κατά τη διάρκεια υγρών και ψυχρών περιόδων.

Σ' αυτό το άρθρο αναφέρονται μερικές από τις σημαντικότερες υδροδοτικές και υγειονομικές πρακτικές και τεχνολογίες των Μινωιτών, που φαίνεται να αποτελούν την αρχή ανάπτυξης υδραυλικών και υγειονομικών τεχνολογιών, όπως είναι τα υδραγωγεία, οι στέρνες, τα πηγάδια, τα συστήματα υδροδότησης και αποχέτευσης και η χρήση νερού για αναψυχή και προαγωγή του αστικού περιβάλλοντος. Οι τεχνολογίες αυτές αναπτύχθηκαν περαιτέρω κατά τη διάρκεια των Ελληνιστικών και κυρίως των Ρωμαϊκών περιόδων (De Feo *et al.*, 2011).

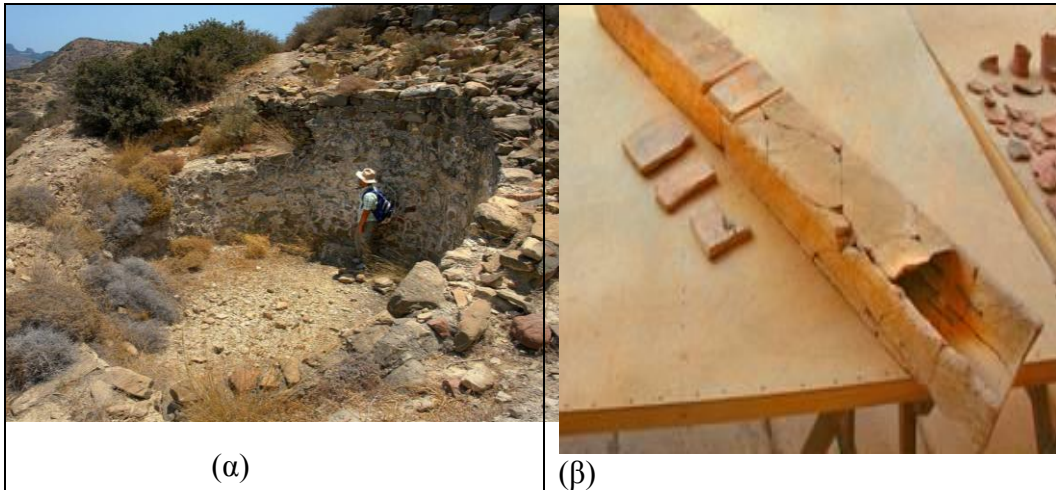
2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΥΔΡΕΥΣΗΣ

Οι συνθήκες υδροδότησης των ανακτόρων και άλλων οικιστικών εγκαταστάσεων, διαφοροποιούνται όχι μόνο ανάλογα με τις χρονικές περιόδους, αλλά και ανάλογα με τις υδρολογικές συνθήκες της κάθε περιοχής (Koutsoyiannis *et al.*, 2008). Έτσι, οι βασικές Μινωικές τεχνολογίες και πρακτικές ύδρευσης, που εφαρμόζονταν, διακρίνονται σε τρεις κυρίως κατηγορίες:

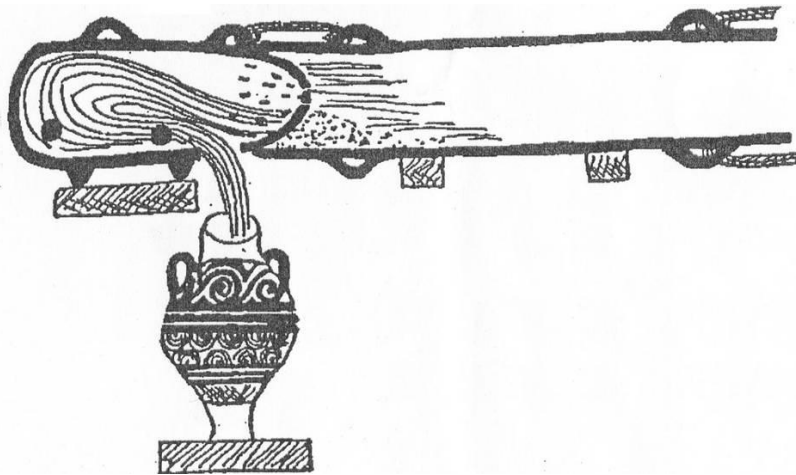
α) Σε αστικές περιοχές σε σχετικά υψηλά υψόμετρα και έλλειψη υπόγειων υδροφορέων, αλλά και άλλων πηγών νερού, η υδατική οικονομία βασιζόταν στη συλλογή και αποθήκευση σε υπόγειες δεξαμενές επιφανειακών απορροών κατά την περίοδο των βροχοπτώσεων. Σ' αυτές τις περιπτώσεις είναι χαρακτηριστική η διευθέτηση πλατειών, αυλών και άλλων ανοιχτών χώρων κατάλληλα, ώστε να καθαρίζονται επιμελώς πριν από τη διαδικασία συλλογής με την επιμελή δημιουργία υποτυπωδών αυλάκων συλλογής ή ειδικών πήλινων αγωγών (Εικ. 1), που όμως δεν επηρεάζουν άλλες λειτουργίες των θεωρούμενων χώρων (Angelakis *et al.*, 2007). Επίσης, παραπλεύρως των δεξαμενών αποθήκευσης, κατασκευάζονται αμμοδιυλιστήρια για την επεξεργασία του επιφανειακού νερού πριν από την αποθήκευσή του σε καλαίσθητες, προστατευμένες και πολύ λειτουργικές υπόγειες δεξαμενές (Angelakis and Koutsoyiannis, 2003). Τέτοιες εγκαταστάσεις παρατηρούνται στη Φαιστό, στο Χαμέζι, και στο Μύρτου-Πύργος, όπου δεν ήταν διαθέσιμες άλλες πηγές νερού. Σημειώνεται ότι ο καθηγητής Μ. Δέφνερ περιγράφει πήλινες στενόμακρες κατασκευές (υδραυλικά φίλτρα) με μικρές οπές στο ένα άκρο (Defner, 1921), που πιθανόν χρησιμοποιούνταν ως μικρά διυλιστήρια στις εξόδους του νερού από τα υδραγωγεία (Σχήμα 1). Η στροβιλώδης ροή του νερού δημιουργεί μικρές σχετικά πιέσεις στα εξωτερικά διάτρητα τοιχώματα εξαιτίας της μεγάλης ταχύτητας ροής. Έτσι, η εκροή απαλλάσσεται από αιωρούμενα και διαλυτά στερεά.

β) Σε περιοχές με πηγαία νερά η μεταφορά του νερού ύδρευσης σε ανάκτορα και άλλους κατοικήσιμους χώρους δε γινόταν μόνο με κτιστούς αγωγούς, όπως στην Ενετοκρατία και αργότερα κατά την Τουρκοκρατία, αλλά σε συνδυασμό ανοικτών αγωγών (πήλινων ή πέτρινων) και κλειστών (πήλινων) σωλήνων, που κατασκευάζονταν επιμελώς, ώστε ο ένας να συνδέεται με τον άλλο με ειδική συνθετική ύλη (Εικ. 2). Γενικά οι Μινωίτες χρησιμοποιούσαν πολλούς τύπους πέτρινων και πήλινων αγωγών και σωλήνων στην ύδρευση και αποχέτευση των οικισμών τους (Angelakis *et al.*, 2012b). Οι κλειστοί σωλήνες ήταν σχήματος κωνικού, μήκους 70-75 cm (Angelakis and Spyridakis, 2012). Τέτοιοι αγωγοί χρησιμοποιούνταν στο ανάκτορο της Κνωσού για τη μεταφορά του νερού ύδρευσης αρχικά από την πηγή «Μαυροκόλυμπος» και αργότερα από άλλες γειτονικές πηγές (Angelakis *et al.*, 2007). Επίσης, η ίδια τεχνολογία εφαρμόστηκε στη διανομή του νερού σε άλλους Μινωικούς οικισμούς (Εικ. 2). Ο σχεδιασμός αυτών των σωλήνων διαφέρει σημαντικά από αυτούς κυλινδρικής γεωμετρίας και σχεδόν σταθερής διαμέτρου, που χρησιμοποιούσαν μετέπειτα οι

Έλληνες και οι Ρωμαίοι (De Feo *et al.*, 2011). Ένα πιθανό πλεονέκτημα των κωνικών σωλήνων είναι η διευκόλυνση της σύνδεσης τους και η τέλεια στεγανοποίηση των αρμών με πηλό ή άλλο υλικό, ώστε να μπορούν ενδεχομένως να λειτουργήσουν υπό χαμηλή πίεση. Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι η αύξηση της ταχύτητας ροής στο τέλος του κάθε τμήματος σωλήνα και η αποφυγή εναπόθεσης ιζημάτων, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις νερών με υψηλό pH. Αυτά τα ενδεχόμενα πλεονεκτήματα και πιθανόν κι' άλλα, διερευνούνται σε πείραμα, που είναι σε εξέλιξη στο ΕΜΠ, Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Υδραυλικής, με κεραμικούς σωλήνες ίδιων διαστάσεων και υλικών κατασκευής, που κατασκευάστηκαν πρόσφατα (Angelakis *et al.*, 2012b).

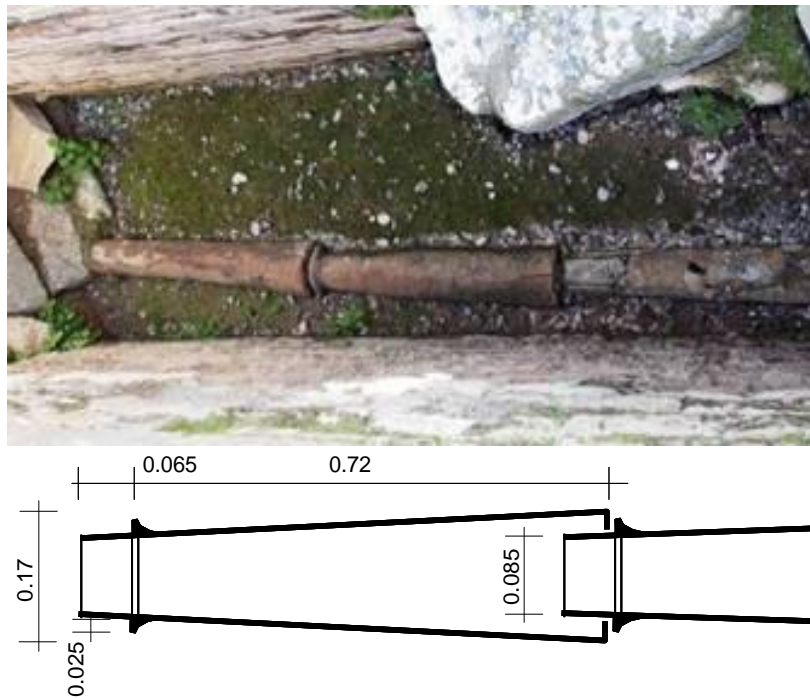


Εικόνα 1. (α) Μινωική δεξαμενή συλλογής και αποθήκευσης νερού και (β) πήλινοι αγωγοί συλλογής όμβριων νερών στο Μινωικό οικισμό Μύρτος-Πύργος ανατολικά της Ιεράπετρας.

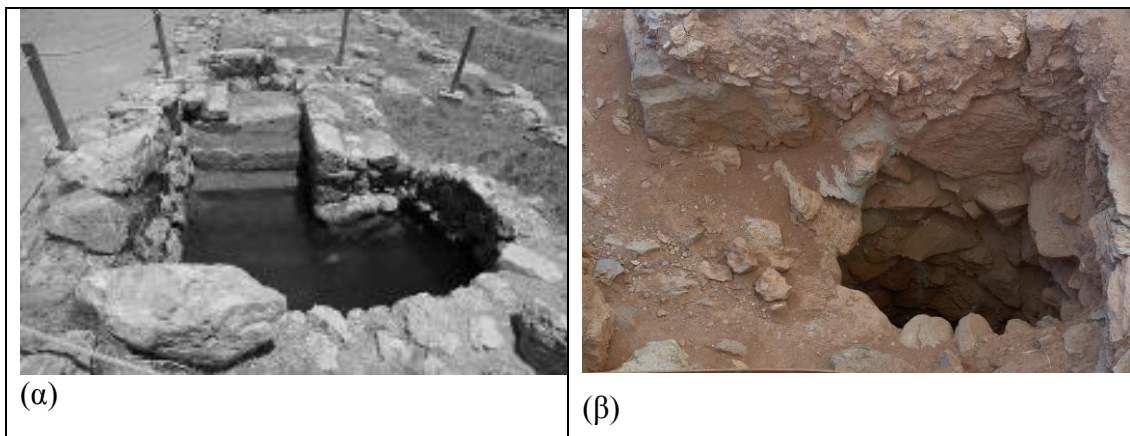


Σχήμα 1. Μινωικό φίλτρο νερού (Σπανάκης, 1981).

γ) Τέλος, σε περιοχές με υπόγειους υδροφορείς, όπως στο ανάκτορο της Ζάκρου και στην πόλη του Παλαιοκάστρου, η τεχνολογία ανόρυξης και άντλησης νερού από πηγάδια φαίνεται να ήταν αρκετά ανεπτυγμένη (Εικ. 3). Το σύνηθες βάθος των πηγαδιών ήταν 12.5m και η διάμετρος τους 1.0m (Mays *et al.*, 2007; Angelakis and Srygidakis, 2012). Η τεχνολογία που εφαρμοζόταν για την άντληση του νερού των πηγαδιών ήταν επίσης αξιοθαύμαστη.



Εικόνα 2. Σωλήνες υδροδότησης της Μινωικής εποχής: Υφιστάμενο πραγματικό τμήμα δικτύου στο ανάκτορο της Κνωσού (άνω) και σχήμα σωλήνα με τις διαστάσεις του (κάτω) (Koutsoyiannis *et al.*, 2008).



Εικόνα 3. Μινωικά πηγάδια: Στο ανάκτορο της Ζάκρου (αριστερά) και (β) στην πόλη του Παλαιοκάστρου στο ανατολικό άκρο της νήσου(δεξιά).

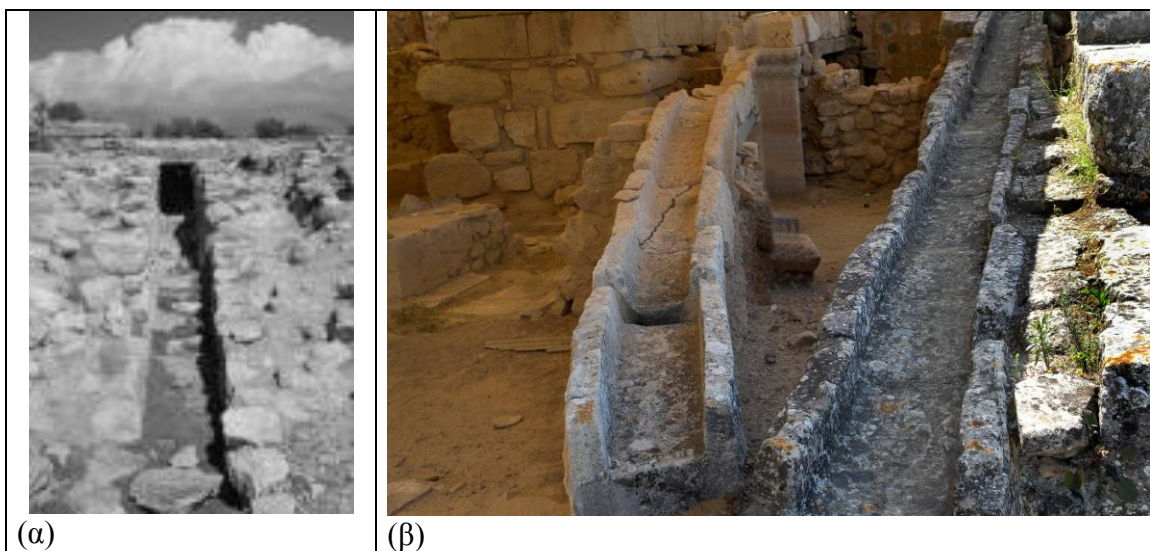
3. ΑΠΟΧΕΤΕΥΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Ένα από τα αξιοπρόσεκτα χαρακτηριστικά του Μινωικού πολιτισμού ήταν η αρχιτεκτονική και η υδραυλική λειτουργία των αποχετευτικών συστημάτων στα ανάκτορα και άλλους οικισμούς. Από το σύνολο των υποδομών του Μινωικού ανάκτορου στην Κνωσό τίποτε δεν είναι πιο αξιοσημείωτο από τα περίπλοκα αλλά πολύ λειτουργικά αποχετευτικά συστήματα, που διέρχονται διά μέσου των δημοτικών εγκαταστάσεων των πόλεων και των γειτονικών συνοικιών τους. Ο Εβανς (1921-1935) και οι Mac Donald και Driessen (1988) αναφέρθηκαν στην πορεία αυτών των αγωγών και σχεδίασαν την πιθανή αρχική τους μορφή, με ιδιαίτερη αναφορά στην αρχιτεκτονική τους. Αυτό το σχέδιο παρέχει στον επισκέπτη ένα βασικό προσανατολισμό της τοποθεσίας και τον βοηθάει να έχει πλήρη αντίληψη του όλου

δικτύου. Το συνολικό μήκος του αποχετευτικού συστήματος, συμπεριλαμβανομένων των κεντρικών και δευτερευόντων αγωγών του, υπερβαίνει τα 150 m. Το μικρό μέγεθος των αγωγών σε ορισμένα τμήματά του, οι κλίσεις και οι γωνίες εμποδίζουν τη λεπτομερή διερεύνηση του δικτύου (Angelakis *et al.*, 2005).

Από ένα μέρος του κεντρικού διοικητηρίου του ανακτόρου του Μίνωα, το επιφανειακό νερό συλλεγόταν από ένα πολύ μεγάλο σε χωρητικότητα υπόγειο τούνελ, κτισμένο από πέτρα, το οποίο διερχόταν κάτω από το διάδρομο που οδηγούσε στη βόρεια είσοδο και μέσα στο οποίο αποχετεύονταν τα υγρά απόβλητα από διάφορες συνοικίες. Το πιο εξερευνημένο μέρος του αποχετευτικού συστήματος του ανακτόρου είναι το τμήμα που διερχόταν υπογείως των συνοικιών, το οποίο σχημάτιζε ένα μεγάλο κύκλο, με το υψηλότερο σημείο του τοποθετημένο κάτω από τη δεξαμενή αποθήκευσης, δίπλα στη μεγάλη σκάλα, ανατολικά του ανακτόρου. Τουαλέτες όπως αυτή στο χαμηλότερο πάτωμα του ανακτόρου καθαρίζονταν πιθανότατα με το νερό της βροχής. Κατακόρυφοι σωλήνες συνέλεγαν νερό από την ταράτσα και το διαμοίραζαν κατά πάσα πιθανότητα στις τουαλέτες των τελευταίων πατωμάτων. Οι αγωγοί, κτισμένοι με κατεργασμένες πέτρες, ήταν αρκετά μεγάλοι, ώστε να είναι δυνατός ο καθαρισμός και η συντήρησή τους. Στην πραγματικότητα υπήρχαν μικρά ανοίγματα γι' αυτό το σκοπό. Ανοίγματα των αγωγών βοηθούσαν στην εξαέρωση τους. Η έξοδος του κεντρικού αποχετευτικού συστήματος του ανακτόρου της Φαιστού φαίνεται στην Εικόνα 4α.

Γενικά οι υδραυλικές εγκαταστάσεις και ειδικά οι αγωγοί αποχέτευσης και μεταφοράς νερού στις Μινωικές πόλεις ήταν σχεδιασμένοι «τέλεια». Είναι αποδεδειγμένο ότι σε πολλές πόλεις τα αποχετευτικά συστήματα, καλυμμένα με πέτρα ή κτισμένα από μάρμαρο, αποχέτευαν τα υγρά απόβλητα μαζί με τα νερά της βροχής. Επίσης, νερό της βροχής συλλεγόταν από οροφές κτιρίων σε δεξαμενές αποθήκευσης και χρησιμοποιούνταν για να καθαρίζουν αγωγούς αποχέτευσης και τουαλέτες.



Εικόνα 4. Τμήματα των κεντρικών αποχετευτικών συστημάτων: (α) του ανακτόρου της Φαιστού (αριστερά) και (β) της βίλας Αγίας Τριάδας.

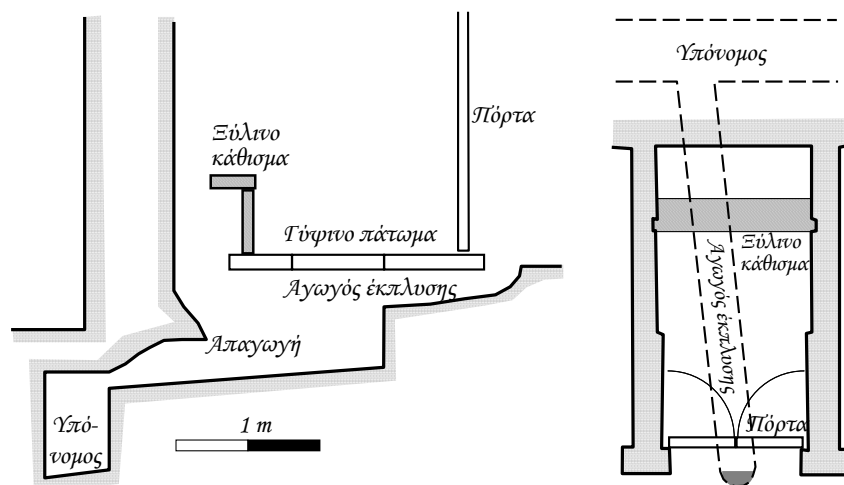
Τέλος, στη βίλα της Αγίας Τριάδας ανακαλύφθηκε το πιο προωθημένο αποχετευτικό σύστημα, τόσο των υγρών αστικών αποβλήτων, όσο και των όμβριων νερών σε ολόκληρη την ιστορία του Μινωικού πολιτισμού. Στις αρχές του 20ού αιώνα, αναφέρεται ότι ο συγγραφέας Angelo Mosso επισκέφθηκε την Αγία Τριάδα, κατά τη διάρκεια μιας έντονης νεροποντής και παρατήρησε ότι το όλο αποχετευτικό σύστημα

λειτουργούσε τέλεια εξαιτίας της υδροδυναμικής προώθησης, που δημιουργείται από την υψομετρική διαφορά και το σχήμα του αγωγού (Εικ. 4β). Ο Mosso, που ήταν επίσης διάσημος υγειονόλογος επιστήμονας, αναφέρει ότι σε ολόκληρη την ιστορία του ανθρώπινου γένους δεν υπάρχει άλλο τέτοιο παράδειγμα, που το αποχετευτικό δίκτυο να λειτουργεί τέλεια ύστερα από *ca.* 4.000 έτη. Επομένως, οι Μινωίτες υδραυλικοί σχεδίαζαν και υλοποιούσαν έργα που λειτουργούσαν για πολλούς αιώνες, σε αντίθεση με τους σημερινούς, που η λειτουργία ενός έργου για 40-50 έτη θεωρείται ικανοποιητική.

4. ΛΟΥΤΡΑ ΚΑΙ ΑΛΛΕΣ ΥΓΕΙΟΝΟΜΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ

Στα Μινωικά ανάκτορα αποχετευτικοί αγωγοί των λουτρών δεν ήταν πάντοτε απαραίτητοι, αν και χρήσιμοι. Στην πραγματικότητα τα περισσότερα ανάκτορα δε διέθεταν τέτοιους αγωγούς. Παρ' όλο που η λειτουργικότητα των δωματίων είναι δύσκολο να προσδιοριστεί, ο Έβανς αναγνώρισε στην Κνωσό τρία δωμάτια ως λουτρά. Τα λουτρά και οι δεξαμενές νερού ήταν χώροι απαραίτητοι στους Μινωικούς οικισμούς, χώροι ιεροί για τις καθάρσεις, κάτι παρόμοιο με τα χριστιανικά καθαρτήρια. Οι δεξαμενές των καθαρμών ήταν απαραίτητες σ' όλους τους Μινωικούς οικισμούς, γιατί η Μινωική θρησκεία απαιτούσε από τους πιστούς να είναι πάντοτε καθαροί. Χαρακτηριστικές είναι οι εγκαταστάσεις στο «Καραβάν Σεράι», που βρίσκεται απέναντι από την κυρία είσοδο του ανακτόρου της Κνωσού. Εκεί ήταν πάντοτε διαθέσιμο νερό από το υδραγωγείο της Κνωσού για τον καθαρισμό των επισκεπτών. Εκεί υπήρχε και η λεγόμενη «ιερή κρήνη» (Pendlebury, 1950).

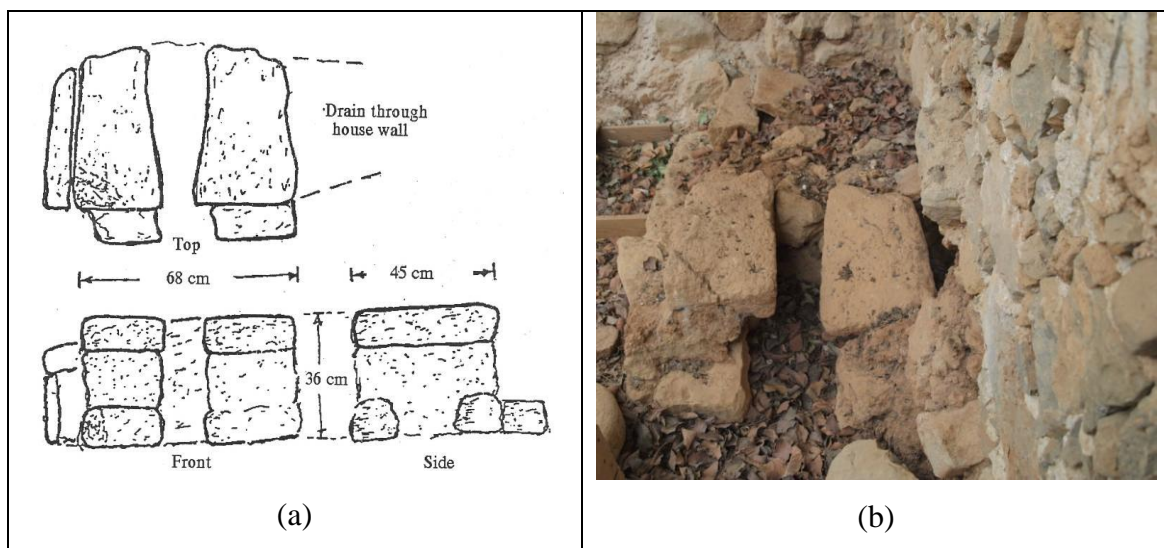
Ο βασικός τύπος λουτρών είναι αυτός που βρέθηκε δίπλα στην τραπεζαρία της βασίλισσας του ανακτόρου της Κνωσού. Αυτός ο τύπος λουτρού ομοιάζει με αυτά που βρέθηκαν στη Φαιστό και στα Μάλια. Η διαφορά ωστόσο είναι ότι το δάπεδο του ανακτόρου της Κνωσού δεν ήταν στο κατώτερο επίπεδο. Τμήματα πήλινων αγωγών βρέθηκαν λίγο έξω από την πόρτα του δωματίου. Προφανώς το νερό περνούσε μέσα από ένα μικρό κανάλι στο πάτωμα, που άρχιζε ακριβώς έξω από την πόρτα του λουτρού. Ένας αγωγός κάτω από το πάτωμα συνέδεε το άνοιγμα με τον πήλινο αγωγό κάτω από τη λεκάνη (Σχήμα 2). Η τουαλέτα μπορούσε επίσης να καθαριστεί ακόμη και κατά τη διάρκεια ξηρασίας το καλοκαίρι, είτε από κάποιον άλλο είτε από τον ίδιο τον χρήστη. Στην Κνωσό υπήρχε και δεύτερη τουαλέτα στον άνω όροφο, ακριβώς επάνω από το δωμάτιο του λίθινου θρόνου στην ΝΔ γωνία του ανακτόρου.



Σχήμα 2. Τομή και κάτοψη της τουαλέτας στο ισόγειο του ανακτόρου της Κνωσού (Angelakis *et al.*, 2005).

Τουαλέτες, παρόμοιας χρήσης με αυτές της Κνωσού, υπήρχαν στη Φαιστό, στα Μάλια, καθώς και σ' άλλους οικισμούς. Μια κατοικία στην περιοχή του ανακτόρου των Μαλίων έχει κάθισμα τουαλέτας σε σχεδόν άριστη κατάσταση, αφού είχε κατασκευαστεί από συμπαγή πέτρα, όπως αυτό του ανακτόρου της Κνωσού. Αυτό το πέτρινο κάθισμα είχε διαστάσεις 68,60x 36,00x 45,70 cm πλάτος, ύψος και μήκος, αντίστοιχα (Graham, 1987). Έχει κτιστεί ακριβώς απέναντι από έναν εξωτερικό τοίχο, διά μέσου του οποίου περνάει ένας ευμεγέθης αποχετευτικός αγωγός (Εικ. 5). Στην Κνωσό είναι προφανές ότι η χρήση του ήταν για κάθισμα και όχι για στήριγμα. Επιπλέον, μοιάζει περισσότερο με τις αιγυπτιακές τουαλέτες παρά με αυτές «τουρκικού τύπου», που βρέθηκαν στα ανάκτορα του Μαρί στην κοιλάδα του Ευφράτη. Μια παρόμοια τουαλέτα έχει ανακαλυφθεί στη δυτική πλευρά του λεγόμενου «διαμερίσματος της βασίλισσας» στη Φαιστό, που συνδεόταν με έναν μικρό αποχετευτικό αγωγό, μέρος του οποίου σώζεται ακόμη. Ένας άλλος αγωγός τουαλέτας έχει ανακαλυφθεί στο σπίτι C, στην Τύλισο.

Ορισμένες ημέρες του χρόνου, όπως προαναφέρεται, αγωγοί αποχέτευσης και τουαλετών στο ανάκτορο του Μίνωα πρέπει να καθαρίζονταν επαρκώς με νερό της βροχής, που συλλεγόταν σε δεξαμενές. Στην πραγματικότητα ο Έβανς (1921-1935) παρατήρησε ότι στη μία άκρη του καθίσματος υπήρχε αρκετός χώρος για την τοποθέτηση μιας μεγάλης κανάτας. Με δεδομένα αυτά ο Έβανς συνεπέρανε, με φανερή ικανοποίηση, ότι τουαλέτες, λουτρά, συστήματα αποχέτευσης και άλλες υγειονομικές εγκαταστάσεις, όπως αυτές που υπήρχαν στην Κνωσό, δεν διάθεταν πολλές ανθρώπινες κοινωνίες στην εποχή του.



Εικόνα 5. Τουαλέτα της οικίας Da, στο ανάκτορο των Μαλίων: (α) Τομή και κάτοψη της (Graham, 1987) και (β) πρόσφατη φωτογραφία της.

5. Η ΧΡΗΣΗ ΝΕΡΟΥ ΓΙΑ ΑΝΑΨΥΧΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΧΡΗΣΗ

Άλλες γνωστές τεχνολογίες υδατικών πόρων κατά τη Μινωική εποχή ήταν η χρήση για αναψυχή. Έτσι, είναι γνωστές πολύ σημαντικές κρήνες, όπως αυτές στο ανάκτορο της Ζάκρου και στο Καραβάν σεράι στην Κνωσό (γνωστές ως «τυκτές») και οι κρήνες-σιντριβάνια στην Κνωσό, η χρήση μιας κεντρικής δεξαμενής στη Ζάκρο ως ενυδρείου και για αναψυχή, και άλλες κατασκευές (Koutsoyiannis *et al.*, 2008 και Mays *et al.*, 2007).

Οι πρώτες ενδείξεις για χρήση του νερού για αναψυχή αναφέρονται στο Μινωικό πολιτισμό. Οι υδραυλικοί μηχανικοί εκείνης της περιόδου φαίνεται να είχαν αρκετές γνώσεις και αναπτύξει τεχνολογίες χρήσης του νερού για αναψυχή και βελτίωση του περιβάλλοντος. Διάφορα ευρήματα αποδεικνύουν την ύπαρξη στα ανάκτορα αυτής της εποχής συντριβανιών, πίδακων νερού, ιχθυοτροφείων, ενυδρείων και άλλων σχετικών εγκαταστάσεων. Η πρώτη σοβαρή ένδειξη στην ιστορία των αρχαίων Ελληνικών πολιτισμών χρήσης νερού για αναψυχή, αποτελεί τμήμα αναπαράστασης, που ανακαλύφθηκε στην «Οικία των Τοιχογραφιών» στην Κνωσό και παριστάνει ένα τύπο αναβρυτηρίου ή πίδακα νερού “jet d’ eau”, που εκτίθεται σήμερα στο αρχαιολογικό Μουσείο του Ηρακλείου (Angelakis and Spyridakis, 1996a).

Μια άλλη ένδειξη παρόμοιας χρήσης του νερού αποτελεί η υπόγεια, κυκλικής διαμέτρου (7m) δεξαμενή, που ανακαλύφθηκε στο κεντρικό τμήμα δίπλα (κατά μήκος) του ονομαζόμενου Βασιλικού διαμερίσματος του ανακτόρου της Ζάκρου. Το δωμάτιο που βρίσκεται η δεξαμενή ονομάζεται «Δωμάτιο Δεξαμενής». Για τη χρήση αυτής της δεξαμενής έχουν διατυπωθεί διάφορες θεωρίες και απόψεις, όπως είναι η χρήση της για κολύμβηση, ως ενυδρείου ή για θρησκευτικές τελετές. Σήμερα πιστεύεται ότι η δεξαμενή αυτή είχε πολλαπλές χρήσεις, συμπεριλαμβανομένων και αυτών αναψυχής (Angelakis and Spyridakis, 2010).

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ένα από τα πιο εξέχοντα χαρακτηριστικά του Μινωικού πολιτισμού ήταν η υδραυλική και αρχιτεκτονική κατασκευή και λειτουργία των συστημάτων ύδρευσης και των συστημάτων για την αποχέτευση των αποβλήτων και των νερών της βροχής στα ανάκτορα και στις πόλεις της εποχής εκείνης (Angelakis et al., 2012a). Στη δομή των περισσότερων Μινωικών ανακτόρων και πόλεων τίποτε δεν είναι πιο αξιοπρόσεκτο από τα πολύπλοκα και πολύ λειτουργικά συστήματα υδροδότησης και αποχέτευσης. Τέλος, συμπεραίνεται ότι οι Μινωίτες υδρολόγοι και μηχανικοί ήταν γνώστες σε κάποιο βαθμό βασικών αρχών των επιστημών υδατικών πόρων και περιβάλλοντος, δηλαδή πολύ πριν από την καθιέρωσή τους στη σύγχρονη εποχή (Angelakis and Spyridakis, 2012).

Από αυτήν την πολύ σύντομη περιγραφή και ανάδειξη τεχνολογιών, που σχετίζονται με τους υδατικούς πόρους και τα υγρά απόβλητα στη Μινωική εποχή, μπορούν να αντληθούν σημαντικά διδάγματα, όπως είναι τα παρακάτω:

- α) Δεν υπάρχουν ουσιαστικές θεμελιώδεις διαφορές σχεδιασμού και κατασκευής υδατικών έργων από τότε μέχρι σήμερα. Οι βασικές διαφορές αφορούν την κλίμακα, το διαθέσιμο εξοπλισμό και άλλα.
- β) Ο άρτιος σχεδιασμός και η προσαρμοστικότητα τους στο περιβάλλον, ιδιαίτερα των έργων ύδρευσης και αποχέτευσης (διαπιστώνονται βασικές διαφοροποιήσεις ανάλογα με τις τοπικές συνθήκες).
- γ) Ο χρόνος λειτουργίας τους, που σε πολλές περιπτώσεις φθάνει μερικές χιλιετίες.
- δ) Η πρόβλεψη για μελλοντικές αυξημένες ανάγκες και η ολοκληρωμένη διαχείριση υδατικών πόρων και η εξισορρόπηση προσφοράς και ζήτησης. Και
- ε) Τέλος με δεδομένα τα παραπάνω η έννοια της βιωσιμότητας ως αρχή σχεδιασμού έργων υδατικών πόρων, που ίσως θα πρέπει να αναθεωρηθεί.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Angelakis, A. N. and Koutsoyiannis, D., 2003. *Urban Water Resources Management in Ancient Greek Times*. The Encycl. of Water Sci., Markel Dekker Inc., (B.A. Stewart and T. Howell, Eds.), Madison Ave. New York, N.Y., USA, pp. 999-1007.

- Angelakis, A.N. and Spyridakis, S. V., 1996a. *The status of water resources in Minoan times: A preliminary study*. In: Diachronic Climatic Impacts on Water Resources with Emphasis on Mediterranean Region (A. N. Angelakis and A. S. Issar, Eds.), Ch. 8: 161-191, Springer-Verlag, Heidelberg, Germany.
- Angelakis, A. N. and Spyridakis, S. V., 1996b. *Wastewater Management in Minoan Times*. In: Proc. of the Meeting on Protection and Restoration of Environment, August 28-30, Chania, Greece, pp. 549-558.
- Angelakis, A. N. and Spyridakis, D. S., 2010. *Water Supply and Wastewater Management Aspects in Ancient Greece*. Water Sci. and Techn., Water Supply, 10 (4): 618-628.
- Angelakis, A. N. and Spyridakis, S. V., 2012. *A Brief History of Water and Wastewater Technologies in Bronze Age*. Water Sci. and Techn., Water Supply (under review).
- Angelakis, A. N., Koutsoyiannis, D., and Tchobanoglous, G., 2005. *Urban Wastewater and Stormwater Technologies in the Ancient Greece*. Water Res., 39(1): 210-220.
- Angelakis, A. N., Savvakis, Y. M., and Charalampakis, G., 2007. *Aqueducts During the Minoan Era*. Water Sci. and Techn., Water Supply, 7(1): 95-102.
- Angelakis, A. N., Dialynas, M. G., and Despotakis, V., 2012a. *Water Supply Management in Ancient Crete*. In: Evolution of Water Supply Throughout Millennia (A. N. Angelakis et al., Eds.). IWA Publishing, London, UK, Ch. 9: 227-258.
- Angelakis, A. N., Koutsoyiannis, D., and Papanikolaou, P., 2012b. *On the geometry of the Minoan water conduits*. In: Proc. of the 3rd IWA International Symposium on Water and Wastewater Technologies in Ancient Civilizations, March 22-25, 2012, Istanbul, Turkey, pp., 172-177.
- Antoniou, A. And Angelakis, A. N., 2012. *Evolution of Sanitary and Purgatory Structures in Ancient Greece*. Journal of Early Medicine Issue on Latrines, Hygiene and Health (in press).
- De Feo, G., Mays, L., and Angelakis, A. N., 2011. *Water and Wastewater Management Technologies in Ancient Greek and Roman Civilizations*. In: Treatise on Water Science (P. Wilderer, Ed.), vol. 1, pp. 3-22, Academic Press, Oxford, UK.
- Defner, M., 1921. *Διωλιστήριο Υστερομινωικής Εποχής*. Αρχαιολογική Εφημερίδα, 78, Ηράκλειο, Κρήτη.
- Evans, S.A., 1921-1935. *The palace of Minos at Knossos: A comparative account of the successive stages of the early Cretan civilization as illustrated by the discoveries*. Vols. I-IV, Macmillan and Co., London UK (Reprinted by Biblo and Tannen, New York, USA).
- Graham, J.W., 1987. *The Palaces of Crete*. Revised Ed. Princeton University Press, Princeton, New Jersey.
- Koutsoyiannis, D., Zarkadoulas, N., Angelakis, A. N., and Tchobanoglous, G., 2008. *Urban Water management in Ancient Greece: Legacies and Lessons*. ASCE, Journal of Water Resources Planning & Manag., 134 (1): 45-54.
- MacDonald, C.F. and Driessen, J. M., 1988. *The Drainage System of the Domestic Quarter in the Palace at Knossos*. British School of Athens, 83: 235-358.
- Mays, L. W., D Koutsoyiannis, D., and Angelakis, A. N., 2007. *A Brief History of Water in Antiquity*. Water Sci. and Techn., Water Supply, 7(1): 1-12.
- Pendlebury, J. D. S., 1950. *Οδηγός της Κνωσού*. Μετάφραση από Ν. Πλάτων, Ηράκλειο, Κρήτη.
- Σπανιάκης, Σ., 1981. *Η Υδρευση της Πόλης του Ηρακλείου, 828-1939*. ΤΕΕ/ΤΑΚ, Ηράκλειο, Κρήτη.

ΣΤ

**ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ
ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ**

**ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΕΛΙΚΩΝ ΑΡΑΙΩΣΕΩΝ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΛΥΜΑΤΩΝ
ΣΤΗΝ ΝΟΤΙΟΑΝΑΤΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΖΩΝΗ ΤΟΥ ΠΑΤΡΑΪΚΟΥ
ΚΟΛΠΟΥ: ΘΕΡΙΝΗ ΠΕΡΙΟΔΟΣ**

Νικόλαος Θ. Φουρνιώτης, Γεώργιος Μ. Χορς

Εργαστήριο Υδραυλικής Μηχανικής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Πατρών, 26 500 Ρίο Πάτρας, E-mail: nfou@upatras.gr,
ghorsch@upatras.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Μελετάται αριθμητικά η διάχυση και μεταφορά του πεδίου των επεξεργασμένων λυμάτων που διατίθενται στο Πατραϊκό κόλπο, κατά την θερινή περίοδο. Οι αριθμητικές προσομοιώσεις πραγματοποιούνται χρησιμοποιώντας τον κώδικα πεπερασμένων όγκων MIKE-3-FM (HD, TR). Για την εκτίμηση των τελικών αραιώσεων, στα όρια της κολυμβητικής ζώνης, εξετάζονται οι περιπτώσεις διατηρητικού ρύπου, καθώς και ρύπου με αποδόμηση. Σε όλες τις περιπτώσεις, οι προσομοιώσεις δείχνουν ότι οι αραιώσεις που επιτυγχάνονται με βάση το πεδίο ροής είναι μεγαλύτερες από 300 φορές, σε σχέση με την αρχική συγκέντρωση στη θέση εκβολής, ακόμα και για την περίπτωση του διατηρητικού ρύπου. Επιπλέον, εκτιμώνται οι μέγιστες συγκεντρώσεις των μερικώς επεξεργασμένων λυμάτων που μπορούν να διατίθενται στο κόλπο, χωρίς ωστόσο να παραβιάζονται τα όρια που επιβάλλονται από την οδηγία 2006/7/EC, σε 2×10^5 FC/100ml.

**ESTIMATION OF FINAL DILUTIONS OF EFFLUENTS AT THE
SOUTHEASTERN COAST OF THE GULF OF PATRAS (GREECE):
SUMMER PERIOD**

Nikolaos Th. Fourniotis, Georgios M. Horsch

Hydraulic Engineering Laboratory, Department of Civil Engineering, University
of Patras, GR-26 500 Patras, Greece, E-mail: nfou@upatras.gr,
ghorsch@upatras.gr

ABSTRACT

The spread of the sewage plume, discharged into the Gulf of Patras, is studied using three-dimensional numerical simulations, for the summer regime. The hydrodynamic circulation in the Gulf and the advection-diffusion of the effluent are simulated using the MIKE-3-FM (HD, TR) code. Both the cases of a conservative and non-conservative pollutant species are examined. In all the cases, the simulations show that dilutions greater than 300 are achieved, even for conservative pollutants. It is therefore confirmed that the advection-diffusion field established by the hydrodynamic circulation in the Gulf of Patras ensures adequate dilution of the plume. Further, since the sewer system of the City of Patras is a combined sanitary-storm system, based on the results of the simulations, the maximum concentrations of partially treated sewage that can be released into the Gulf without exceeding the limits imposed by directive 2006/7/EC have been calculated to be $2 \cdot 10^5$ FC/100ml.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο Πατραϊκός Κόλπος αποτελεί ένα ευαίσθητο περιβαλλοντικά υδάτινο σώμα, εκτεθειμένο σε ποικίλα ρυπαντικά φορτία, ιδιαίτερα στο νοτιοανατολικό του τμήμα όπου αναπτύσσεται η πόλη των Πατρών. Στους κινδύνους ρύπανσης περιλαμβάνονται κατανεμημένες πηγές κατά μήκος των ακτών, σποραδικά ατυχήματα, εφήμερα υδατορρέυματα που εισρέουν στον κόλπο, με σημαντικές παροχές ιδιαίτερα κατά τους χειμερινούς μήνες και ρυπαίνοντας την παράκτια ζώνη από αγροτοχημικά, καθώς και σημειακές πηγές που αποτελούν συνεχείς πηγές ρύπανσης υποβαθμίζοντας βαθμιαία την ποιότητα του θαλάσσιου περιβάλλοντος. Ως κύρια πηγή σημειακής ρύπανσης θεωρείται η διάθεση των επεξεργασμένων λυμάτων της πόλης που πραγματοποιείται μέσω της Εγκατάστασης Επεξεργασίας Λυμάτων (Ε.Ε.Λ.).

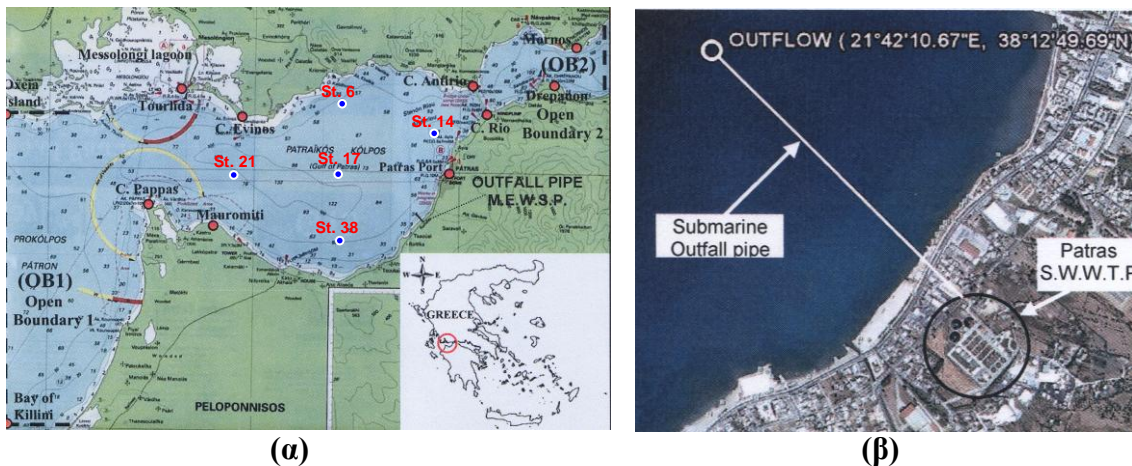
Για την αποφυγή της υποβάθμισης του θαλάσσιου περιβάλλοντος, ήδη από το 2000 η Δημοτική Επιχείρηση Ύδρευσης και Αποχέτευσης της Πάτρας (Δ.Ε.Υ.Α.Π.), κατασκεύασε και λειτουργεί βιολογικό καθαρισμό επεξεργασίας των αστικών λυμάτων της πόλης δυναμικότητας άνω των 180 000 κατοίκων. Ειδικότερα, τα επεξεργασμένα απόβλητα διατίθενται μέσω της Ε.Ε.Λ. με αγωγό μήκους περίπου 1000 m στο νοτιοανατολικό τμήμα του κόλπου σε βάθος 32,5 m, από τη μέση στάθμη της θάλασσας. Στο τέρμα του αγωγού διάθεσης των λυμάτων διαμορφώνεται διαχύτης μήκους 68 m, αποτελούμενος από 18 ακροφύσια με διάμετρο 20 cm. Τα λύματα εξέρχονται από το σύστημα διάθεσης και σχηματίζουν ανωστικό πλουμίο. Κατά την κίνησή τους, μέχρις ότου η πυκνότητά τους εξισωθεί με αυτή του αποδέκτη, επιτυγχάνεται μια αρχική αραιώση οφειλόμενη στην διείσδυση θαλασσινού νερού που ονομάζεται αρχική διάλυση των λυμάτων. Στη συνέχεια, το πεδίο λυμάτων υφίσταται περαιτέρω διάλυση που οφείλεται στο πεδίο ροής του αποδέκτη και ονομάζεται διάλυση μακρού πεδίου (*far-field dilution*). Στην παρούσα εργασία μελετάται η διάλυση των επεξεργασμένων λυμάτων που οφείλεται αποκλειστικά στο πεδίο ροής που αναπτύσσεται στον Πατραϊκό κόλπο κατά τη θερινή περίοδο.

Η μελέτη βασίζεται στη τρισδιάστατη αριθμητική προσομοίωση της κυκλοφορίας των υδάτων στον Πατραϊκό και την διασπορά του πεδίου λυμάτων που σχηματίζεται, θεωρώντας ότι έχει επιτευχθεί η αρχική αραιώση που προκύπτει από το σύστημα διάθεσης. Για την πραγματοποίηση των προσομοιώσεων εφαρμόζεται ο κώδικας πεπερασμένων όγκων MIKE-3-FM (HD) για τη μελέτη της υδροδυναμικής κυκλοφορίας του κόλπου, καθώς και ο κώδικας MIKE-3-FM (TR) για τη μελέτη της διάχυσης και μεταφοράς των επεξεργασμένων λυμάτων που προκαλείται από το πεδίο ροής του αποδέκτη. Με βάση τους περιορισμούς που επιβάλλονται από το αριθμητικό ομοίωμα, η αρχική διάλυση δεν υπολογίζεται, επομένως κατά την αριθμητική προσομοίωση η εκροή των λυμάτων εφαρμόζεται ως σημειακή πηγή στο κέντρο ενός υπολογιστικού κελιού στον πυθμένα του κόλπου, στη θέση όπου έχει τοποθετηθεί ο διαχύτης. Η διαδικασία επιβάλλει κατάλληλη επιλογή των διαστάσεων του υπολογιστικού κελιού, έτσι ώστε η προκύπτουσα αρχική διάλυση να συμπίπτει με αυτή που προβλέπεται από τις εμπειρικές σχέσεις των Roberts *et al.* (1989a, b, c), βάση των οποίων σχεδιάστηκε το σύστημα, και έχει μετρηθεί στην άμεση γειτονία του διαχύτη (Δ.Ε.Υ.Α.Π., 2009).

Στις προσομοιώσεις που ακολουθούν δίδεται έμφαση στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων σε ακτίνα περίπου 10 km από το σημείο διάθεσης των λυμάτων, που περιλαμβάνει την ευρύτερη περιοχή της κολυμβητικής ζώνης, στις νοτιοανατολικές ακτές του Πατραϊκού.

2. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΚΩΔΙΚΑ ΜΙΚΕ 3 FM (HD – TR)

Ο Πατραϊκός κόλπος βρίσκεται στην περιοχή της Δυτικής Ελλάδας, μεταξύ της Στερεάς Ελλάδας και της Πελοποννήσου. Είναι ένας σχετικά ρηχός, διαμπερής κόλπος με μέγιστο βάθος 135 m και μέσο βάθος 56 m, που συνδέει τον βαθύτερο Κορινθιακό κόλπο με το Ιόνιο Πέλαγος (Σχ. 1α). Στη νοτιοανατολική πλευρά του κόλπου βρίσκεται το λιμάνι της Πάτρας, το μεγαλύτερο λιμάνι του Πατραϊκού, ενώ νοτιότερα εκβάλλει ο βιολογικός καθαρισμός της πόλης, στη θέση με γεωγραφικές συντεταγμένες $21^{\circ} 42' 10.67''$ E, $38^{\circ} 12' 49.69''$ N (Σχ. 1β). Ο τρισδιάστατος κώδικας πεπερασμένων όγκων, MIKE 3 FM (HD, TR) (DHI, 2007a, b), εφαρμόζεται για την μελέτη της κυκλοφορίας των υδάτων του Πατραϊκού, καθώς και τη διάχυση και μεταφορά των επεξεργασμένων λυμάτων, από την Ε.Ε.Λ. της πόλης.



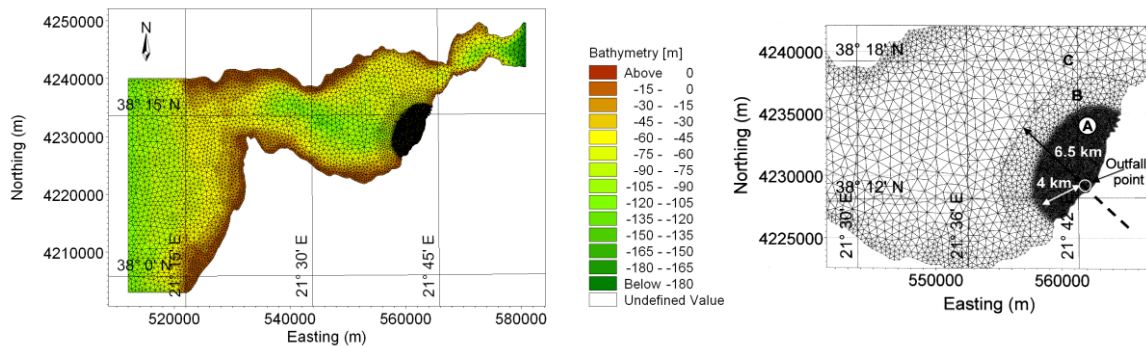
Σχήμα 1. (α) Ο Πατραϊκός Κόλπος όπου διακρίνεται η θέση του αγωγού λυμάτων της Ε.Ε.Λ. της πόλης των Πατρών. Δυτικά και ανατολικά σημειώνονται οι θέσεις των ανοικτών ορίων σαν OB1 και OB2, αντίστοιχα. (β) Λεπτομέρεια της νοτιοανατολικής παράκτιας ζώνης όπου χωροθετείται η Ε.Ε.Λ και η θέση εκροής του αγωγού λυμάτων.

2.1 ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΕΠΙΛΥΣΗΣ

Η διακριτοποίηση του πεδίου επίλυσης, η διαμόρφωση των ανοικτών ορίων και η εφαρμογή των αρχικών και οριακών συνθηκών έχουν καθορισθεί κατάλληλα (Fourniotis and Horsch, 2008a, b, 2010), με βάση αριθμητικές προσομοιώσεις για πολλούς συνδυασμούς φορτίσεων του υδροδυναμικού συστήματος. Επιπλέον, στην παρούσα εργασία ο κάρναβος απαρτίζεται από 18867 τρίγωνα (οριζόντια) και 15 στρώματα (κατακόρυφα). Στην άμεση γειτονία του διαχύτη επιβάλλεται η εφαρμογή ενός πιο λεπτού υπολογιστικού πλέγματος, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η προσομοίωση της διάχυσης και μεταφοράς του πεδίου λυμάτων. Συγκεκριμένα, διαμορφώνεται ένα μη ομοιόμορφο υπολογιστικό πλέγμα αποτελούμενο από τρεις ζώνες που περιλαμβάνει την ευρύτερη περιοχή της νοτιοανατολικής παράκτιας ζώνης του Πατραϊκού, όπου διατίθεται το πεδίο λυμάτων (Σχ. 2β). Η πρώτη ζώνη (Α), διαμορφώνεται ως κυκλικός τομέας (στο οριζόντιο επίπεδο) με ακτίνα 4 km, αποτελούμενη από υπολογιστικά κελιά με χαρακτηριστική διάσταση που μεταβάλλεται βαθμιαία από 50-100 m, από την ακτή προς την ανοικτή θάλασσα. Η δεύτερη ζώνη (Β), αμέσως μετά τη ζώνη Α, σχηματίζει έναν δακτυλιοειδή τομέα όπου οι διαστάσεις των υπολογιστικών κελιών αυξάνουν βαθμιαία μέχρι τη χαρακτηριστική διάσταση των 500 m. Στη συνέχεια ακολουθεί μια τρίτη ζώνη (C) όπου τα κελιά αυξάνουν μέχρι τη διάσταση των 1000 m που αποτελεί χαρακτηριστική για τη διακριτοποίηση του κυρίου σώματος του κόλπου. Οι διαστάσεις των κελιών στην περιοχή διάθεσης των λυμάτων (ζώνη Α) διαμορφώθηκαν έτσι ώστε

να προκύπτει αρχική διάλυση ίση με αυτή που επιτυγχάνεται από το σύστημα διάθεσης (διαχύτη) και η οποία προκύπτει της τάξης των 100, μετρημένη σε σχέση με την αρχική συγκέντρωση των λυμάτων στην πηγή εκροής (ΔΕΥΑΠ, 2000).

Για τις αριθμητικές προσομοιώσεις το χρονικό βήμα τέθηκε ίσο με 4 sec προκειμένου να μην παραβιάζεται το κριτήριο CFL και να επιτυγχάνεται σύγκλιση. Για μια τυπική προσομοίωση 6 ημερών, όπου οι κώδικες MIKE 3 FM (HD, TR) εκτελούν τους υπολογισμούς συζευγμένα, απαιτήθηκαν περίπου 10 ημέρες σε Pentium 4, 3.2 GHz PC.



(α)

(β)

Σχήμα 2. (α) Διακριτοποίηση του πεδίου επίλυσης στην οριζόντια διεύθυνση με μη-δομημένο, βαθμιαίως μεταβαλλόμενο, υπολογιστικό πλέγμα. Οι ισοβαθείς δίνονται ανά 15 m. (β) Λεπτομέρεια διαμόρφωσης του υπολογιστικού πλέγματος στην νοτιοανατολική παράκτια ζώνη, όπου διατίθενται τα λύματα.

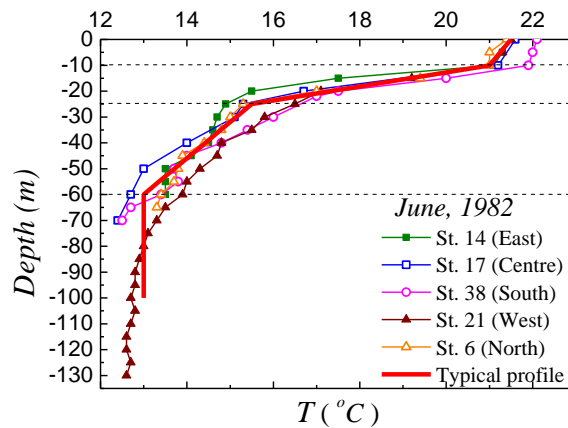
2.2 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΑΡΧΙΚΩΝ ΚΑΙ ΟΡΙΑΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ

Το πεδίο επίλυσης αποτελείται από στερεά όρια (αδιαπέρατος πυθμένας και ακτές) και δύο ανοικτά όρια τα οποία τοποθετούνται στη θέση Νήσος Οξεία – Κόλπος Κυλλήνης στα δυτικά (OB1) και στη θέση Μόρνος – Δρέπανο στα ανατολικά (OB2) (Σχ. 1α).

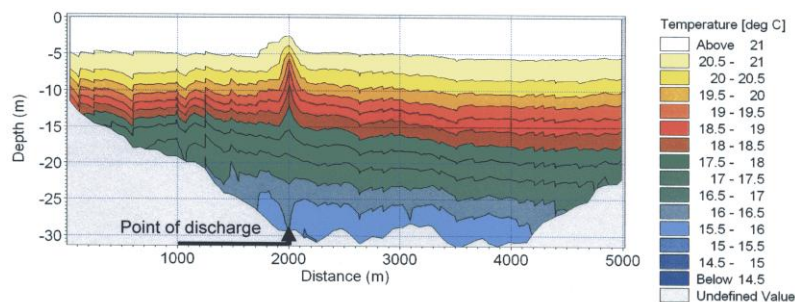
Όλες οι προσομοιώσεις ξεκίνησαν από τετριμμένες αρχικές συνθήκες. Για την κατασκευή οριακών συνθηκών των ανοικτών ορίων αξιοποιούνται συνιστώσες παλίρροιας που προέκυψαν από αρμονική ανάλυση του Αχιλλεόπουλου (1990) μετρήσεων της χειμερινής περιόδου του 1982 (Παπαηλιού, 1982). Στη διατριβή του Αχιλλεόπουλου (1990) προσδιορίζονται οκτώ αρμονικές συνιστώσες αστρονομικής παλίρροιας ημι-ημερήσιου και ημερήσιου τύπου και συγκεκριμένα οι Q_1 , O_1 , K_1 , P_1 , M_2 , N_2 , K_2 , S_2 που προκύπτουν από αρμονική ανάλυση μετρήσεων παλιρροϊκών σταθμών που εγκαταστάθηκαν στις θέσεις Μαυρομύτη (πλησίον δυτικού ανοικτού ορίου) και Ρίο (πλησίον ανατολικού ανοικτού ορίου). Η παλιρροϊκή φόρτιση που προκύπτει από τη σύνθεση των παραπάνω αρμονικών επιβάλλεται καθ' όλο το μήκος των ανοικτών ορίων του πεδίου επίλυσης. Οι προσομοιώσεις που παρουσιάζονται παρακάτω πραγματοποιήθηκαν εφαρμόζοντας τις ίδιες οριακές συνθήκες με εκείνες της χειμερινής περιόδου (βλ. Fourniotis and Horsch, 2008b) συνθέτοντας τις κύριες αρμονικές συνιστώσες που παρέχονται από τη διατριβή του Αχιλλεόπουλου (1990). Η μεταβολή της πυκνότητας κατά το βάθος, στις θέσεις των ανοικτών ορίων, τέθηκε ανεξάρτητη του χρόνου με κατανομή ίδια με εκείνη που εφαρμόστηκε για την διαμόρφωση κατάλληλων αρχικών συνθηκών των προσομοιώσεων.

Αναφορικά με τις αρχικές συνθήκες, όλες οι προσομοιώσεις εκκινούν από την κατάσταση ηρεμίας, θέτοντας την ελεύθερη επιφάνεια ίση με τη μέση στάθμη της

θάλασσας. Για τη θερινή κυκλοφορία, σύμφωνα με μετρήσεις πεδίου (Παπαηλιού, 1982) η μεταβολή της πυκνότητας καθ' ύψος της υδάτινης στήλης καθορίζεται κυρίως από τη μεταβολή της θερμοκρασίας. Η αρχική συνθήκη της θερμικής στρωμάτωσης που εφαρμόστηκε στις προσομοιώσεις μεταβάλλεται μόνο κατά την κατακόρυφη διεύθυνση και διαμορφώθηκε με βάση πέντε τυπικές κατανομές της θερμοκρασίας μετρημένης σε χαρακτηριστικές θέσεις του Πατραϊκού κόλπου (Σχ. 3α, β). Η τιμή της αλατότητας θεωρήθηκε σταθερή και τέθηκε, σύμφωνα με μετρήσεις, ίση με 38,5 psu.



(α)



(β)

Σχήμα 3. (α) Κατακόρυφη δομή της θερμικής στρωμάτωσης με βάση τις μετρήσεις Παπαηλιού (1982). Με κόκκινο σημειώνεται το μέσο προφίλ που αξιοποιήθηκε στις αριθμητικές προσομοιώσεις. (β) Αλληλεπίδραση του ανωστικού πλουμίου των λυμάτων με την κατακόρυφη στρωμάτωση στη θέση εκροής.

2.3 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΔΙΑΧΥΣΗΣ-ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

Στην παρούσα εργασία, εξετάζεται η μεταφορά και διάχυση δύο ειδών ρύπων, ενός διατηρητικού (Component-1) και ενός ρύπου με αποδόμηση (Component-2), οι οποίοι μεταφέρονται καλώς αναμεμιγμένοι με τα λύματα που διατίθεται στον Πατραϊκό. Η κανονικοποιημένη συγκέντρωση των δύο ρυπαντών τίθεται στην πηγή ίση με 1, ενώ οι αρχικές και οριακές συνθήκες τους καθορίζονται στο υδάτινο σώμα του κόλπου ίσες με 0. Η αρχική αλατότητα των λυμάτων θεωρείται σε όλες τις προσομοιώσεις ίση με 0 psu, ενώ η αρχική τους θερμοκρασία καθορίζεται σε 20° C σύμφωνα με μετρήσεις της θερινής περιόδου.

Επιπλέον παράμετροι που υπεισέρχονται στις προσομοιώσεις είναι η παροχή των λυμάτων, Q , ο χρόνος αποδόμησης του 90% του αποδομούμενου ρύπου, T_{90} , η σταθερά αποδόμησης, k , καθώς και ο συντελεστής της τυρβώδους διάχυσης, οι οποίες καθορίζονται ως ακολούθως: Σύμφωνα με τη Δ.Ε.Υ.Α.Π. κατά την πρώτη φάση

λειτουργίας του βιολογικού καθαρισμού, η οποία καλύπτει την περίοδο 2000-2015, αναμένεται μέση παροχή λυμάτων της τάξης των $0,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ με διακύμανση από $0,3-0,8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Λαμβάνοντας, ωστόσο, υπόψη την αναμενόμενη αύξηση του πληθυσμού, η τιμή της παροχής τέθηκε στις αριθμητικές προσομοιώσεις ίση με $1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Επιπλέον, με βάση μετρήσεις για το ποσοστό αποδόμησης των κολοβακτηριδίων (FC) που πραγματοποιήθηκαν από τη Δ.Ε.Υ.Α.Π. (2009), για τις συνθήκες ηλιοφάνειας που επικρατούν στη περιοχή, προτείνεται μια μέση τιμή χρόνου αποδόμησης T_{90} της τάξης των 3 h, η οποία αντιστοιχεί σε σταθερά αποδόμησης των κολοβακτηριδίων $k = 2,132 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$. Η τιμή αυτή της σταθεράς αποδόμησης αν και αρκετά μεγάλη, βρίσκεται εντός των ορίων που προτείνονται σε εργασίες σχετικές με τη μελέτη της αποδόμησης των FC σε διαφορετικές συνθήκες ηλιακής ακτινοβολίας (π.χ. βλ. Carvalho *et al.* 2006). Ωστόσο, εξετάστηκε και η περίπτωση αποδόμησης του μη-διατηρητικού ρύπου κατά τη διάρκεια της νύχτας ή σε συνθήκες περιορισμένης ηλιακής ακτινοβολίας με προσομοιώσεις στις οποίες $T_{90} = 30 \text{ h}$. Όσον αφορά τους συντελεστές της τυρβώδους διάχυσης, διαφορετικές τιμές καθορίστηκαν στην οριζόντια (ν_h) και στην κατακόρυφη διεύθυνση (ν_v). Συγκεκριμένα, στην οριζόντια διεύθυνση θεωρήθηκε σταθερή τιμή και ίση με $0,01 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ (π.χ. Li and Hodgins, 2004), ενώ στην κατακόρυφη καθορίστηκε με βάση την αναλογία Reynolds, ν_v/σ_T , όπου σ_T ο τυρβώδης αριθμός Prandtl. Με βάση τις εμπειρικές σταθερές του μοντέλου k-ε η τιμή του σ_T λαμβάνεται ίση με 0,9, που αντιστοιχεί σε έναν συντελεστή αναλογίας (scaling factor) 1,1. Ωστόσο, στην παρούσα μελέτη η τιμή του συντελεστή τέθηκε ίση με 1, σε συμφωνία με αυτή που προτείνεται από τους Rodi (1980) και DHI (2007a).

3 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

3.1 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΘΕΡΙΝΗΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ ΤΩΝ ΥΔΑΤΩΝ ΣΤΟΝ ΠΑΤΡΑΙΚΟ

Στην παρούσα ενότητα εξετάζεται η διάχυση και μεταφορά των επεξεργασμένων λυμάτων από τον αγωγό της Ε.Ε.Λ. στον Πατραϊκό, για την καλοκαιρινή περίοδο, υπό την ταυτόχρονη δράση της παλίρροιας και των επικρατούντων ανέμων που πνέουν στην περιοχή. Με βάση τις αριθμητικές προσομοιώσεις της παλιρροϊκής κυκλοφορίας, αποδεικνύεται ότι πλησίον των ακτών, όπου διατίθενται τα επεξεργασμένα λύματα, η κυκλοφορία των υδάτων επιβάλλεται κυρίως από τη δράση του ανέμου. Η παλίρροια καθορίζει την κυκλοφορία στο κύριο σώμα του κόλπου και στην περιοχή πλησίον των στενών, προκαλώντας ισχυρά παλιρροϊκά ρεύματα και αφήνοντας σχεδόν ανεπηρέαστες τις ακτές. Επιπλέον, σημαντική είναι η επίδραση της στρωμάτωσης καθ' ύψος της υδάτινης στήλης, δεδομένου ότι κατά τη θερινή περίοδο η θέση του θερμοκλινούς βρίσκεται αρκετά ψηλότερα σε σχέση με τη θέση εκροής, προκαλώντας εγκλωβισμό του πεδίου λυμάτων κυρίως υπό συνθήκες άπνοιας ή ασθενών ανέμων. Για ασθενείς ανέμους η ανεμογενής κυκλοφορία περιορίζεται στα ανώτερα στρώματα του επιλιμνίου και ακολουθεί την διεύθυνση του ανέμου. Κάτω από τη ζώνη του θερμοκλινούς η κυκλοφορία υπαγορεύεται από τη ασθενή δράση της παλίρροιας με τα παλιρροϊκά ρεύματα να εναλλάσσουν τη κατεύθυνσή τους δυο φορές την ημέρα, ακολουθώντας της επίδραση της παλίρροιας ημι-ημερήσιου τύπου που χαρακτηρίζει την περιοχή. Αναφορικά με τις ταχύτητες των ρευμάτων στην περιοχή μελέτης, σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν η ταχύτητα δεν υπερβαίνει το $0,1 \text{ ms}^{-1}$ με κατεύθυνση που υπαγορεύεται κυρίως από τη διεύθυνση δράσης του ανέμου.

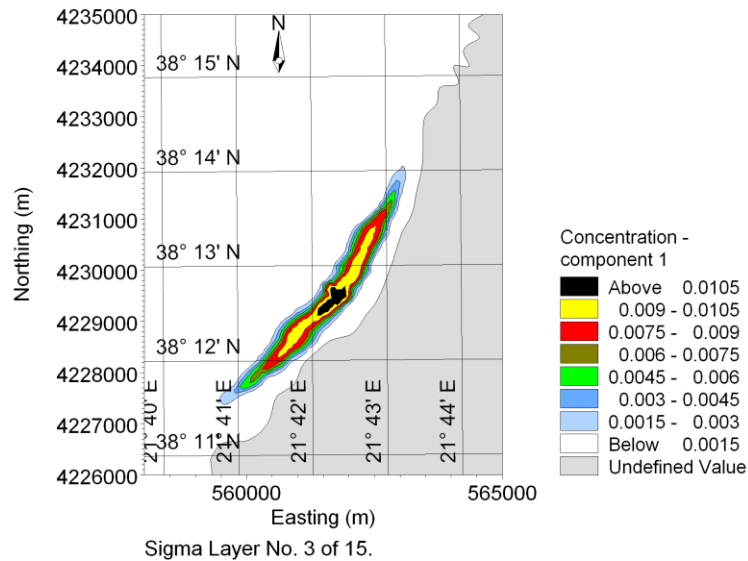
Με βάση τους επικρατούντες ανέμους που πνέουν στην περιοχή (Piper *et al.* 1982, Αντωνόπουλος κ.α 1992) η παρούσα μελέτη εστιάζει στις περιπτώσεις εκείνες που αναμένεται να έχουν τα δυσμενέστερα αποτελέσματα στην ποιότητα των υδάτων

πλησίον των ακτών. Με βάση την παραδοχή ότι ισχυροί άνεμοι προκαλούν σημαντικότερη ανάμιξη και αυξημένες τιμές διάλυσης ρύπων, που υπεισέρχονται στο πεδίο λυμάτων, επιλέγουμε για τις προσομοιώσεις μέσες έως χαμηλές τιμές των συνήθων ανέμων που πνέουν στην περιοχή, δηλαδή 6 ms^{-1} με επικρατούσα κατεύθυνση νοτιοδυτική (ΝΔ, 225°) και βορειοανατολική (ΒΑ, 45°). Για την καλύτερη εποπτεία των αποτελεσμάτων, χρησιμοποιούμε καμπύλες ίσης συγκέντρωσης, οι οποίες μας δίνουν την κατανομή του ρύπου στην περιοχή ενδιαφέροντος (όρια κολυμβητικής ζώνης) στο χρόνο.

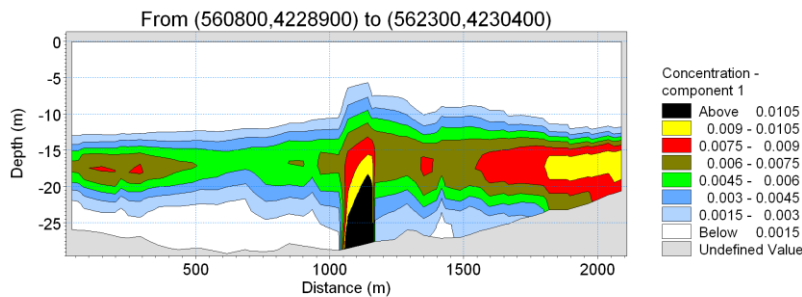
3.2 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΑΡΑΙΩΣΕΩΝ ΣΤΑ ΟΡΙΑ ΤΗΣ ΚΟΛΥΜΒΗΤΙΚΗΣ ΖΩΝΗΣ

Εξετάζονται τρεις περιπτώσεις: Στην πρώτη περίπτωση η κυκλοφορία των υδάτων υπαγορεύεται αποκλειστικά από τη δράση της παλίρροιας, χωρίς τη δράση του ανέμου. Στη δεύτερη και τρίτη περίπτωση η κυκλοφορία των υδάτων προκαλείται από τη συνδυασμένη δράση ΒΑ ή ΝΔ ανέμου και της παλίρροιας.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ασθενείς άνεμοι επιτρέπουν τη διατήρηση της θερμικής στρωμάτωσης πλησίον των ακτών η οποία γίνεται πιο έντονη υπό συνθήκες άπνοιας. Στην περίπτωση αυτή το πεδίο λυμάτων κατά την ανύψωσή του από το σημείο εκροής αλληλεπιδρά με την κατακόρυφη στρωμάτωση, έως ότου ισορροπήσει όπως στο Σχ. 4, για την περίπτωση άπνοιας. Η άνωση του πεδίου λυμάτων υπαγορεύεται από τη διαφορά θερμοκρασίας και αλατότητας του πλουμίου των λυμάτων με το περιβάλλον ρευστό. Με βάση τις αριθμητικές προσομοιώσεις, υπό συνθήκες άπνοιας, το πεδίο λυμάτων εγκλωβίζεται πλησίον του θερμοκλινούς σε μια ζώνη μεταξύ 10 και 25 m από την ελεύθερη επιφάνεια, και παραμένει εκεί κινούμενο σαν ένα στρώμα πάχους περίπου 15 m γύρω από την περιοχή του διαχύτη. Αντίστοιχη συμπεριφορά έχει παρατηρηθεί και από άλλους ερευνητές, για την περίπτωση του πεδίου λυμάτων που διατίθεται από τον αγωγό διάθεσης της Ψυτάλλειας (π.χ. Pavlidou *et al.* 2004, 2008). Αποτέλεσμα του εγκλωβισμού των λυμάτων είναι στην ελεύθερη επιφάνεια να μην εντοπίζονται σχεδόν καθόλου αξιοσημείωτες συγκεντρώσεις ρύπων, ενώ κάτω από το θερμοκλινές να διαμορφώνεται μια ζώνη περίπου 7-8 km παράλληλα με την ακτή όπου παρατηρούνται υψηλές συγκεντρώσεις ρύπων. Η ανάπτυξη της ζώνης αυτής παράλληλα στην ακτή οφείλεται στην ασθενή δράση των παράκτιων παλιρροϊκών ρευμάτων, τα οποία εναλλάσσουν την διεύθυνσή τους παράλληλα στις ακτές. Οι ελάχιστες αραιώσεις (μέγιστες συγκεντρώσεις) που υπολογίστηκαν με βάση τις προσομοιώσεις κυμαίνονται από την ελάχιστη τιμή 100 (1:0,0105 στην κλίμακα του Σχ. 4α) στην άμεση γειτονία του διαχύτη, σε μέγιστη τιμή 500 (1:0,002) στα όρια της ζώνης που διαμορφώνεται παράλληλα στην ακτή (Σχ. 4α). Με βάση την στρωμάτωση που εξετάζουμε, το μέγιστο ύψος στο οποίο ανέρχεται το πεδίο λυμάτων είναι το ίδιο με αυτό που προβλέπεται από τις εμπειρικές σχέσεις των Roberts *et al.* (1989a, b, c), για την περίπτωση πεδίου λυμάτων σε αποδέκτη με ασθενές ρεύμα. Στην περίπτωση αυτή η αντίστοιχη αρχική διάλυση των λυμάτων εκτιμάται σε $D_1 = 92$, χρησιμοποιώντας συμβολισμό με βάση την Τεχνική Έκθεση της ΔΕΥΑΠ (Φερεντίνος κ. συν., 1994). Τέλος, στο Σχ. 4β δίδεται μια κατακόρυφη τομή παράλληλα στην ακτή, όπου φαίνεται η διασπορά του πεδίου λυμάτων στο επίπεδο του θερμοκλινούς, μέσα σε μια ζώνη πάχους περίπου 15 m.



(α)

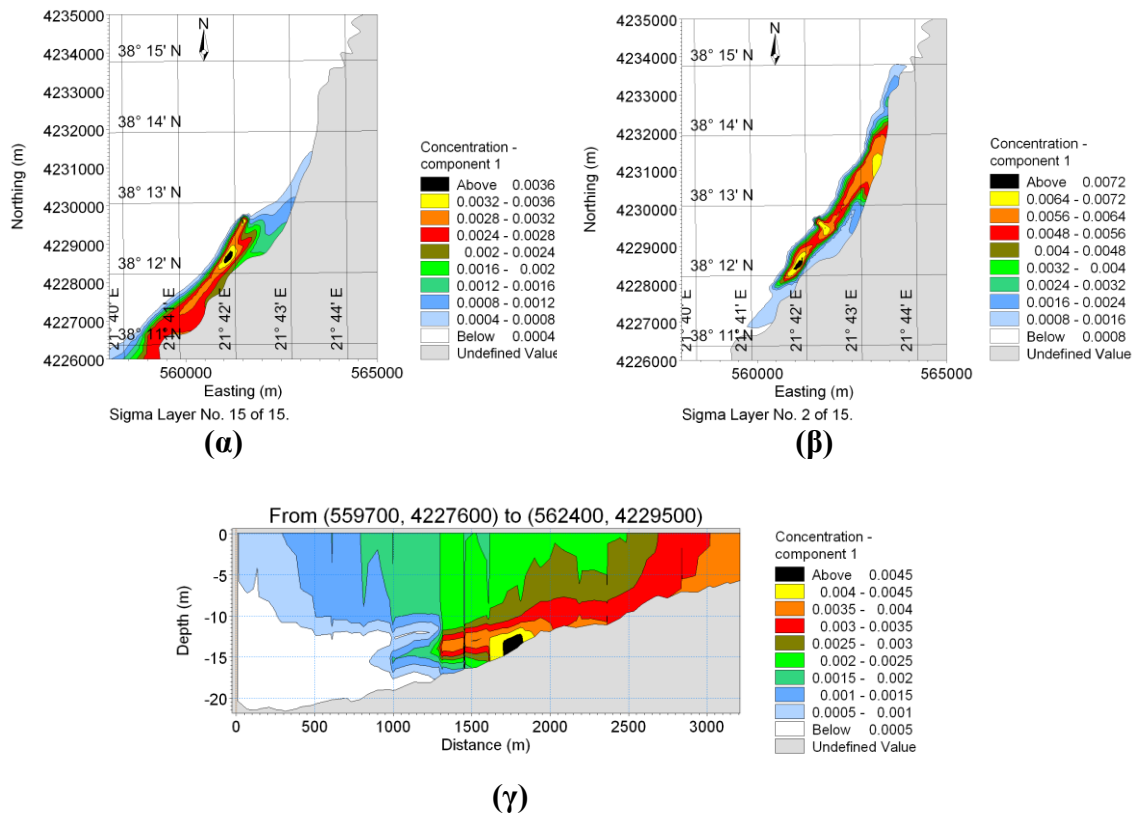


(β)

Σχήμα 4. Κατανομή της συγκέντρωσης του πεδίου των λυμάτων, σε συνθήκες άπνοιας (α) κάτω από το θερμοκλινές, (β) σε μια κατακόρυφη τομή παράλληλα στην ακτογραμμή.

Στην περίπτωση όπου εκτός από την παλίρροια δρα και ο άνεμος, η διασπορά των λυμάτων είναι διαφορετική. Διακρίνουμε δύο περιπτώσεις: Στην πρώτη περίπτωση, όπου δρουν άνεμοι ασθενείς ή μικρής διάρκειας, έτσι ώστε να μην καταστρέφεται η κατακόρυφη δομή της στρωμάτωσης πλησίον των ακτών, τα ανεμογενή ρεύματα περιορίζονται στο επιλίμνιο. Έτσι, το πεδίο λυμάτων το οποίο διαχέεται κάτω από το θερμοκλινές παραμένει ανεπηρέαστο από τα ανεμογενή ρεύματα και μεταφέρεται μόνο από τη δράση της παλίρροιας, η οποία δεν επηρεάζεται από την παρουσία της στρωμάτωσης. Η δεύτερη περίπτωση αφορά ανέμους μακράς διάρκειας ή ανέμους που υπερβαίνουν τα 5 ms^{-1} . Στην περίπτωση αυτή η δράση του ανέμου προκαλεί ανάμιξη στο επιλίμνιο έτσι ώστε βαθμιαία να καταστρέφεται η δομή της στρωμάτωσης. Τα λύματα αναδύονται στην ελεύθερη επιφάνεια και επομένως μεταφέρονται από τα ανεμογενή ρεύματα κατά τη διεύθυνση δράσης του ανέμου, όπως φαίνεται στο Σχ. 5α. Στην περίπτωση αυτή τα ρεύματα του αποδέκτη εξασφαλίζουν την επιθυμητή διάλυση των λυμάτων στα όρια της κολυμβητικής ζώνης. Ωστόσο, μέρος των λυμάτων παραμένουν ακόμα εγκλωβισμένα κάτω από το επίπεδο του θερμοκλινούς, όπου διαχέονται υπό την επίδραση των ασθενών παλιρροϊκών ρευμάτων κινούμενα παράλληλα στις ακτές (Σχ. 5β). Το αποτέλεσμα της δράσης διαφορετικών μηχανισμών για τη διασπορά του πεδίου λυμάτων, σε διαφορετικά επίπεδα (δηλ. δράση του ανέμου στην ελεύθερη επιφάνεια και παλιρροϊκά ρεύματα κάτω από το θερμοκλινές) φαίνονται

στην κατανομή της συγκέντρωσης σε μια κατακόρυφη τομή κατά μήκος της ακτής, Σχ. 5γ. Σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν για την περίπτωση του διατηρητικού ρύπου οι διαλύσεις που προέκυψαν στα όρια της κολυμβητικής ζώνης είναι μεγαλύτερες από 300 φορές σε σχέση με εκείνη που θεωρήθηκε στην πηγή.



Σχήμα 5. Κατανομή της συγκέντρωσης του πεδίου των λυμάτων, υπό τη δράση βορειοανατολικού ανέμου (α) στην ελεύθερη επιφάνεια, (β) κάτω από το θερμοκλινές και (γ) σε ένα κατακόρυφο επίπεδο στην περιοχή εκβολής.

Οι προσομοιώσεις για την περίπτωση του ρύπου με αποδόμηση, αποδεικνύουν ανάλογη συμπεριφορά στη διασπορά του πεδίου λυμάτων, με μεγαλύτερες ωστόσο τελικές διαλύσεις λόγω της αποδόμησης. Συγκεκριμένα, πλησίον του σημείου εκροής σε μια ακτίνα περίπου 100 m η διάλυση των λυμάτων λαμβάνει τιμές με εύρος από 10-100 φορές, σε σχέση με την πηγή, οι οποίες αυξάνουν γρήγορα με την απόσταση λαμβάνοντας τιμές της τάξης των 2000 πλησίον των ακτών, στα όρια της κολυμβητικής ζώνης. Οι τιμές αυτές θεωρούνται πρακτικά μη ανιχνεύσιμες (Δ.Ε.Υ.Α.Π., 2000). Επομένως, με βάση τις μετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή οι αριθμητικές προσομοιώσεις αποδεικνύουν ότι η επίδραση του πεδίου λυμάτων περιορίζεται σε μια απόσταση περίπου 500 m από τη θέση εκροής. Οι περιοχές κολύμβησης βρίσκονται σε απόσταση περίπου 900-1000 m από τη θέση του διαχύτη, με αποτέλεσμα να μην παρατηρούνται ανιχνεύσιμες συγκεντρώσεις μη-διατηρητικού ρύπου ακόμα και για τις δυσμενέστερες των περιπτώσεων που εξετάστηκαν.

Οι προσομοιώσεις για την περίπτωση μη-διατηρητικού ρύπου όπου όμως ο συντελεστής T_{90} ελήφθη 30 h, δίδει διαφορετικά αποτελέσματα. Η περίπτωση αυτή εκτός της νυχτερινής περιόδου ή της αυξημένης νέφωσης περιλαμβάνει και την κατάσταση εγκλωβισμού των λυμάτων – σε συνθήκες άπνοιας ή ασθενών ανέμων όπου

η δομή της στρωμάτωσης δεν καταστρέφεται – ή του μερικού εγκλωβισμού τμήματος του πεδίου λυμάτων που έχει κινηθεί προς την ανοικτή θάλασσα, σε θέσεις όπου η στρωμάτωση διατηρείται. Στην περίπτωση αυτή οι τιμές της διάλυσης στα όρια της κολυμβητικής ζώνης προκύπτουν μεγαλύτερες από 350 (1:0,0028) σε σχέση με την πηγή, σε συνθήκες άπνοιας.

Οι προσομοιώσεις τόσο για την περίπτωση του διατηρητικού ρύπου όσο και του ρύπου με αποδόμηση αποδεικνύουν ότι δυσμενέστερη περίπτωση για την καλοκαιρινή κυκλοφορία των υδάτων προκαλείται για την περίπτωση του διατηρητικού ρύπου κατά τη δράση ΒΑ ανέμου, όπου το πεδίο λυμάτων κινείται προς τις νοτιοδυτικές ακτές αυξάνοντας τις συγκεντρώσεις στα όρια της κολυμβητικής ζώνης που αναπτύσσεται στις περιοχές αυτές. Αντίθετα, για την περίπτωση του μη-διατηρητικού ρύπου δυσμενέστερη αποδεικνύεται η περίπτωση άπνοιας, όπου παρατηρείται εγκλωβισμός των λυμάτων και επομένως η επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι ασθενής στην καταστροφή των κολοβακτηριδίων.

Στον παρακάτω πίνακα συγκεντρώνονται τα σημαντικότερα αποτελέσματα από τα σενάρια τα οποία εξετάστηκαν, με βάση τις αριθμητικές προσομοιώσεις. Τα αποτελέσματα δίνουν τις ελάχιστες τιμές αραιώσεων που υπολογίστηκαν κατά τη διενέργεια των προσομοιώσεων στα όρια της κολυμβητικής ζώνης (δηλ. περίπου 200 m από την ακτή) για τις αντίστοιχες μετεωρολογικές συνθήκες υπό τη δράση της παλίρροιας.

Πίνακας 1. Αποτελέσματα ελάχιστης υπολογισμένης διάλυσης ρύπων, στα όρια της κολυμβητικής ζώνης (~ 200 m από την ακτή).

Σενάριο	Ταχύτητα Ανέμου (m/s), Διεύθυνση	Ελάχιστη Διάλυση Ρύπου (I:C) (200 m από την ακτή)	
		Διατηρητικός	Μη-Διατηρητικός
1	Άπνοια	>500 (1:0.0020)	>350 (1:0.0028) [$T_{90} = 30$ h]
2	6, ΒΑ Άνεμος (45°)	>300 (1:0.0032)	>3000 (1:0.0003) [$T_{90} = 3$ h]
3	6, ΝΔ Άνεμος (225°)	>1500 (1:0.0007)	Μη ανιχνεύσιμη

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή εφαρμόστηκε ο τρισδιάστατος κώδικας MIKE 3 FM (HD & TR) για την εκτίμηση των τελικών αραιώσεων του πεδίου λυμάτων που διατίθεται στον Πατραϊκό κόλπο από την Ε.Ε.Λ. της Δ.Ε.Υ.Α.Π. Εξετάστηκαν διάφορα σενάρια όσον αφορά τη συνδυασμένη δράση ανέμου και παλίρροιας, τα οποία σε συνδυασμό με τη θερμική στρωμάτωση, που αναπτύσσεται στον κόλπο κατά τους θερινούς μήνες, εκτιμούν τις ελάχιστες τιμές της αραιώσης των λυμάτων που υπεισέρχονται στο θαλάσσιο περιβάλλον.

Με βάση τις αριθμητικές προσομοιώσεις, αποδεικνύεται ότι η παρουσία της στρωμάτωσης εμποδίζει την ανάδυση των λυμάτων, για ασθενείς ανέμους μικρής διάρκειας. Ωστόσο, η ασθενής παλιρροϊκή δράση πλησίον των ακτών εξασφαλίζει στην περίπτωση αυτή επαρκή αραιώση των λυμάτων, έτσι ώστε να επιτυγχάνονται οι επιθυμητές τιμές αραιώσεων στα όρια της κολυμβητικής ζώνης. Όταν ισχυροί άνεμοι προκαλούν ανάμιξη και καταστροφή της στρωμάτωσης κοντά στις ακτές, προκύπτουν επίσης επιθυμητές αραιώσεις. Συγκεκριμένα, για την περίπτωση του διατηρητικού ρύπου δυσμενέστερη αποδεικνύεται η περίπτωση όπου βορειοανατολικός άνεμος ωθεί το πεδίο λυμάτων στις ακτές, ενώ για τον ρύπο με αποδόμηση δυσμενέστερη είναι η περίπτωση της άπνοιας όπου παρατηρείται εγκλωβισμός του πεδίου λυμάτων ή

περιορισμένη ανάδυσή του κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια, όπου δρα η ηλιακή ακτινοβολία στην αποδόμηση των κολοβακτηριδίων. Ωστόσο, ακόμα και στις δυσμενέστερες των περιπτώσεων που εξετάστηκαν το πεδίο ροής που αναπτύσσεται στον Πατραϊκό εξασφαλίζει επαρκή αραίωση των λυμάτων στα όρια της κολυμβητικής ζώνης.

Επιπλέον, δεδομένου ότι το δίκτυο αποχέτευσης της Πάτρας αποτελεί ένα μικτό σύστημα διάθεσης αστικών και ομβρίων υδάτων, με παροχές οι οποίες αυξάνουν σημαντικά κατά τη διάρκεια έντονων βροχοπτώσεων, υπολογίστηκαν τα ανώτατα επιτρεπτά όρια των μερικώς επεξεργασμένων λυμάτων τα οποία μπορούν να διατίθενται στον Πατραϊκό, εξασφαλίζοντας ωστόσο επιθυμητές τιμές αραίωσης στα όρια της κολυμβητικής ζώνης, έτσι ώστε οι ανώτατες συγκεντρώσεις των FC να μην υπερβαίνουν τα 500 FC/100 ml, με βάση την Ευρωπαϊκή Οδηγία 2006/7/EC. Για την περίπτωση του ρύπου με αποδόμηση και χρησιμοποιώντας $T_{90} = 30$ h, που περιγράφει την αποδόμηση των FC υπό τις δυσμενέστερες συνθήκες, δηλαδή κατά τη διάρκεια της νύχτας ή υπό συνθήκες έντονης νέφωσης, περιλαμβάνοντας και την περίπτωση εγκλωβισμού των λυμάτων, οι συγκεντρώσεις των λυμάτων τα οποία μπορούν να διατίθενται μερικώς επεξεργασμένα στον αποδέκτη δεν θα πρέπει να υπερβαίνουν τα 2×10^5 FC/100 ml, προκειμένου να ικανοποιούνται τα όρια που προβλέπονται από τους κανονισμούς στην κολυμβητική ζώνη. Επιπροσθέτως, και προκειμένου να καθορίσουμε ένα ανώτατο όριο συγκέντρωσης των FC που μπορούν να εμπεριέχονται στα μερικώς επεξεργασμένα απόβλητα, υπολογίζουμε το ανώτατο όριο και για την περίπτωση του διατηρητικού ρύπου, το οποίο προκύπτει της τάξης των 10^5 FC/100 ml.

Με βάση τις αριθμητικές προσομοιώσεις, για την παρούσα λειτουργία της Ε.Ε.Λ. της πόλης των Πατρών αποδεικνύεται ότι η επίδραση του πεδίου λυμάτων είναι αμελητέα στη ρύπανση της παράκτιας ζώνης, δεδομένου ότι οι τελικές αραίωσεις του πεδίου λυμάτων προκύπτουν σε συμφωνία τόσο με την νέα ευρωπαϊκή οδηγία για την ποιότητα των υδάτων κολύμβησης, 2006/7/EC, όσο και με την αντίστοιχη ελληνική, ΚΥΑ 46399/1352/3/7/1986. Επιβάλλεται, ωστόσο, να μελετηθούν μελλοντικά σενάρια λειτουργίας του βιολογικού καθαρισμού της πόλης, εφαρμόζοντας το αριθμητικό ομοίωμα, δεδομένου ότι οι παραπάνω προσομοιώσεις καλύπτουν μόνο την Α φάση λειτουργίας της Ε.Ε.Λ. της πόλης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Αντωνόπουλος, Ι., Ηλίας, Δ., Παπαγεωργίου, Κ., Αχμεντ, Σ., 1992. *Έρευνα Ανεμολογικού Πεδίου στην Περιοχή Ρίου-Αντιρρίου για το έργο της Ζεύξης*. Τελική Έκθεση, Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε. Γενική Γραμματεία Δημοσίων Έργων – Διεύθυνση Δ1.
- Αχιλλεόπουλος, Π., 1990. *Παλίρροιες σε Κόλπους και Στενά της Δυτικής Ελλάδας α) Πατραϊκός Κόλπος, β) Δίαυλος Λευκάδας*. Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Γεωλογίας, σελ. 265.
- Carvalho, J.L.B., R.C. Feitosa, P.C. Rosman, and P.J.W. Roberts., 2006. *A Bacterial Decay Model for Coastal Outfall Plumes*. J. of Coastal Res., SI 39: 1524-1528.
- Δ.Ε.Υ.Α.Π., 2000. *Υποθαλάσσιος Αγωγός Διάθεσης Επεξεργασμένων Λυμάτων Ε.Ε.Λ. Πατρών και Συναφή Έργα – Μέρος Δ: Τελικό Τεχνικό Αντικείμενο*. Υπηρεσία Αποχέτευσης, Πάτρα, σελ. 116.
- Δ.Ε.Υ.Α.Π., 2009. *Ο Πατραϊκός Κόλπος από Τεχνική Σκοπιά*, Τεχνική Έκθεση, http://www.deyap.gr/environment/clean_sea.html, 6 σελ.
- DHI, 2007a. *MIKE 3 FLOW MODEL FM. Hydrodynamic module-User Guide*. DHI, Software.

- DHI, 2007b. *MIKE 3 FLOW MODEL FM. Transport module-User Guide*. DHI, Software.
- Φερεντίνος, Γ., Παπαθεοδώρου, Γ., Χασιώτης, Θ., 1994. *Υποθαλάσσιος Αγωγός Διάθεσης Λυμάτων Ε.Ε.Α. Πατρών. Μέρος Β – Σχεδιασμός Αγωγού και Υπολογισμός Διάλυσης Λυμάτων στον Αποδέκτη*, Τελική Τεχνική Έκθεση, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Γεωλογίας.
- Fourniotis, N.Th. and Horsch, G.M., 2008a. *Simulation of the Winter Meso-Scale Wind and Tidal Circulation in the Gulf of Patras (Greece)*. Proc. of the ASME 27th International Conference on OMAE, 15-20 June, Estoril, Portugal, paper OMAE2008-57394, pp. 1-7.
- Fourniotis, N.Th. and Horsch, G.M., 2008b. *Modeling Wind and Tide-Induced Currents in the Eastern Ionian Sea: Patraikos Gulf (Greece)*. Proc. of 16th IAHR-APD Congress and 3rd Symposium of IAHR- ISHS, paper A4a125, 20-23 October, Nanjing, China, vol. IV, pp. 1201-1206.
- Fourniotis, N.Th. and Horsch, G.M., 2010. *Three-dimensional numerical simulation of wind-induced barotropic circulation in the Gulf of Patras*. Ocean Eng. 37(4): 355-364.
- Li, S. and Hodgins, D.O., 2004. *A dynamically coupled outfall plume-circulation model for effluent dispersion in Burrard Inlet, British Columbia*. J. Environ. Eng. Sci., 3: 433-449.
- Παπαηλιού, Δ.Δ., 1982. *Ωκεανογραφική Μελέτη για τη Ρύπανση του Πατραϊκού Κόλπου – Τόμος II*. Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πάτρα, σελ. 161.
- Pavlidou, A., Kontoyiannis, H. and Psyllidou-Giouranovits, R., 2004. *Trophic conditions and stoichiometric nutrient balance in the inner Saronikos Gulf (central Aegean sea) affected by the Psittalia sewage outfall*. Fresenius Env. Bul., 13(12b): 1509-1514.
- Pavlidou, A., Kontoyiannis, H. and Psyllidou-Giouranovits, R., 2008. *Nutrient concentrations in the inner Saronikos Gulf after the sewage secondary treatment*. Fresenius Env. Bul., 17(11a): 1852-1858.
- Piper, D.J.W., Panagos, A.G., Kontopoulos, N., Spiliotopoulou, M., 1982. *Coastal processes and morphology, Gulf of Patras, Greece*. Zeitschrift fuer Geomorphologie N. F., 26 (3): 365–374.
- Roberts, P.J.W., Snyder, W.H. and Baumgartner, D.J., 1989a. *Ocean Outfalls. 1 Submerged Wastefield Formation*. J. of Hydraul. Eng., 115(1): 1-25.
- Roberts, P.J.W., Snyder, W.H. and Baumgartner, D.J., 1989b. *Ocean Outfalls. 2 Spatial Evolution of Submerged Wastefield*. J. of Hydraul. Eng., 115(1): 26-48.
- Roberts, P.J.W., Snyder, W.H. and Baumgartner, D.J., 1989c. *Ocean Outfalls. 3 Effect of Diffuser Design on Submerged Wastefield*. J. of Hydraul. Eng., 115(1): 49-70.
- Rodi, W., 1980. *Turbulence models and their application in Hydraulics – A state of the art review*. Special IAHR publication.

**ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΜΑΚΡΟΠΡΟΘΕΣΜΗΣ
ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ, ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ ΚΑΙ ΣΥΣΣΩΡΕΥΣΗΣ ΡΥΠΩΝ ΤΗΣ
ΜΑΥΡΗΣ ΘΑΛΑΣΣΑΣ ΣΤΙΣ ΠΑΡΑΚΤΙΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΤΟΥ
Β. ΑΙΓΑΙΟΥ ΜΕΣΩ ΤΩΝ ΣΤΕΝΩΝ ΤΩΝ ΔΑΡΔΑΝΕΛΙΩΝ
Κ. Κοπασάκης*, Α. Γεωργουλός, Π. Αγγελίδης, Ν. Κωτσοβίνος**

Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δ.Π.Θ., Β. Σοφίας 12, Ξάνθη 67100

*Στοιχεία επικοινωνίας: kkopasak@civil.duth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία αφορά τη μελέτη της μακροπρόθεσμης μεταφοράς, διασποράς και συσσώρευσης των παθητικών ρύπων της Μαύρης Θάλασσας, που εκρέουν στο Β. Αιγαίο από τα στενά των Δαρδανελίων, με τη χρήση του τρισδιάστατου υδροδυναμικού μοντέλου ELCOM. Για την παρακολούθηση της πορείας και της εξάπλωσης των ρύπων της Μαύρης Θάλασσας στο Β. Αιγαίο χρησιμοποιήθηκαν κατάλληλοι υπολογιστικοί δείκτες, οι οποίοι προσφέρονται από το αριθμητικό μοντέλο. Οι αριθμητικές προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν λαμβάνοντας υπόψη τη δύναμη Coriolis, που οφείλεται στην περιστροφή της γης και τις ατμοσφαιρικές δράσεις, που ασκούνται στην επιφάνεια του Β. Αιγαίου, όπως είναι η ατμοσφαιρική πίεση, η ηλιοφάνεια, η σχετική υγρασία, η θερμοκρασία αέρα, το ύψος βροχής και η ταχύτητα και διεύθυνση του ανέμου.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: παθητικοί ρύποι, Β. Αιγαίο, Μαύρη Θάλασσα, επιφανειακό πλούμιο, Δαρδανέλια.

**NUMERICAL SIMULATION OF THE LONG-TERM TRANSPORT,
DISPERSION AND ACCUMULATION OF THE BLACK SEA
POLLUTANTS IN TO THE NORTH AEGEAN COASTAL AREAS
THROUGH THE DARDANELLES STRAITS**

K. Kopasakis*, A. Georgoulas, P. Angelidis, N. Kotsovinos

Department of Civil Engineering, Democritus University of Thrace,

Vas. Sofias 12, GR-67100 Xanthi, Greece.

*Corresponding author : kkopasak@civil.duth.gr

ABSTRACT

The present paper concerns the study of the long-term transport, dispersion and accumulation of the Black Sea passive pollutants that outflow in the North Aegean through the Dardanelles Straits, with the use of the three dimensional hydrodynamic model ELCOM. Suitable computational tracers that offered from the numerical model were used to monitor the path and the dispersion of the Black Sea pollutants in the North Aegean. The numerical simulations were made by taking into account the Coriolis force that is caused due to the earth rotation, and the atmospheric forces acting to the N. Aegean surface such as the atmospheric pressure, the sunlight, the relative humidity, the air temperature, the rainfall height and the wind speed and direction.

KEY WORDS: passive pollutants, N. Aegean, Black Sea, surface plume, Dardanelles.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ανταλλαγή υδάτων μεταξύ της Θάλασσας της Μεσογείου και της Μαύρης Θάλασσας πραγματοποιείται στα Στενά των Δαρδανελίων. Η άνω επιφανειακή στρώση βάθους 10m, η οποία προέρχεται από τη Μαύρη Θάλασσα και κατευθύνεται προς το Αιγαίο, παρουσιάζει χαμηλή αλατότητα και θερμοκρασία ενώ οι κατώτερες στρώσεις, που βρίσκονται σε βάθος 10m έως 55m, εμπεριέχουν υδάτινες μάζες υψηλής αλατότητας, οι οποίες προέρχονται από το Αιγαίο και καταλήγουν στη Μαύρη Θάλασσα. Ο φυσικός αυτός μηχανισμός, που δημιουργείται από τα αρχαία ακόμη χρόνια στα στενά των Δαρδανελίων, αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες επίδρασης των υδροδυναμικών και βιοχημικών χαρακτηριστικών της υδάτινης στήλης του Βορείου Αιγαίου.

Στο Β. Αιγαίο διακρίνονται δυο πιθανές αιτίες ρύπανσης των υδάτων του, λόγω της υψηλής κυκλοφορίας που εμφανίζεται στα Στενά της Τουρκίας και λόγω της περιβαλλοντικής υποβάθμισης των υδάτων της λεκάνης της Μαύρης Θάλασσας. Η πρώτη αιτία συνδέεται με τη συνεχώς αυξανόμενη παρουσία των ατυχημάτων στα Τουρκικά Στενά και στην αναπόφευκτη ρύπανση που προκαλείται (Alper et al. 2006), ενώ η δεύτερη αφορά την εκροή των υφάλμυρων υδάτων της Μαύρης Θάλασσας στο Β. Αιγαίο μέσω των Στενών των Δαρδανελίων (Birpinar et al. 2006). Συνεπώς, αποτελεί επιτακτική ανάγκη η ανάπτυξη εργαλείων παρακολούθησης, προσομοίωσης και αξιολόγησης, ώστε να εκτιμηθεί η μακροχρόνια επίδραση της εκροής των υδάτων της Μαύρης Θάλασσας, τα οποία μεταφέρουν, διαχέουν και συσσωματώνουν ρύπους στις παράκτιες περιοχές του Β. Αιγαίου. Ένα σημαντικό βήμα προς αυτήν την ερευνητική περιοχή αποτελεί ο καθορισμός της μακροχρόνιας ικανότητας του Β. Αιγαίου να μεταφέρονται και να συσσωρεύονται ρύποι της Μαύρης Θάλασσας στις παράκτιες περιοχές του.

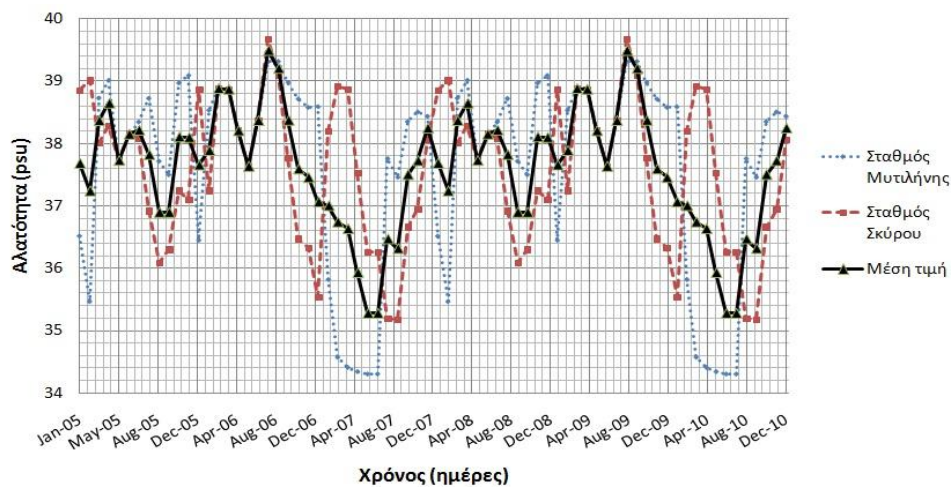
Στην παρούσα εργασία πραγματοποιείται αριθμητική προσομοίωση και μελέτη της δυναμικής μεταφοράς, διασποράς και συσώρευσης των παθητικών ρύπων της Μαύρης Θάλασσας, που εκρέουν από τα Στενά των Δαρδανελίων στην παράκτια περιοχή του Βορείου Αιγαίου με τη χρήση του τρισδιάστατου υδροδυναμικού μοντέλου ELCOM. Το ELCOM χρησιμοποιεί υδροδυναμικά και θερμοδυναμικά μοντέλα για την προσομοίωση της χρονικής συμπεριφοράς στρωματωμένων ροών υπό την επιρροή περιβαλλοντικών δράσεων. Η αριθμητική μέθοδος, που χρησιμοποιεί το ELCOM, επιλύει τις μη-μόνιμες εξισώσεις Navier-Stokes για ασυμπίεστη ροή αγνοώντας τους μη-υδροστατικούς όρους πίεσης. Για την οριζόντια τύρβη λύνονται οι μεσοποιημένες κατά Reynolds εξισώσεις Navier Stokes, και το «κλείσιμο» της τύρβης πραγματοποιείται από έναν συντελεστή τυρβώδους συνεκτικότητας, ενώ για την κατακόρυφη τύρβη χρησιμοποιείται ένα κατακόρυφο μοντέλο στρώματος ανάμειξης. Επίσης, η μεταφορά των παθητικών και ενεργητικών βαθμωτών μεγεθών (π.χ. δείκτες, αλατότητα και θερμοκρασία) πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας την συντηρητική μέθοδο ημιπεπλεγμένης διακριτοποίησης ULTIMATE QUICKEST (Hodges & Dallimore 2010b).

2. ΣΥΓΚΡΟΤΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΚΑΙ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ

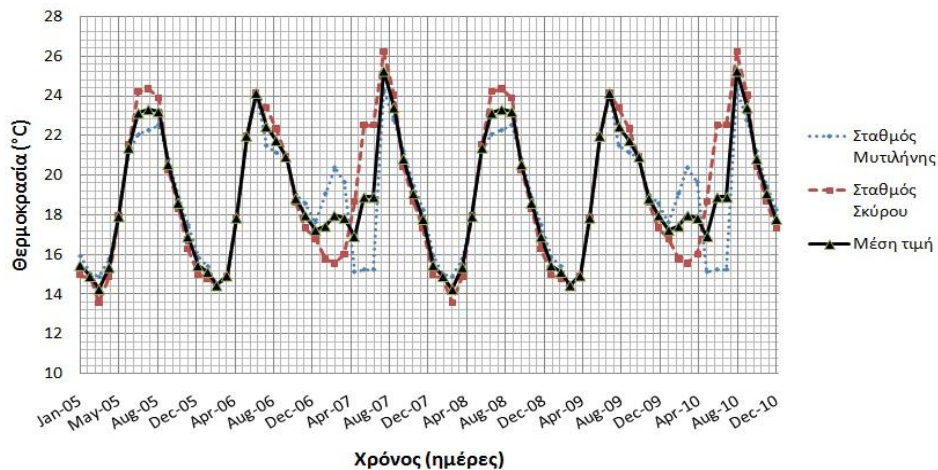
Η επιλεγόμενη περιοχή του Β. Αιγαίου, που χρησιμοποιήθηκε για την αριθμητική προσομοίωση στην παρούσα εργασία, απεικονίζεται στο Σχήμα 1. Στην κατακόρυφη διεύθυνση χρησιμοποιήθηκαν 200 στρώσεις, με πάχος στρώσεις 5m, καλύπτοντας βάθος 1000 m. Στο σημείο θα πρέπει να διευκρινιστεί πως ο όγκος νερού που καταλαμβάνουν τα κατώτερα στρώματα του Β. Αιγαίου (από τα 1000m έως τα 1500m) συγκρινόμενος με τον ολικό όγκο νερού του Β. Αιγαίου είναι αρκετά μικρός (περίπου

ημερησίων τιμών της αλατότητας και της θερμοκρασίας στο ανοιχτό όριο από τους εν λόγω σταθμούς παρουσιάζονται στα Σχήματα 2α και 2β αντίστοιχα. Για λόγους απλότητας, οι τιμές της αλατότητας και της θερμοκρασίας, που χρησιμοποιήθηκαν για το ανοιχτό όριο, είναι αυτές που αναφέρονται στη μέση γραφική παράσταση των Σχημάτων 2α και 2β.

Η μελέτη της μεταφοράς και διάχυσης του ρύπου της Μαύρης Θάλασσας (PMΘ), που εκρέει στο Β. Αιγαίο από τα στενά των Δαρδανελίων, πραγματοποιείται με τη χρήση κατάλληλων αδιάστατων συντηρητικών παθητικών δεικτών (Tracers). Καθώς ο δείκτης είναι συντηρητικός, η διάλυση επιτυγχάνεται μέσω φυσικών διεργασιών ανάμειξης. Για την παρακολούθηση της διασποράς των ρύπων από τη Μαύρη Θάλασσα στο Βόρειο Αιγαίο μέσω των στενών των Δαρδανελίων επιλέχθηκαν δύο συντηρητικοί δείκτες (Tracer 1 και Tracer 2). Ο δείκτης Tracer 1 απελευθερώνεται στο σημείο εκροής των Δαρδανελίων από το πρώτο έτος της προσομοίωσης, ενώ ο δείκτης Tracer 2 στην αρχή του έτους 2009.



(α)



(β)

Σχήμα 2. Μετρήσεις των σταθμών Σκύρου και Λέσβου από το ΕΛΚΕΘΕ για δεδομένα που αφορούν (α) την αλατότητα και (β) τη θερμοκρασία νερού για τα υπολογιστικά έτη 2005 έως 2010.

Το υδροδυναμικό μοντέλο ELCOM έχει βαθμονομηθεί επιτυχώς για διάφορες περιοχές της Μεσογείου, όπως είναι αυτή της Θάλασσας της Αδριατικής στην εργασία

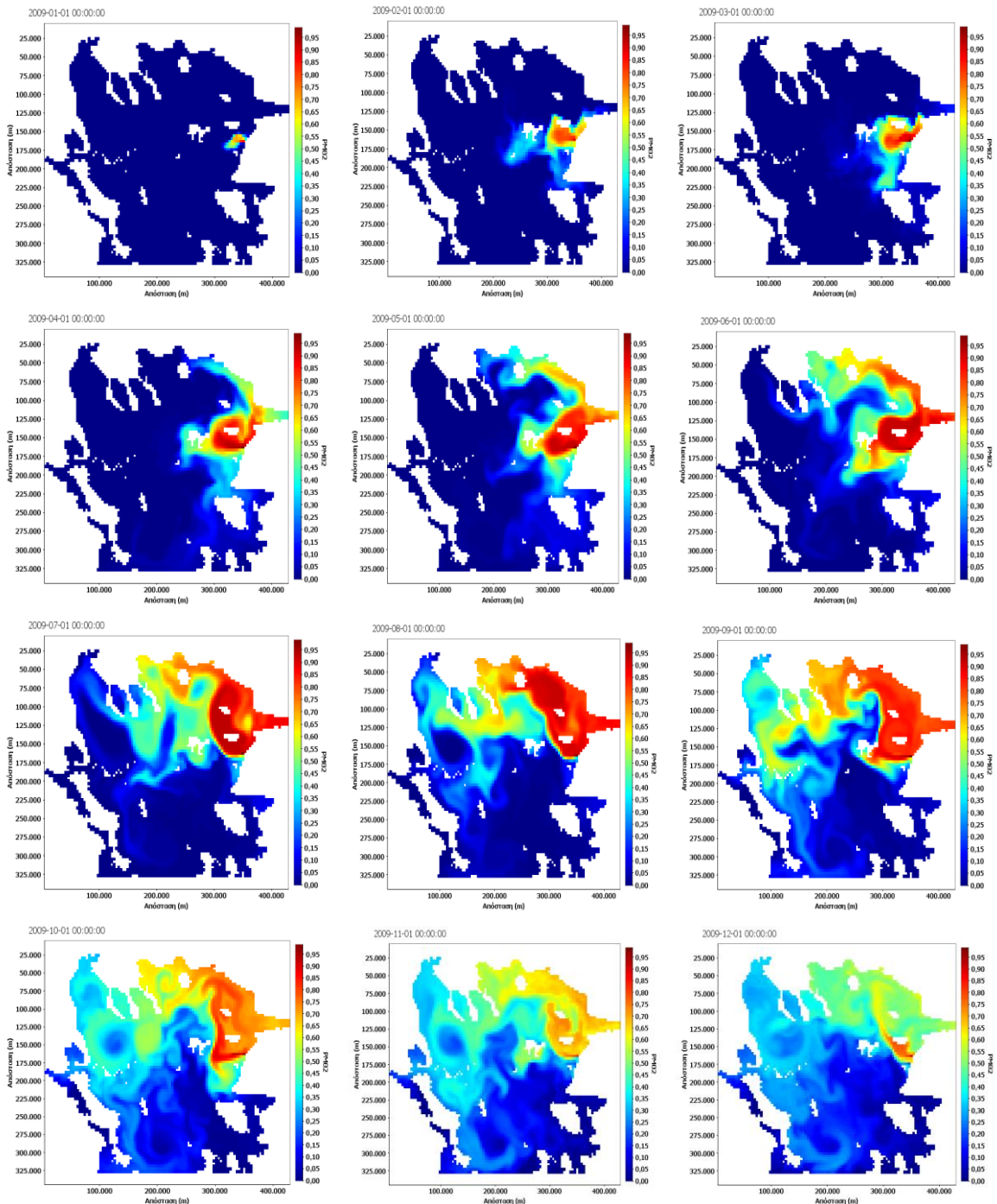
των Spillman et al. (2007) και της Θάλασσας του Β. Αιγαίου στην εργασία των Kopasakis et al. (2012).

3. ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΤΩΝ ΣΥΝΤΗΡΗΤΙΚΩΝ ΡΥΠΩΝ ΤΗΣ ΜΑΥΡΗΣ ΘΑΛΑΣΣΑΣ ΣΤΟ Β. ΑΙΓΑΙΟ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΠΑΘΗΤΙΚΩΝ ΔΕΙΚΤΩΝ (Tracers)

Στην παρούσα ενότητα πραγματοποιείται μελέτη και ανάλυση των συντηρητικών και παθητικών ρύπων, που προέρχονται από την Μαύρη Θάλασσα, μέσω των στενών των Δαρδανελίων με την χρήση αδιάστατων παθητικών δεικτών, που χρησιμοποιεί το υδροδυναμικό μοντέλο ELCOM. Η μελέτη της διάχυσης διασποράς και συσσώρευσης των ρύπων αυτών στην υδάτινη στήλη του Β. Αιγαίου πραγματοποιείται για δυο χρονικές περιόδους. Η πρώτη χρονική περίοδος περιλαμβάνει τα έτη 2005-2010, τα οποία προσομοιώθηκαν με την εισαγωγή δεδομένων, που βασίζονται σε πραγματικά δεδομένα (μετρήσεις πεδίου, μετεωρολογικά δεδομένα κ.α.) και η δεύτερη περίοδος περιλαμβάνει μακροπρόθεσμες προγνώσεις, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση ρεαλιστικών δεδομένων για τα έτη 2011 έως 2020.

Ο δείκτης Tracer 1, ο οποίος από εδώ και στο εξής θα αναφέρεται ως Ύψος της Μαύρης Θάλασσας 1' (PMΘ1), εξαρτάται από την εποχιακή μεταβολή της επιφανειακής εκροής των Δαρδανελίων. Ο δείκτης αυτός είναι αδιάστατος, λαμβάνει μέγιστη τιμή ίση με τη μονάδα στο σημείο εκροής των Δαρδανελίων και χρησιμοποιείται για τη μελέτη των συντηρητικών PMΘ για όλη τη διάρκεια των χρόνων προσομοίωσης, που διαρκούν από το έτος 2005 έως το 2020. Επίσης για την καλύτερη μελέτη των PMΘ εισάγεται στο σύστημα και ο δείκτης Tracer 2 ή PMΘ2, που αφορά την περιγραφή της εξέλιξης του PMΘ μετά από 4 υπολογιστικά έτη προσομοίωσης όταν, όπως αναλύεται και παρακάτω, στο σύστημα λαμβάνει χώρα κατάσταση δυναμικής ισορροπίας.

Στο Σχήμα 3 δίνεται η μηνιαία εξέλιξη του PMΘ2 στο Β.Αιγαίο το έτος 2009. Τους μήνες Ιανουάριο και Φεβρουάριο ο PMΘ2 μετά την είσοδό του στο Β. Αιγαίο διασπάται σε δύο ρεύματα με το ένα ρεύμα να εκτρέπεται βόρεια κινούμενο παράλληλα με την ακτογραμμή του Βορείου Αιγαίου, που βρίσκεται άνωθεν του σημείου εκροής των Δαρδανελίων, και το άλλο ρεύμα να καταγράφει μια δεξιόστροφη τροχιά προσεγγίζοντας το νότιο και νοτιοδυτικό τμήμα της Ίμβρου. Τους μήνες της άνοιξης ο επιφανειακός ρύπος της Μαύρης Θάλασσας κινείται αντικυκλωνικά γύρω από την Ίμβρο ενώ επεκτείνεται κατά μήκος της ακτογραμμής του Β. Αιγαίου φτάνοντας το μήνα Μάιο έως τον Κόλπο του Στρυμονικού. Τους καλοκαιρινούς μήνες ο PMΘ2 συνεχίζει να κινείται στις παράκτιες περιοχές της Ίμβρου και αναμιγνύεται ακόμη πιο βόρεια με τα νερά που βρίσκονται στην παράκτια περιοχή της Σαμοθράκης τα οποία καταγράφουν κυκλωνικές κινήσεις γύρω από αυτήν. Επίσης ένα ποσοστό ρύπου της Μαύρης Θάλασσας έχει πλέον εισχωρήσει στα νερά της Χερσονήσου της Χαλκιδικής και κάποιο άλλο κάνει την εμφάνισή του στον Κόλπο του Θερμαϊκού κατά τον μήνα Αύγουστο. Τον μήνα Σεπτέμβριο ρύποι της Μαύρης Θάλασσας ανιχνεύονται στην περιοχή των Β. Σποράδων ακόμη και μέσα στον Παγασητικό Κόλπο, ενώ τους υπόλοιπους φθινοπωρινούς μήνες (Οκτώβριο και Νοέμβριο) η παρουσία του κυκλώνα των Β. Σποράδων αποδυναμώνει την τοπική συσσώρευση των ρύπων, που καταφθάνουν στην περιοχή συμπαρασύροντάς τους στις παράκτιες περιοχές της Βόρειας Εύβοιας και του Κόλπου του Θερμαϊκού. Τέλος το μήνα Δεκέμβριο η εμφάνιση του επιφανειακού PMΘ2 παρουσιάζεται αποδυναμωμένη καθώς η πλήρης μίξη της υδάτινης στήλης του Β. Αιγαίου επιτρέπει τη διάλυση και εισχώρηση των επιφανειακών ρύπων στα κατώτερα στρώματα.

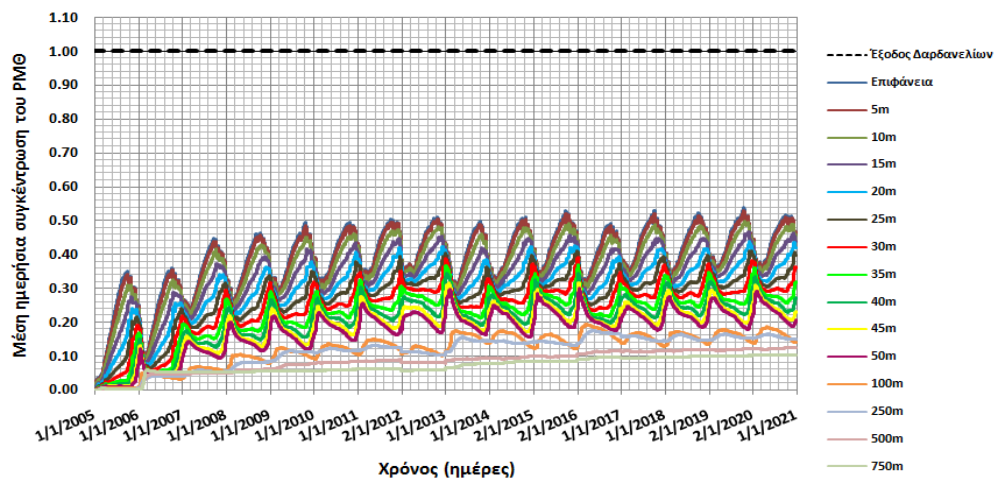


Σχήμα 3. Μηνιαία εξέλιξη της συγκέντρωσης του PM₁₀ στην επιφάνεια του Β. Αιγαίου το έτος 2009.

Στο διάγραμμα του Σχήματος 4 δίνεται η κατανομή της μέσης ημερήσιας συγκέντρωσης του PM₁₀ σε όλο το βάθος της υδάτινης στήλης του Β. Αιγαίου για όλη την διάρκεια των αριθμητικών προσομοιώσεων. Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται πως η συγκέντρωση του PM₁₀ λαμβάνει σταθερό ρυθμό εποχιακής μεταβολής μετά από 4 υπολογιστικά έτη, που σημαίνει πως η εκροή των Δαρδανελίων είναι ίση με τη εκροή στο ανοιχτό όριο, που βρίσκεται στο νότιο άκρο του υπολογιστικού πλέγματος. Από τη χρονική στιγμή, που στο μοντέλο θεσπίζεται μια δυναμική ισορροπία, είναι φανερό πως το σύστημα περνάει σε ένα διαφορετικό τρόπο λειτουργίας, ο οποίος εξαρτάται από το μεταβατικό χαρακτήρα της δράσεως των

περιβαλλοντικών δυνάμεων. Τα πρώτα τέσσερα υπολογιστικά έτη αποτελούν τη μεταβατική περίοδο της ρύθμισης απόκρισης του μοντέλου. Οι μεταβολές της συγκέντρωσης του PM₁₀ συναρτήσει του χρόνου, που δίνονται στο Σχήμα 4, αποδεικνύουν το συνδυασμό της γρήγορης απόκρισης του μοντέλου και της απόκρισης των εξαρτημένων χρονικά δράσεων.

Σε γενικές γραμμές, η ημερήσια συγκέντρωση του PM₁₀ είναι εποχιακά μεταβαλλόμενη και αυξάνεται κατά τη διάρκεια της άνοιξης και του καλοκαιριού, όταν αναπτύσσεται έντονη στρωμάτωση στην υδάτινη στήλη του Β. Αιγαίου. Κατά τη διάρκεια του χειμώνα στην υδάτινη στήλη του Β. Αιγαίου επιτυγχάνεται πλήρης ανάμειξη με συνέπεια τη μετατόπιση συγκέντρωσης ρύπου στα κατώτερα στρώματα και τη μείωση της συγκέντρωσης του επιφανειακού PM₁₀. Πιο συγκεκριμένα, η συγκέντρωση του PM₁₀ εμφανίζεται υψηλή (37-58% της αρχικής του τιμής) στα ανώτερα στρώματα από την επιφάνεια έως το βάθος των 10 m. Στα 15-20 m βάθος η ημερήσια συγκέντρωση του PM₁₀ είναι περίπου 28-42%, στα 25-30 m ο PM₁₀ είναι 23-34% και στα 35-50 m είναι 11-29%. Για βάθη μεγαλύτερα των 100 m η συγκέντρωση του PM₁₀ παρουσιάζεται μειωμένη αλλά υπολογίσιμη λαμβάνοντας το 12% της αρχικής της τιμής.

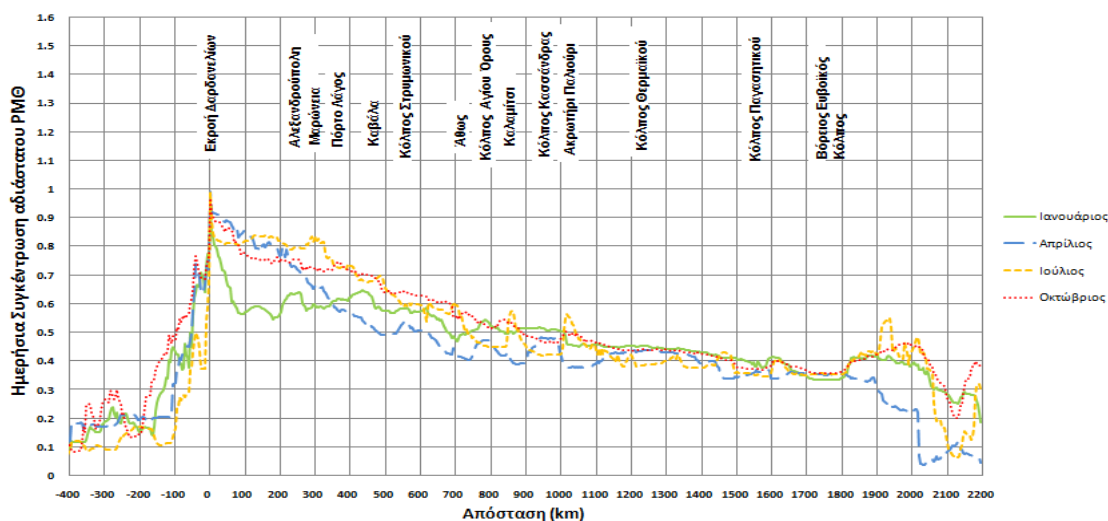


Σχήμα 4. Κατανομή της ημερήσιας συγκέντρωσης του PM₁₀ σαν συνάρτηση του βάθους της υδάτινης στήλης του Β. Αιγαίου .

Η κατανομή της επιφανειακής συγκέντρωσης του συντηρητικού PM₁₀ στις παράκτιες περιοχές του Β. Αιγαίου εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της ροής του ανωστικού επιφανειακού πλούμιου των Δαρδανελίων, τη διεύθυνση και την ένταση του ανέμου και τη δύναμη Coriolis, η οποία ασκείται στο επιφανειακό πλούμιο κατά την είσοδό του στο Β. Αιγαίο και το εξαναγκάζει να εκτραπεί βόρεια προς τα παράλια του Θρακικού Πελάγους (Γεωργουλός κ.α. 2006). Στο Σχήμα 5 δίνεται η γραφική παράσταση, που αφορά τη μακροπρόθεσμη επιφανειακή μεταβολή του PM₁₀ στην ακτογραμμή συναρτήσει του χρόνου κατά το υπολογιστικό έτος 2020. Για διευκρινιστικούς λόγους, οι αρνητικές τιμές, που εμφανίζονται στον οριζόντιο άξονα του διαγράμματος, αφορούν την Τουρκική ακτογραμμή η οποία βρίσκεται νότια του σημείου εκροής των Δαρδανελίων, ενώ οι θετικές αφορούν την ακτογραμμή, που βρίσκεται βόρεια πάνω από το σημείο αυτό. Σύμφωνα με το διάγραμμα του Σχήματος 5, η μέση ημερήσια επιφανειακή συγκέντρωση του PM₁₀ εμφανίζεται μέγιστη στο σημείο εκροής των Δαρδανελίων, που αποτελεί και το σημείο απελευθέρωσης του δείκτη, και μειώνεται απότομα εκατέρωθεν του σημείου εκροής των Δαρδανελίων με την ελάχιστη τιμή του (9% της αρχικής του τιμής) στο νοτιοανατολικό άκρο του

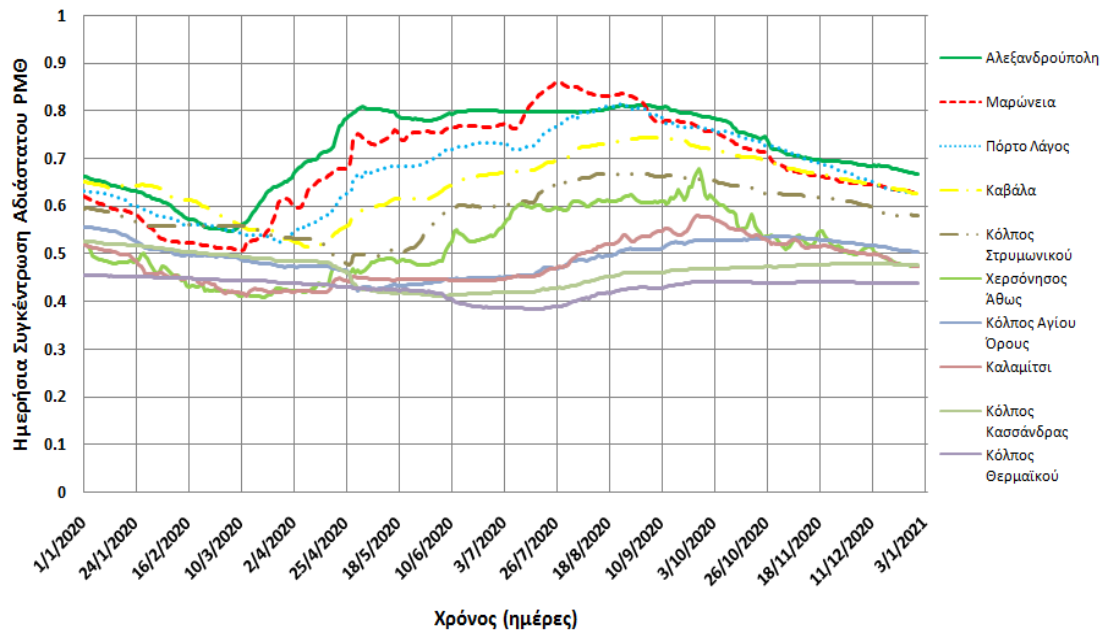
υπολογιστικού πλέγματος, το οποίο βρίσκεται στην Τουρκική ακτογραμμή απέναντι της νήσου Χίου. Η συγκέντρωση του PM₁₀ μειώνεται με μικρότερο ρυθμό συναρτήσει της απόστασης βόρεια πάνω από το σημείο εκροής των Δαρδανελίων. Πιο συγκεκριμένα, οι περιοχές που βρίσκονται στην ακτογραμμή του Β. Αιγαίου και παρουσιάζουν μεγάλα ποσοστά PM₁₀ είναι οι παράκτιες περιοχές της Αλεξανδρούπολης και της Μαρώνας, στις οποίες ο PM₁₀ φτάνει έως 80% και 83% αντίστοιχα της αρχικής του τιμής. Η συγκέντρωση του PM₁₀ εμφανίζεται επίσης υψηλή, περίπου 70%, στην παράκτια περιοχή της Καβάλας και του Πόρτο Λάγους, που φτάνει στα 73%. Στο διάγραμμα του Σχήματος 5, η κατανομή της συγκέντρωσης του PM₁₀ στο Β. Αιγαίο αποτυπώνεται για όλες τις εποχές του υπολογιστικού έτους 2020 και συμπεραίνεται πως κατά το καλοκαίρι και το φθινόπωρο, όπου αναπτύσσεται ισχυρή στρωμάτωση στην υδάτινη στήλη του Β. Αιγαίου, η επιφανειακή συγκέντρωση του PM₁₀ είναι υψηλή, ενώ τον χειμώνα είναι μειωμένη ιδιαίτερα στην Θρακική ακτογραμμή.

Στο Σχήμα 6 παρουσιάζεται η κατανομή του PM₁₀ για διάφορες περιοχές, που βρίσκονται κατά μήκος της ακτογραμμής του Β. Αιγαίου. Όπως προαναφέρθηκε, η περιοχή της Μαρώνας, της Αλεξανδρούπολης και του Πόρτο Λάγους παρουσιάζουν τα υψηλότερα ποσοστά συγκέντρωσης PM₁₀ από αυτά, που εμφανίζονται στο υπόλοιπο τμήμα της ακτογραμμής του Β. Αιγαίου από το τέλος της άνοιξης έως τις πρώτες μέρες του φθινοπώρου. Για τους Κόλπους της Κασσάνδρας και του Θερμαϊκού η συγκέντρωση του PM₁₀ παρουσιάζει μικρότερες τιμές, οι οποίες όμως είναι σημαντικά υψηλές της τάξεως του 45% της αρχικής τους τιμής.



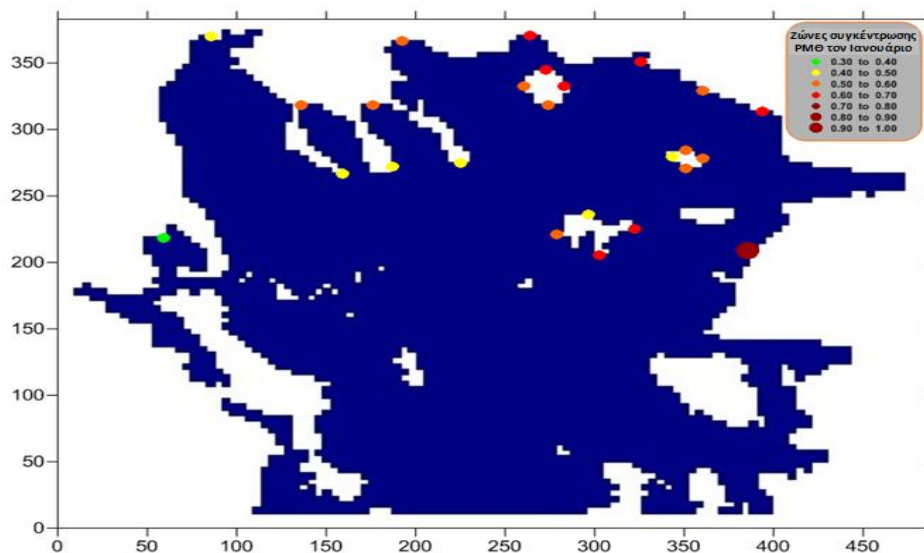
Σχήμα 5. Εποχιακή μεταβολή της επιφανειακής συγκέντρωσης του PM₁₀ σε όλο το μήκος των ακτογραμμών του Β. Αιγαίου κατά το υπολογιστικό έτος 2020.

Η χρήση των συντηρητικών δεικτών και η μελέτη μακροχρόνιας επίδρασης των PM₁₀ στην περιβαλλοντική εξέλιξη του Β. Αιγαίου στην παρούσα εργασία οδηγεί στην ανάγκη καθορισμού "Ζωνών Επικινδυνότητας" πιθανής ρύπανσης παράκτιων περιοχών του Β. Αιγαίου. Οι Ζώνες Επικινδυνότητας κατηγοριοποιούνται σύμφωνα με τον ρυθμό συσσώρευσης των PM₁₀ στις παράκτιες περιοχές. Στα Σχήματα 7α, 7β, 7γ και 7δ κατηγοριοποιούνται τα νερά των παράκτιων πόλεων ή περιοχών σύμφωνα με την πιθανή επικινδυνότητα, που διατρέχουν για υποβάθμιση (ρύπανση) τους κατά το έτος 2020 από την έντονη επίδραση των PM₁₀.

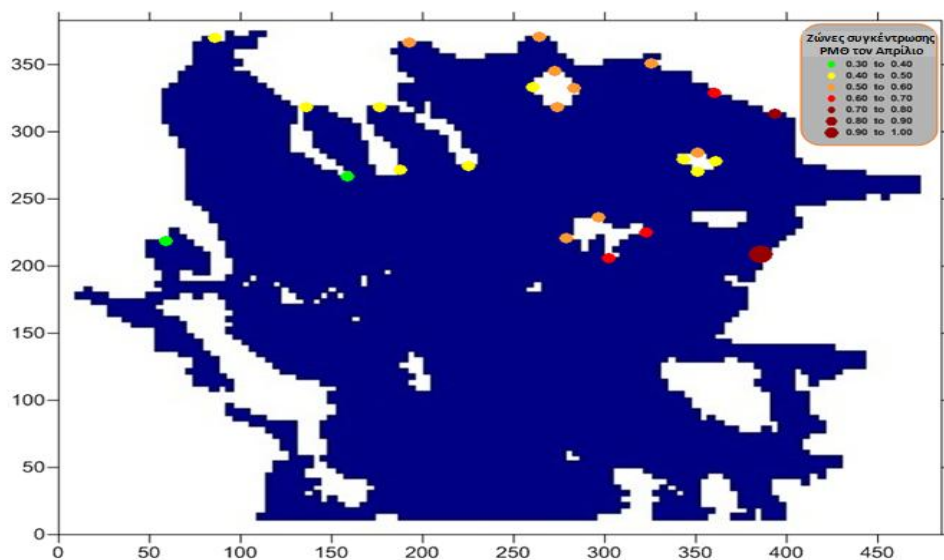


Σχήμα 6. Κατανομή της συγκέντρωσης του ΡΜ₁₀ για διάφορες περιοχές, που βρίσκονται κατά μήκος της ακτογραμμής του Β. Αιγαίου το υπολογιστικό έτος 2020.

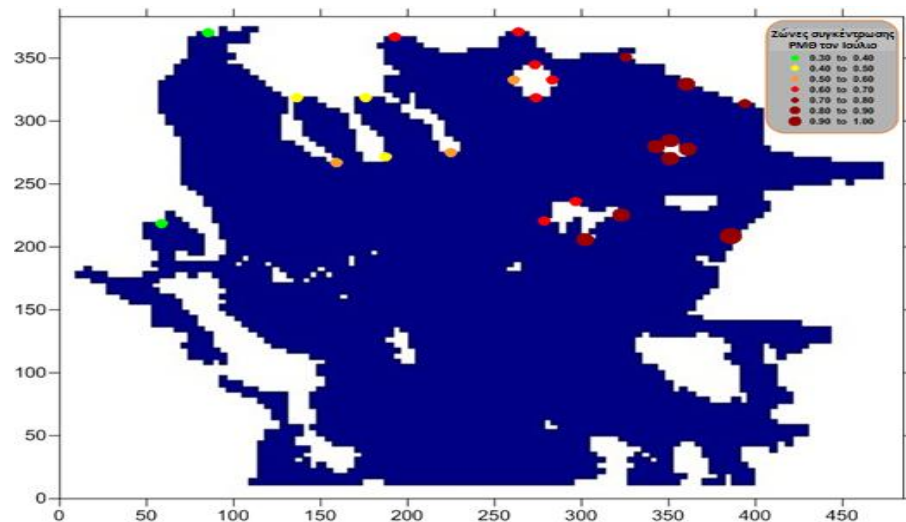
Σύμφωνα με τα Σχήματα 7γ και 7δ η συγκέντρωση του ΡΜ₁₀ λαμβάνει υψηλές τιμές κατά τους μήνες Ιούλιο και Οκτώβριο. Κατά την περίοδο αυτή οι περιοχές που βρίσκονται σε πολύ υψηλές Ζώνες Επικινδυνότητας είναι τα νερά των παράκτιων περιοχών που βρίσκονται μεταξύ της Αλεξανδρούπολης και του Στρυμωνικού κόλπου, το νότιο και ανατολικό τμήμα της Θάσου, όλη η παράκτια περιοχή της Σαμοθράκης και το νότιο και ανατολικό τμήμα της Λήμνου.



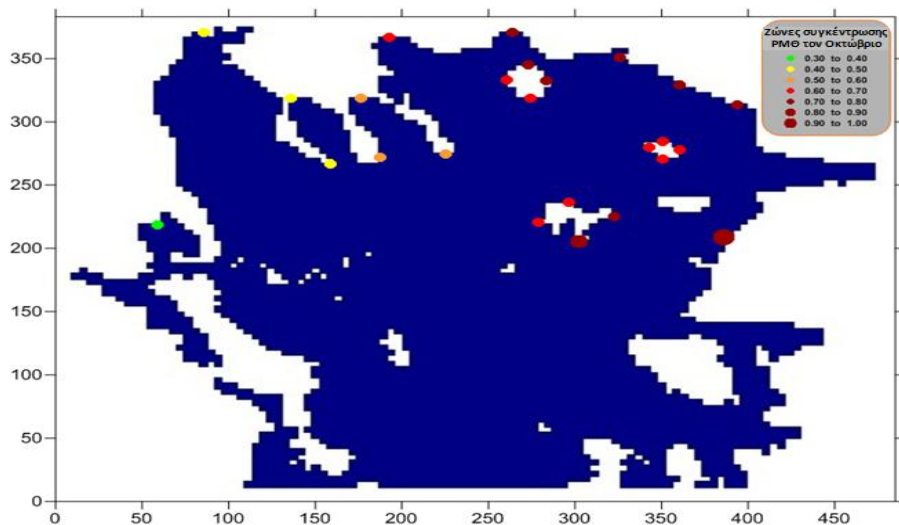
Σχήμα 7α. Ζώνες συγκέντρωσης του ΡΜ₁₀ στο Β. Αιγαίο τον Ιανουάριο του έτους - στόχου 2020.



Σχήμα 7β. Ζώνες συγκέντρωσης του PM₁₀ στο Β. Αιγαίο τον Απρίλιο του έτους - στόχου 2020.



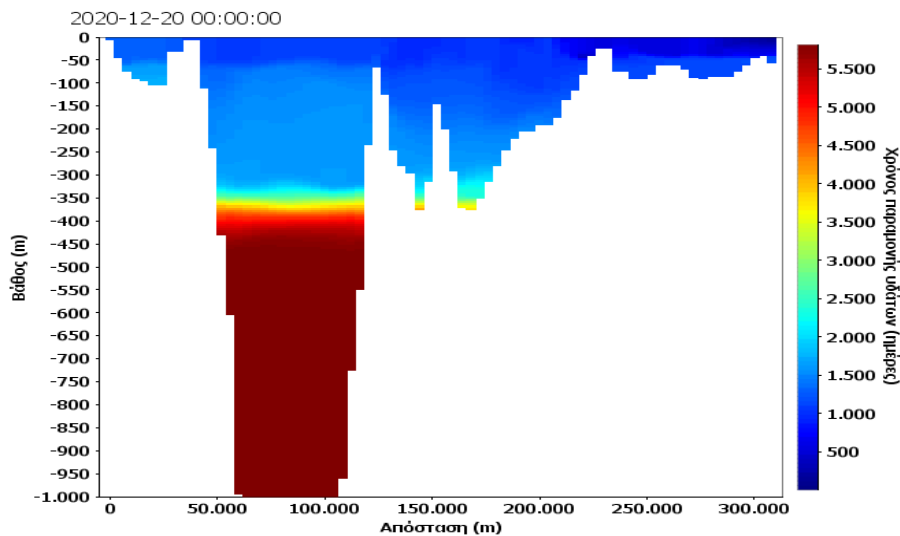
Σχήμα 7γ. Ζώνες συγκέντρωσης του PM₁₀ στο Β. Αιγαίο τον Ιούλιο του έτους - στόχου 2020.



Σχήμα 7δ. Ζώνες συγκέντρωσης του PM₁₀ στο Β. Αιγαίο τον Οκτώβριο του έτους - στόχου 2020.

4. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΑΝΑΝΕΩΣΗΣ ΤΩΝ ΥΔΑΤΩΝ ΤΟΥ Β. ΑΙΓΑΙΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΟΥΣΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

Ένας σημαντικός παράγοντας, που επιδρά στον εγκλωβισμό και την συσσώρευση των ρύπων της Μαύρης Θάλασσας στην υδάτινη στήλη του Β. Αιγαίου, είναι η μορφολογία του πυθμένα του. Το πλατό των Κυκλάδων διαχωρίζει το Βόρειο με το Νότιο Αιγαίο περιορίζοντας την ανταλλαγή των υδάτων μεταξύ των δυο λεκανών σε βάθη μεγαλύτερα των 400 m κάτι το οποίο υποστηρίζεται και από τους Zervakis & Georgopoulos (2002). Επομένως ένα μεγάλο ποσοστό του ρύπου που μεταφέρεται κάτω από τα 400 m βάθος στο Β. Αιγαίο εγκλωβίζεται και συσσωρεύεται εκεί λόγω της περιορισμένης. Στο Σχήμα 8 δίνεται ο χρόνος παραμονής των υδάτων στην τομή Α-Α' του Σχήματος 1 κατά το έτος - στόχο 2020. Σύμφωνα με το σχήμα αυτό, η παραμονή των υδάτων σε βάθος ανώτερο των 400 m στο τέλος του έτους - στόχου 2020 προσεγγίζει τις 5800 ημέρες, δηλαδή τα 16 χρόνια. Η διαπίστωση αυτή σε συνδυασμό με το σχετικά μικρό αλλά εξίσου σημαντικό ποσοστό, άνω του 10%, του αδιάστατου παθητικού PM₁₀, που διαπιστώνεται και προβλέπεται ότι μπορεί να μεταφερθεί σε βάθος άνω των 500 m στο Σχήμα 4, αποτελεί σημαντική ένδειξη μελλοντικής υποβάθμισης των κατώτερων υδάτινων στρωμάτων του Β. Αιγαίου.



Σχήμα 8. Χρόνος παραμονής των υδάτων στην τομή Α-Α' του Β. Αιγαίου.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η πραγματοποίηση των αριθμητικών προσομοιώσεων του Β. Αιγαίου με τη χρήση του υδροδυναμικού μοντέλου ELCOM έχει ως στόχο τη μελέτη της αλληλεπίδρασης της εκροής των Δαρδανελίων με την κλιματική δράση, τη δομή της υδάτινης στήλης του Β. Αιγαίου και τη συγκέντρωση του ρύπου της Μαύρης Θάλασσας επί ενός συνόλου χρονικών και χωρικών κλιμάκων του Β. Αιγαίου. Εκτός από τη μελέτη των υδροδυναμικών χαρακτηριστικών (αλατότητα, θερμοκρασία νερού, πυκνότητα και κυκλοφορία υδάτων) του επιφανειακού πλουμίου των Δαρδανελίων η οποία έχει πραγματοποιηθεί και από άλλους ερευνητές στο παρελθόν (Androulidakis & Kourafalou 2011, Tzali et al. 2010, κ.α.), η παρούσα εργασία αποτελεί την πρώτη μελέτη της μακροχρόνιας πορείας και συσσώρευσης συντηρητικών παθητικών ρύπων της Μαύρης Θάλασσας, που μεταφέρονται στα νερά του Βορείου Αιγαίου, με τη χρήση υπολογιστικών δεικτών (Tracers).

Από την παράθεση και ανάλυση των ποσοτικών αποτελεσμάτων, που προκύπτουν από τις αριθμητικές προσομοιώσεις με την χρήση του υδροδυναμικού μοντέλου ELCOM, συμπεραίνονται τα εξής:

- Μια σημαντική ποσότητα του PM₁₀, που εκρέει στο Β. Αιγαίο, εκτρέπεται και συσσωρεύεται στις παράκτιες περιοχές του και ιδιαίτερα στα Θρακικά παράλια με μεγάλο κίνδυνο μέσα στις επόμενες δεκαετίες την περιβαλλοντική υποβάθμιση των περιοχών αυτών.
- Οι παράκτιες περιοχές του Β. Αιγαίου, οι οποίες δέχονται μεγάλες ποσότητες συγκέντρωσης PM₁₀, είναι η ακτογραμμή που βρίσκεται ανάμεσα στην Αλεξανδρούπολη και την Καβάλα με υψηλά ποσοστά του PM₁₀, που φτάνουν τα 80% και 83% αντίστοιχα τους καλοκαιρινούς και φθινοπωρινούς μήνες, όλη η παράκτια περιοχή της Σαμοθράκης με τη συγκέντρωση του PM₁₀ να κυμαίνεται από 80% έως 89% της αρχικής του τιμής (σημείο εκροής των Δαρδανελίων) τους θερμούς μήνες, το βόρειο και ανατολικό τμήμα της Θάσου με ποσοστό 77% την περίοδο του φθινοπώρου, και το νότιο και ανατολικό τμήμα της Λήμνου με ποσοστό 83% με 89% τους θερμούς μήνες.
- Η συγκέντρωση του PM₁₀ στα επιφανειακά στρώματα του Β. Αιγαίου παρουσιάζει υψηλές τιμές και μεγάλες διακυμάνσεις σε σχέση με τα κατώτερα στρώματα. Η μέση ημερήσια τιμή της επιφανειακής συγκέντρωσης του PM₁₀ σε όλη την επιφάνεια του Β. Αιγαίου φτάνει το 54% της αρχικής του τιμής (σημείο εκροής των Δαρδανελίων) κατά την περίοδο του καλοκαιριού ενώ μειώνεται την περίοδο του χειμώνα με μέση τιμή συγκέντρωσης 35% της αρχικής. Παρόλα αυτά για μεγάλα βάθη (>400m) η ημερήσια συγκέντρωση του PM₁₀ είναι υπολογίσιμη και εμφανίζει αυξητική τάση συναρτήσει του χρόνου ξεπερνώντας κατά μέσο όρο το 10% της αρχικής του τιμής.
- Σε βάθη μεγαλύτερα των 400m επιτυγχάνεται ελάχιστη ανανέωση των υδάτων με αποτέλεσμα οι ρύποι που εισέρχονται στα κατώτερα στρώματα του Β. Αιγαίου να παραμένουν και να συσσωρεύονται μακροπρόθεσμα.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Alper, Ö., Almaz, İlhan Or., Birnur Özbaş., 2006. *Investigation of transit Maritime traffic in the Strait of Istanbul through simulation modeling and scenario analysis*. International Journal of Simulation – Systems Science & Technology 7, 1-9.
- Androulidakis Y., Kourafalou V., 2011. *Evolution of a buoyant outflow in the presence of complex topography: The Dardanelles plume (North Aegean Sea)*, Journal of Geophysical Research, 116.
- Birpınar, M.E., Talu Gonca, F., Gönül, S., Gülbey, M., 2006. *The Effect of Dense Maritime Traffic on the Bosphorus Strait and Marmara Sea Pollution*. Conference on Water observation and Information System for Decision Support, BALWOIS 2006, Ohrid, Republic of Macedonia, pp. 1-11.
- Hodges, B., Dallimore, C., 2010a. *ELCOM User Manual*, CWR, University of Western Australia.
- Hodges, B., Dallimore, C., 2010b. *ELCOM Science Manual*, CWR, University of Western Australia.
- Kanarska Y. and Maderich V. (2008). *Modelling of seasonal exchange flows through the Dardanelles Strait*. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 79, 449–458.
- Kopasakis I. K., Georgoulas N. A., Angelidis B. P., Kotsovinos E. N. (2012) *Simulation of the long term fate of water and pollutants, transported from the Dardanelles plume into the North Aegean*. Journal of Applied Ocean Research, 37, 145-161.

- Spillman C.M., Imberger J., Hamilton D.P., Hipsey M.R. and Romero J.R. (2007). *Modelling the effects of Po River discharge, internal nutrient cycling and hydrodynamics on biogeochemistry of the Northern Adriatic Sea*. Journal of Marine Systems, 68, 167-200.
- Tzali, M., Sofianos, S., Mantziafou, A., Skliris, N., 2010. *Modelling the impact of Black Sea water inflow on the North Aegean Sea hydrodynamics*. Ocean Dynamics 60, 585-596.
- Zervakis V., Georgopoulos D. (2002). Hydrology and circulation in the North Aegean (eastern Mediterranean) throughout 1997 and 1998. Mediterranean marine Science, 3/1, 05-19.
- Γεωργουλός Α., Κονιδάρης Α., Αγγελίδης Π. και Κωτσοβίνος Ν., (2006), *Επίδραση της δύναμης Coriolis στην εκροή υφάλμυρων υδάτων από τα Δαρδανέλια στο Βόρειο Αιγαίο*. Πρακτικά 10^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου της Ε.Υ.Ε., Ξάνθη, Τόμος Α', σελ. 315-322.
- ΕΛΚΕΘΕ – Ελληνικό Κέντρο Θαλάσσιων Ερευνών (2010). *Monitoring, Forecasting and Information System for the Greek Seas, Data Base of Water Temperature and Salinity*. Πηγή: <http://poseidon.hcmr.gr/index.php>.

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ ΤΑΧΕΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΠΑΡΟΧΗΣ ΠΟΤΑΜΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΟΙΟΤΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ

Ελένη Σ. Μπεκρή⁽¹⁾⁽²⁾, Markus Disse⁽²⁾, Παναγιώτης Χρ. Γιαννόπουλος⁽¹⁾

⁽¹⁾Εργαστήριο Τεχνολογίας Περιβάλλοντος, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Πατρών, 265 04 Πάτρα,
e-mail: ebekri@upatras.gr; yannopp@upatras.gr

⁽²⁾Water Management and Resources Engineering, Institut of Hydro Sciences,
Universität der Bundeswehr München, Werner-Heisenberg-Weg 39, 85577
Neubiberg, Germany, τηλ.: +49 (0) 8960043490, τ/ο.: +49 (0) 8960044642

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται την βελτίωση και περαιτέρω εξέλιξη της μεθοδολογίας διόρθωσης των ταχέων μετρήσεων παροχής ποταμών με χρήση ποιοτικών χαρακτηριστικών, καθώς και την εφαρμογή της στον Αλφειό Ποταμό. Σε ποταμούς με απουσία μόνιμων εγκαταστάσεων παρακολούθησης ποσοτικών και ποιοτικών χαρακτηριστικών σε επιλεγμένες διατομές ποταμών, φαινόμενο σύνθησης κυρίως στις μεσογειακές χώρες, μπορούν να χρησιμοποιηθούν εναλλακτικά απλές, ταχείες και οικονομικές μέθοδοι μέτρησης παροχής, όπως για παράδειγμα του επιπλέοντος αντικειμένου, των αναδύομενων φυσαλίδων αέρα και της απόκλισης ανηρτημένης σφαίρας. Στόχος της προτεινόμενης μεθοδολογίας είναι να προκύψουν τιμές παροχών μεγαλύτερης αξιοπιστίας από τις αρχικώς μετρηθείσες, μέσω κατάλληλης μαθηματικής διόρθωσης με γραμμικό προγραμματισμό, βασισμένης στις εξισώσεις διατήρησης μάζας διαφόρων δεικτών από τους οποίους εξαρτώνται οι μετρηθείσες τιμές ποιοτικών χαρακτηριστικών που έχουν ληφθεί ταυτόχρονα με τις ταχείες μετρήσεις παροχής.

METHODOLOGICAL FRAME FOR CORRECTION OF QUICK RIVER DISCHARGE MEASUREMENTS USING QUALITY CHARACTERISTICS

Eleni S. Bekri⁽¹⁾⁽²⁾, Markus Disse⁽²⁾, Panayotis C. Yannopoulos⁽¹⁾

⁽¹⁾Environmental Engineering Laboratory, Department of Civil Engineering,
University of Patras, 265 04 Patras, Greece

ABSTRACT

The improvement and further development of the methodological framework, aiming at the correction of quick river discharge measurements by using river qualitative characteristics, is presented in this paper and is applied to the Alfeios River, in Greece. At river cross-sections without gauge stations or permanent equipment, a quite common fact in most Mediterranean countries, quick methods of low cost and reliability, such as floats, release of air bubbles and the pendulum, could be employed to estimate the river discharge. The goal of the proposed methodology is to compute river discharge with higher accuracy and reliability compared to the initial discharge estimates, through a proper mathematical correction of measured values. The *ad hoc* proposed methodology, using linear optimization, could be adopted, when simultaneous measurements of river discharge and water quality characteristics are available.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα Προγράμματα Μέτρων και Παρακολούθησης της κατάστασης των υδάτων, τα οποία προβλέπονται από τον Ν. 3199/2003 (ΦΕΚ Α'280/9-12-2003) «Προστασία και διαχείριση των υδάτων – Εναρμόνιση με την Οδηγία 2000/60/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 23ης Οκτωβρίου 2000», εκτός των άλλων πρέπει να περιλαμβάνουν προσδιορισμό των επιπέδων των ρύπων, αλλά και εκτίμηση των φορτίων ρύπανσης, προκειμένου να καθίσταται δυνατή η βελτιστοποίηση της χρήσης των υδάτων, η εκτίμηση της συνεισφοράς της ρύπανσης από τις λεκάνες απορροής στον ποταμό και τους τελικούς αποδέκτες, ο έλεγχος της βιωσιμότητας των δραστηριοτήτων και η λήψη των καταλλήλων διορθωτικών μέτρων (Manariotis and Yannopoulos, 2004; Yannopoulos et al., 2007b). Σημειώνεται ότι τα Προγράμματα Παρακολούθησης έπρεπε να έχουν αρχίσει από 01.01.2007, ενώ τόσο το πρώτο Σχέδιο Διαχείρισης, όσο και το πρώτο Πρόγραμμα Μέτρων θα έπρεπε να έχουν καταρτισθεί και εγκριθεί υποχρεωτικά έως 22.12.2009. Όλα τα μέτρα θα έπρεπε να είναι έτοιμα προς εφαρμογή έως 01.01.2012. Η Ελλάδα καταδικάστηκε στις 19 Απριλίου 2012 για τη μη εμπρόθεσμη ολοκλήρωση των Σχεδίων Διαχείρισης Λεκανών Απορροής, σε εφαρμογή της Οδηγίας 2000/60/ΕΚ (Οδηγία Πλαίσιο για το νερό), γεγονός που καταδεικνύει τη σπουδαιότητα και την αναγκαιότητα εύρεσης άμεσων και οικονομικών λύσεων.

Η εκτίμηση των φορτίων ρύπανσης, που μεταφέρονται από τον ποταμό, γίνεται με ταυτόχρονη μέτρηση παροχής ύδατος και συγκεντρώσεως εκάστου ρύπου, και υπολογίζεται ως το γινόμενο παροχής επί την συγκέντρωση, ήτοι το φορτίο q_{ij} στη διατομή i για τον ρύπο j , το οποίο είναι αδύνατο να μετρηθεί άμεσα και υπολογίζεται έμμεσα ως:

$$q_{ij} = Q_i c_{ij} \quad (1.1)$$

όπου Q_i είναι η παροχή και c_{ij} η συγκέντρωση του ρύπου j στη διατομή i του ποταμού.

Η καταγραφή ολοκληρωμένης εικόνας για το συνολικό μήκος του ποταμού, συμπεριλαμβανομένων των παραποτάμων του, προϋποθέτει την σχεδόν ταυτόχρονη εκτέλεση των μετρήσεων σε όλες τις κατάλληλα επιλεγμένες διατομές του ποταμού. Αυτό είναι δυνατόν, όταν στις διατομές ελέγχου υπάρχουν μόνιμες εγκαταστάσεις μέτρησης της παροχής και αυτόματοι δειγματολήπτες ή αναλυτές συνεχούς λειτουργίας για την μέτρηση των συγκεντρώσεων των ρύπων. Όμως, μια τέτοια πλήρης οργάνωση και υποδομή απουσιάζει σήμερα από το σύνολο μάλλον των ποταμών της χώρας. Για το πλείστον των περιπτώσεων, πιθανά προγράμματα παρακολούθησης της παροχής και των ποιοτικών παραμέτρων ελέγχονται από διαφορετικούς φορείς χωρίς συντονισμό μεταξύ τους, με δυσμενή επακόλουθα στον συγχρονισμό, την πληρότητα και την συνέχεια. Η κάλυψη όλων αυτών των αναγκών απαιτεί αλλαγή της οργανωτικής δομής, αύξηση της στελέχωσης των παλαιών υπηρεσιών με δημιουργία και νέων υπηρεσιών, πύκνωση του δικτύου παρακολούθησης με μόνιμους εξοπλισμούς στο πεδίο και στο εργαστήριο, παράταση χρόνου και υψηλές δαπάνες.

Στη διεθνή αλλά και ελληνική βιβλιογραφία περιγράφεται μεγάλος αριθμός μεθόδων και οργάνων μέτρησης της παροχής ποταμού (Frazier, 1974; Charlton, 1978; Kınori & Mevorach, 1984; Τερζίδης, 1985; White, 1988; Müller, 1988; Τσόγκας, 1993; Morgenschweis, 2010). Στην περίπτωση μόνιμων εγκαταστάσεων παρακολούθησης, η καταγραφή της στάθμης ειδικά διαμορφωμένης διατομής του ποταμού και ο υπολογισμός της παροχής με βάση την διαθέσιμη καμπύλη στάθμης – παροχής μετά από κατάλληλη βαθμονόμηση, συνιστά την πλέον συνήθη μέθοδο. Για μετρήσεις σε διατομές όπου δεν υπάρχει μόνιμη υποδομή, χρησιμοποιούνται συνήθως μέθοδοι με

κινητά όργανα μέτρησης. Από τις πλέον δημοφιλείς και αξιόπιστες μεθόδους είναι η μέθοδος, που περιλαμβάνει αποτύπωση της διατομής και μέτρηση ταχυτήτων με ρευματομέτρο σε προδιαγεγραμμένες εγκάρσιες θέσεις και βάθη ύδατος, ώστε η παροχή στη διατομή να προκύψει από το άθροισμα των γινομένων των επί μέρους εμβαδών των υποδιαίρέσεων επί τις αντίστοιχες ταχύτητες, που μετρήθηκαν στο μέσον αυτών. Η ύπαρξη εγκάρσιας πρόσβασης στον ποταμό διευκολύνει σημαντικά την εφαρμογή της μεθόδου, ενώ μειώνει τον χρόνο, τον εξοπλισμό και το κόστος. Παρ' όλα αυτά, η προαναφερόμενη μέθοδος απαιτεί σημαντικά περισσότερο χρόνο από τον απαιτούμενο για τις αναγκαίες επί τόπου μετρήσεις και δειγματοληψίες μιας εξόρμησης, που στοχεύει να προλάβει πιθανή αλλαγή των ροϊκών συνθηκών. Συνεπώς, για την παράλληλη εκτέλεση μετρήσεων παροχής και ποιοτικών χαρακτηριστικών σε κάθε διατομή θα πρέπει να επιλεγεί ταχύτερη μέθοδος μέτρησης της παροχής, ώστε να είναι δυνατόν κατά την διάρκεια της ημέρας να ολοκληρώνονται οι επί τόπου μετρήσεις και οι δειγματοληψίες σε ολόκληρο ή μεγάλο μέρος του μήκους του ποταμού. Στις απλές, ταχείες και οικονομικές μεθόδους ανήκουν η μέθοδος του επιπλέοντος αντικειμένου, η μέθοδος των αναδυόμενων φυσαλίδων αέρα, η μέθοδος απόκλισης ανηρτημένης σφαίρας, καθώς και άλλες. Οι μέθοδοι των αναδυόμενων φυσαλίδων και της απόκλισης ανηρτημένης σφαίρας έχουν βελτιωθεί σημαντικά (Yannopoulos, 1995; Γιαννόπουλος κ.ά., 1995; Γιαννόπουλος κ.ά., 2000; Yannopoulos *et al.*, 2007a), ενώ επιπροσθέτως έχουν χρησιμοποιηθεί στις μετρήσεις πεδίου του Αλφειού Ποταμού, που αναλύονται στην παρούσα εργασία.

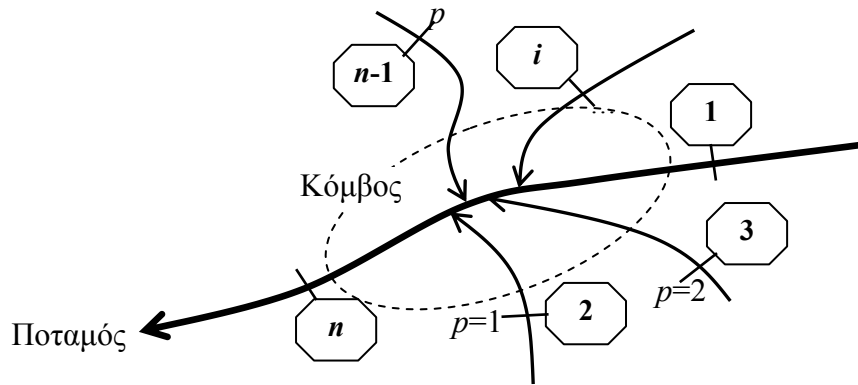
Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η βελτίωση και περαιτέρω εξέλιξη της μεθοδολογίας διόρθωσης των ταχέων μετρήσεων της παροχής ποταμών με χρήση ποιοτικών χαρακτηριστικών. Μέσω κατάλληλης μαθηματικής διόρθωσης με βελτιστοποίηση, χρησιμοποιώντας γραμμικό προγραμματισμό στο σύνολο των μετρήσεων παροχών και ποιοτικών χαρακτηριστικών κάθε κόμβου, επιχειρείται ο υπολογισμός διορθωμένων τιμών παροχών μεγαλύτερης αξιοπιστίας από τις μετρηθείσες. Τελικώς, με τις διορθωμένες παροχές σε κάθε διατομή μπορούν να υπολογισθούν ακριβέστερα και τα φορτία ρύπανσης. Η εφαρμογή της μεθόδου γίνεται στον Αλφειό Ποταμό, στον οποίον έχουν εκπονηθεί εκπαιδευτικά και ερευνητικά Προγράμματα από το Εργαστήριο Τεχνολογίας του Περιβάλλοντος του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών και διατίθενται ταυτόχρονες μετρήσεις παροχών και ποιοτικών παραμέτρων.

2. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ

2.1. ΓΕΝΙΚΗ ΘΕΩΡΗΣΗ

Η ανάπτυξη της μεθοδολογίας αναπτύσσεται ακολουθώντας τους Γιαννόπουλο (2009), και Yannopoulos & Bekri (2010), ήτοι: Έστω ποταμός στον οποίον καταλήγουν p ($p \geq 0$) παραπόταμοι. Οι θέσεις μέτρησης παροχής και δειγματοληψίας γύρω από έναν κόμβο, με ή χωρίς συμβολή παραποτάμων, είναι n ($n \geq 2$), όπως παρουσιάζονται στο Σχήμα 1. Υποτίθεται ότι οι θέσεις αυτές βρίσκονται σε σχετικώς μικρές αποστάσεις μεταξύ τους, ώστε να δύναται να αμεληθούν τυχόν ενδιάμεσες εισροές υδάτων, αλλά και επαρκώς απέχουσες, ώστε να επιτυγχάνεται ομοιομορφισμός συγκεντρώσεων από σημειακές απορρίψεις φορτίων ρύπανσης.

Υπό τις προϋποθέσεις αυτές, στον εξεταζόμενο κόμβο ισχύουν η διατήρηση όγκου ύδατος και η διατήρηση της μάζας εκάστου ρύπου ή δείκτη j , ήτοι:



Σχήμα 1. Ποταμός με p παραποτάμους που συμβάλλουν στην ίδια περιοχή (κόμβος) και n διατομές ελέγχου περί τον κόμβο, όπου πραγματοποιούνται οι μετρήσεις.

$$Q_n = \sum_{i=1}^{n-1} Q_i \pm Q_\lambda \quad (2.1)$$

$$q_{nj} = \sum_{i=1}^{n-1} q_{ij} \pm q_\lambda \Leftrightarrow Q_n c_{nj} = \sum_{i=1}^{n-1} Q_i c_{ij} \pm Q_\lambda c_\lambda \quad (2.2)$$

όπου Q_1, q_1, c_{1j} οι εισερχόμενες ποσότητες παροχής, φορτίου και συγκέντρωσης στον κόμβο μέσω της διατομής 1 του κυρίως ποταμού ανάντη του κόμβου, Q_n, q_n, c_{nj} οι αντίστοιχες εξερχόμενες ποσότητες από τον κόμβο μέσω της διατομής n του κυρίως ποταμού κατόντη του κόμβου, $Q_i, q_i, c_{ij}, (i=2, n-1)$ οι αντίστοιχες εισερχόμενες ποσότητες μέσω των παραποτάμων, εφόσον υφίστανται, και $Q_\lambda, q_\lambda, c_\lambda$ η αντίστοιχη εξερχόμενη ή εισερχόμενη ποσότητα μιας υποτιθέμενης λανθάνουσας (μη άμεσα υπολογιζόμενης) παροχής από γειτονικές, παρακείμενες περιοχές, A_λ , στον εκάστοτε εξεταζόμενο κόμβο. Είναι προφανές ότι, εάν έχουν μετρηθεί οι συγκεντρώσεις m το πλήθος ρύπων ή δεικτών εν γένει, μπορούν να γραφούν m εξισώσεις της μορφής (2.2).

Επομένως στον εξεταζόμενο κόμβο, γράφονται οι εξισώσεις (2.1) και (2.2), $1+m$ εν σύνολο, οι οποίες συνιστούν γραμμικό σύστημα. Με την υπόθεση ότι οι τιμές συγκεντρώσεων έχουν προσδιορισθεί με ικανοποιητική ακρίβεια, ώστε το σφάλμα τους να είναι αρκετά περιορισμένο, με ελαχιστοποίηση ή μεγιστοποίηση της κατάλληλης αντικειμενικής συνάρτησης του προαναφερόμενου γραμμικού συστήματος θα προσδιοριστούν ζεύγη τιμών ελάχιστης και μέγιστης παροχής σε κάθε διατομή του υπό εξέταση κόμβου, ώστε να ικανοποιούνται όλοι οι τεθέντες περιορισμοί.

Πρακτικώς, τέτοιες λύσεις προκύπτουν για διάφορες τιμές υποτιθέμενων σφαλμάτων μέτρησης των παροχών της κάθε διατομής. Τελικώς, ως πιθανότερες τιμές στον κόμβο επιλέγονται οι μέσες τιμές των παροχών των αντιστοίχων ζευγών (ελαχίστων και μεγίστων) των διατομών του κόμβου, που αντιστοιχούν σε αυτές τις τιμές των σφαλμάτων μέτρησης παροχής, για τις οποίες ελαχιστοποιείται το άθροισμα των τετραγώνων των αποκλίσεων των εκτιμώμενων από τις μετρηθείσες παροχές. Με αυτόν τον τρόπο, χρησιμοποιώντας την μέση τιμή και τα ακρότατα παροχών, που προέκυψαν για κάθε διατομή, προσδιορίζεται το πιθανό σφάλμα εκτίμησης της παροχής με την χρήση της προτεινόμενης μεθόδου, ενώ ταυτόχρονα λαμβάνεται υπόψη μια πιθανή λανθάνουσα παροχή ύδατος Q_λ , η οποία μπορεί να ερμηνευτεί σαν το προκύπτον, συνήθως μικρό, υπόλοιπο κατά την ελαχιστοποίηση ή μεγιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης. Κατά την παρούσα ανάλυση η μικρή αυτή λανθάνουσα

παροχή, η οποία δεν ήταν άμεσα αντιληπτή και μετρήσιμη, θεωρείται ότι εισέρεε /εξέρεε στον/από τον κόμβο, είτε επιφανειακώς, είτε υπογείως από την αντιστοιχούσα υπολεκάνη απορροής στην περιοχή μεταξύ των διατομών των μετρήσεων, οπότε οι εξισώσεις (2.1) και (2.2) θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια με τον συνυπολογισμό αυτής της λανθάνουσας παραμέτρου σε κατάλληλες ανισότητες.

2.2. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Έστω X_i ($i=1, n$ και λ) οι διορθωμένες παροχές των διατομών γύρω από ένα κόμβο, οι οποίες πρόκειται να εκτιμηθούν χρησιμοποιώντας το προτεινόμενο μοντέλο. Έστω, επίσης, ε_i το απολύτως μέγιστο σχετικό σφάλμα μέτρησης της αντίστοιχης παροχής, Q_i . Υπό τις προαναφερόμενες προϋποθέσεις και με βάση την εξίσωση (2.1) είναι δυνατόν να γραφούν οι ακόλουθοι περιορισμοί για τις διορθωμένες παροχές, X_i :

$$0 \leq Q_k(1 - \varepsilon_k) \leq - \sum_{i=1 \wedge i \neq k}^{n-1} X_i \mp X_\lambda + X_n \leq Q_k(1 + \varepsilon_k) \quad (2.3)$$

$$\sum_{i=1}^{n-1} X_i \pm X_\lambda \geq Q_n(1 - \varepsilon_n) \quad (2.4)$$

$$0 \leq Q_i(1 - \varepsilon_i) \leq X_i \leq Q_i(1 + \varepsilon_i) \quad (2.5)$$

Εάν ζ_j ($j=1, m$) είναι τα απολύτως μέγιστα σχετικά σφάλματα μέτρησης των συγκεντρώσεων των ρύπων j ($j=1, m$), από τις εξισώσεις διατήρησης μάζας εκάστου ρύπου είναι δυνατόν να προκύψουν οι ακόλουθοι διπλοί περιορισμοί:

$$Q_n(1 - \varepsilon_n) \frac{1 - \zeta_j}{1 + \zeta_j} \leq \sum_{i=1}^{n-1} \frac{c_{ij}}{c_{nj}} X_i \pm \frac{c_{\lambda j}}{c_{nj}} X_\lambda \leq Q_n(1 + \varepsilon_n) \frac{1 + \zeta_j}{1 - \zeta_j} \quad (2.6)$$

$$Q_k(1 - \varepsilon_k) \frac{c_{kj}}{c_{nj}} \frac{1 - \zeta_j}{1 + \zeta_j} \leq - \sum_{i=1 \wedge i \neq k}^{n-1} \frac{c_{ij}}{c_{nj}} X_i \mp \frac{c_{\lambda j}}{c_{nj}} X_\lambda + X_n \leq Q_k(1 + \varepsilon_k) \frac{c_{kj}}{c_{nj}} \frac{1 + \zeta_j}{1 - \zeta_j} \quad (2.7)$$

Θεωρείται ότι στους ανωτέρω περιορισμούς (2.3) έως (2.7), οι μετρηθείσες τιμές παροχών και συγκεντρώσεων, λόγω των σφαλμάτων μέτρησής των, κείνται εντός των αντιστοιχών κλειστών διαστημάτων $[Q_i(1 - \varepsilon_i), Q_i(1 + \varepsilon_i)]$, $[Q_\lambda(1 - \varepsilon_\lambda), Q_\lambda(1 + \varepsilon_\lambda)]$, $[c_{ij}(1 - \zeta_j), c_{ij}(1 + \zeta_j)]$ και $[c_{\lambda j}(1 - \zeta_j), c_{\lambda j}(1 + \zeta_j)]$.

Σημειώνεται ότι, επειδή η αγωγιμότητα φυσικών υδάτων ποταμών δεν μεταβάλλεται σημαντικά, αλλά πρακτικώς παραμένει στην γραμμική περιοχή αναλογίας με την συγκέντρωση των ποικίλων διαλελυμένων ουσιών - ιόντων, μπορεί να χρησιμοποιηθεί στις σχέσεις διατήρησης μάζας αντί της συγκέντρωσης ενός συνολικού δείκτη των ουσιών αυτών. Επιπλέον, υπάρχουν διάφορα όργανα πεδίου, τα οποία διαθέτουν αλγόριθμο υπολογισμού της συγκέντρωσης των ολικών διαλελυμένων στερεών με βάση την μέτρηση της αγωγιμότητας που πραγματοποιούν.

Όσον αφορά την λανθάνουσα παροχή, Q_λ , καθώς και το αντίστοιχο σφάλμα μέτρησής της, ε_λ , θεωρείται ότι μπορούν να υπολογιστούν όπως φαίνεται στην σχέση, ως συνάρτηση της παροχής εξόδου από τον κόμβο:

$$Q_\lambda = Q_n \frac{A_\lambda}{A_n} \quad \text{και} \quad \varepsilon_\lambda = \varepsilon_n \quad (2.8)$$

όπου A_λ και A_n είναι οι αντίστοιχες επιφάνειες της λεκάνης, από τις οποίες απορρέουν η λανθάνουσα παροχή, Q_λ και η παροχή εξόδου, Q_n . Με βάση αυτή τη θεώρηση και για λόγους συνέπειας, προκύπτουν τα ακόλουθα διαστήματα τιμών της συγκέντρωσης, c_λ , για θετική (2.9) και αρνητική (2.10) λανθάνουσα παροχή. Στην παρούσα εργασία, η τιμή της λανθάνουσας συγκέντρωσης κάθε ρύπου προκύπτει από την μέση τιμή του παραπάνω εύρους τιμών. Ωστόσο, θεωρείται ότι ένα πεδίο περαιτέρω διερεύνησης είναι το μοντέλο για τον υπολογισμό αυτής της παραμέτρου, καθώς και η εξέταση πληθώρας τιμών από το εν λόγω διάστημα.

$$\left[c_n - (1 + \zeta_j) \times \text{Max}(c_{1j}, \dots, c_{nj}) \right] \frac{A_n}{A_\lambda} \leq c_\lambda \leq \left[c_n - (1 - \zeta_j) \times \text{Min}(c_{1j}, \dots, c_{nj}) \right] \frac{A_n}{A_\lambda} \quad (2.9)$$

$$\left[-c_n + (1 - \zeta_j) \times \text{Min}(c_{1j}, \dots, c_{nj}) \right] \frac{A_n}{A_\lambda} \leq c_\lambda \leq \left[-c_n + (1 + \zeta_j) \times \text{Max}(c_{1j}, \dots, c_{nj}) \right] \frac{A_n}{A_\lambda} \quad (2.10)$$

Ως αντικειμενική συνάρτηση, F , της οποίας ζητείται η ελαχιστοποίηση ή μεγιστοποίηση, ορίζεται η ακόλουθη:

$$F = -\sum_{i=1}^{n-1} X_i \mp X_\lambda + X_n \quad (2.11)$$

Στο εξεταζόμενο πρόβλημα βελτιστοποίησης λαμβάνονται υπόψη όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί υποτιθέμενων τιμών απολύτως μεγίστων σχετικών σφαλμάτων, ε_i ($i=1, n$ και λ) μέτρησης παροχών, ενώ θεωρούνται γνωστές οι τιμές των αντιστοίχων απολύτως μεγίστων σφαλμάτων, ζ_j ($j=1, m$) μέτρησης των συγκεντρώσεων ρύπων ή δεικτών j , με βάση τα σφάλματα που δίδονται από τους κατασκευαστές των οργάνων μέτρησης που χρησιμοποιούνται. Επειδή $X_i \geq 0$ ($i=1, n$ και λ), τα ακρότατα των διορθωμένων παροχών $\max X_i$ ($i=1, n-1$), $\max X_\lambda$ (για θετική Q_λ) ή $\min X_\lambda$ (για αρνητική Q_λ) και $\min X_n$ είναι προφανές ότι θα προκύπτουν με ελαχιστοποίηση της F υπό τους περιορισμούς (2.3) έως (2.7), ενώ με μεγιστοποίηση της F θα λαμβάνονται τα ακρότατα $\min X_i$ ($i=1, n-1$), $\min X_\lambda$ (για θετική Q_λ) ή $\max X_\lambda$ (για αρνητική Q_λ) και $\max X_n$. Τελικώς, για κάποια από τις υποτιθέμενες ομάδες σφαλμάτων ε_i ($i=1, n$ και λ) μέτρησης παροχών στις διατομές γύρωθεν του εξεταζόμενου κόμβου λαμβάνονται ζεύγη ακροτάτων τιμών παροχών ($\min X_i, \max X_i$) ($i=1, n$ και λ), τα οποία ικανοποιούν τους ανωτέρω περιορισμούς. Ως πλέον αντιπροσωπευτική τιμή εκάστου ζεύγους ορίζεται η μέση τιμή των ακροτάτων, ήτοι:

$$\text{mean} X_i = \frac{1}{2} (\min X_i + \max X_i) \quad (2.12)$$

Επομένως, το απολύτως μέγιστο σφάλμα εκτίμησης της αντιπροσωπευτικής τιμής παροχής εκάστου ζεύγους με βάση την προτεινόμενη μέθοδο θα ισούται με $E = \max X_i - \text{mean} X_i$. Για την επιλογή της βέλτιστης ομάδας ζευγών ακροτάτων του κόμβου, η οποία συνιστά και την βέλτιστη λύση, προτείνεται το κριτήριο ελαχιστοποίησης του αθροίσματος των τετραγώνων των αποκλίσεων των διορθωμένων παροχών από τις μετρηθείσες τιμές τους, ήτοι:

$$\min S = \sum_{i=1}^n (Q_i - \text{mean } X_i)^2 \quad (2.13)$$

3. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ

3.1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Η προτεινόμενη μεθοδολογία εφαρμόζεται στον Αλφειό Ποταμό και συγκεκριμένα στον κόμβο συμβολής του κυρίως ποταμού με τους παραπόταμους Ερύμανθο και Λάδωνα. Οι μετρήσεις - εκτιμήσεις παροχών και οι επιτόπιες μετρήσεις ή δειγματοληψίες για εργαστηριακές αναλύσεις διαφόρων χαρακτηριστικών έγιναν στις διατομές 1 – Γέφυρα Αγίου Ιωάννη-Σέκουλα (Αλφειός), 2 – Γέφυρα Κοκλαμά-Λουτρών Ηραίας (Λάδωνας), 3 – Γέφυρα Πύργου-Τριπόλεως (Ερύμανθος) και 4 – Γέφυρα Άσπρα Σπίτια-Καλλιθέα (Αλφειός). Συνολικά έχουν πραγματοποιηθεί έξι (6) εξορμήσεις στην περιοχή του εν λόγω κόμβου για σχετικές μετρήσεις, που ενδιαφέρουν την παρούσα εργασία, στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος Πυθαγόρας II-Περιβάλλον (Γιαννόπουλος, 2005). Οι φυσικοί δείκτες είναι κατάλληλοι για χρήση από την προτεινόμενη μεθοδολογία, όταν συνδυάζουν την ευκολία με την ικανοποιητική ακρίβεια μέτρησης, ενώ παρέχουν αξιόλογη χρονική σταθερότητα (Eaton *et al.*, 1995). Οι ακόλουθοι δείκτες συνιστούν κατάλληλες παραμέτρους προς χρήση από την παρούσα εργασία:

- α) Η αγωγιμότητα, η οποία μετράται επί τόπου με καλή ακρίβεια (σφάλμα $\leq 0,05$).
- β) Η συγκέντρωση θεικών ανιόντων (SO_4^{-2}), η οποία προσδιορίζεται στο εργαστήριο επί δείγματος με επίσης καλή ακρίβεια (σφάλμα $\leq 0,10$).
- γ) Η συγκέντρωση ανιόντων χλωρίου (Cl^-), η οποία προσδιορίζεται στο εργαστήριο επί δείγματος με ικανοποιητική ακρίβεια (σφάλμα $\leq 0,15$).

Γενικώς, μπορούν να χρησιμοποιηθούν όσες παράμετροι κρίνονται ότι έχουν σφάλμα προσδιορισμού σχετικώς μικρό, πρακτικά $\leq 0,20$, έτσι ώστε να περιορισθούν κατά το δυνατόν περισσότερο τα σφάλματα εκτίμησης διορθωμένων τιμών ταχυτήτων. Είναι επίσης δυνατόν να χρησιμοποιηθούν μετρήσεις της ίδιας παραμέτρου χρησιμοποιώντας άλλο όργανο ή εναλλακτική μέθοδο, ίδιας ή διαφορετικής ακρίβειας, στα ίδια ή και σε πρόσθετα δείγματα, προερχόμενα σχεδόν ταυτοχρόνως από την ίδια θέση. Κατ' αυτόν τον τρόπο αυξάνονται οι περιορισμοί και μειώνεται το εύρος τιμών διορθωμένων παροχών και το σφάλμα που εκτιμάται με την προτεινόμενη διαδικασία. Στον Πίνακα 1 δίδονται τα στοιχεία των προς χρήση μετρήσεων που έχουν πραγματοποιηθεί στον υπό εξέταση κόμβο.

Οι τιμές των παροχών έχουν εκτιμηθεί με αποτύπωση της διατομής και μέτρηση της μέγιστης επιφανειακής ταχύτητας με την απλή μέθοδο επιπλέοντος αντικειμένου. Η διατομή 1 είναι αρκετά ομαλή, σχετικώς ευρεία, ευκόλως προσπελάσιμη και τις περισσότερες φορές χρησιμοποιήθηκε και η μέθοδος των αναδύομενων φυσαλλίδων αέρα, επιτυγχάνοντας εν γένει ικανοποιητική ακρίβεια μέτρησης της παροχής (σφάλμα μικρότερο από 20%). Οι διατομές 2 και 3 είναι προσπελάσιμες και το σφάλμα μέτρησής τους μπορεί να χαρακτηριστεί μέτριο. Ωστόσο, η ροή της διατομής 2 είναι λοξή ως προς την γέφυρα κατά 45° περίπου. Η διατομή 4 είναι προσπελάσιμη και βρίσκεται σε γέφυρα με τρία φατνώματα. Στα δύο ακραία, η παροχή μπορεί να μετρηθεί με σχετικά καλή ακρίβεια, σε αντίθεση με το μεσαίο φατνώμα όπου το βάθος είναι πολύ μεγάλο λόγω διάβρωσης και προκαλούνται στροβιλισμοί, οι οποίοι εισάγουν μεγάλα σφάλματα κατά την μέτρηση της παροχής με οποιαδήποτε μέθοδο.

Πίνακας 1. Μετρήσεις - εκτιμήσεις στον κόμβο συμβολής του Αλφειού Ποταμού με τους παραπόταμους Λάδωνα και Ερύμανθο.

<i>Εξόρμηση / Θέση</i>	<i>Διατομή</i>	<i>Παροχή Q (m³/s)</i>	<i>Σφάλμα παροχής</i>	<i>Αγωγιμότητα (μS/cm)¹</i>	<i>Αγωγιμότητα (μS/cm)²</i>	<i>SO₄²⁻ (mg/l)³</i>	<i>Cl⁻ (mg/l)⁴</i>	<i>Cl⁻ (mg/l)⁵</i>
<i>Εξόρμηση 2</i>								
Άγιος Ιωάννης	1	19,66	Μικρό	461	448	60		
Λάδωνας	2	42	Μέτριο	428	408	17		
Ερύμανθος	3	7,08	Μέτριο	322	312	6		
Άσπρα Σπίτια	4	67,70	Μεγάλο	430,5	416,5	30		
<i>Εξόρμηση 3</i>								
Άγιος Ιωάννης	1	8,58	Μικρό	463	449	60	5,4	
Λάδωνας	2	24,89	Μέτριο	415,5	408,5	24	6,4	
Ερύμανθος	3	2,63	Μέτριο	326	322	6	7,4	
Άσπρα Σπίτια	4	22,62	Μεγάλο	476	442,5	42	6,8	
<i>Εξόρμηση 4</i>								
Άγιος Ιωάννης	1	10,76	Μικρό	493	480			
Λάδωνας	2	5,43	Μέτριο	459	436			
Ερύμανθος	3	3,84 ⁶	Μέτριο	327	315			
Άσπρα Σπίτια	4	23,50	Μεγάλο	452	415			
<i>Εξόρμηση 5</i>								
Άγιος Ιωάννης	1	9,58	Μικρό	413	392	51		
Λάδωνας	2	3,22	Μέτριο	408	393	35		
Ερύμανθος	3	3,63	Μέτριο	309	284	9		
Άσπρα Σπίτια	4	20,2	Μεγάλο	420	387	45		
<i>Εξόρμηση 6</i>								
Άγιος Ιωάννης	1	9,11	Μικρό	471	458	56	6,1	
Λάδωνας	2	3,81	Μέτριο	459	445	36	5,6	
Ερύμανθος	3	3,63	Μέτριο	321	278	8	4,6	
Άσπρα Σπίτια	4	22,62	Μεγάλο	462	413	48	5,1	
<i>Εξόρμηση 7</i>								
Άγιος Ιωάννης	1	9,23	Μικρό	570,5	558	89	10	
Λάδωνας	2	9,99	Μέτριο	436,5	433,5	28	9	
Ερύμανθος	3	5,60	Μέτριο	336	337,5	5	7	
Άσπρα Σπίτια	4	27,82	Μεγάλο	400,5	401	38	8	

¹ Αγωγιμόμετρο Horiba U-10² Αγωγιμόμετρο Hanna HI 9033³ 4500-SO₄²⁻ E. Turbidimetric Method (Eaton *et al.*, 1995)⁴ 4500-Cl⁻ B. Argentometric Method (Eaton *et al.*, 1995)⁵ Merck Spectroquant NOVA 60 – Chloride test⁶ Η παροχή εκτιμήθηκε

3.2. ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Με βάση τις ως άνω διαθέσιμες πληροφορίες μετρήσεων πεδίου δοκιμάζονται διάφοροι συνδυασμοί απολύτως μεγίστων τιμών πιθανών σχετικών σφαλμάτων μέτρησης των παροχών και με χρήση του προαναφερόμενου μαθηματικού μοντέλου βελτιστοποίησης με γραμμικό προγραμματισμό, υπολογίζονται τα ακρότατα παροχών κάθε διατομής, που ικανοποιούν το σύνολο των τεθέντων περιορισμών (Πίνακας 2).

Πίνακας 2. Εκτιμήσεις διορθωμένων παροχών και σφαλμάτων αυτών στον κόμβο συμβολής του Αλφειού Π. με τους παραποτάμους Λάδωνα και Ερύμανθο.

<i>Εξόρμηση (Ημερομηνία) / Θέση</i>	<i>Διατομή i</i>	<i>Παροχή min X_i (m³/s)</i>	<i>Παροχή max X_i (m³/s)</i>	<i>Παροχή mean X_i ± E_i (m³/s)</i>	<i>Σφάλμα E_i/X_{mean_i (%)}</i>
<i>Εξόρμηση 2 (9.4.2006)</i>					
Άγιος Ιωάννης	1	17,891	18,211	18,051 ± 0,160	0,9
Λάδωνας	2	50,4	33,600	42,000 ± 8,400	20,0
Ερύμανθος	3	7,393	4,956	6,175 ± 1,219	19,7
Άσπρα Σπίτια	4	77,401	60,415	68,908 ± 8,493	12,3
Λανθάνουσα κόμβου	-	1,718	0,430	1,074 ± 0,644	60,0
<i>Εξόρμηση 4 (18.11.2006)</i>					
Άγιος Ιωάννης	1	10,868	10,652	10,760 ± 0,108	1,0
Λάδωνας	2	5,011	5,047	5,029 ± 0,018	0,4
Ερύμανθος	3	3,928	4,001	3,964 ± 0,037	0,9
Άσπρα Σπίτια	4	20,815	23,356	22,086 ± 1,271	5,8
Λανθάνουσα κόμβου	-	1,009	3,440	2,225 ± 1,216	54,6
<i>Εξόρμηση 5 (15-16.3.2007)</i>					
Άγιος Ιωάννης	1	12,091	12,454	12,273 ± 0,182	1,5
Λάδωνας	2	2,576	3,261	2,920 ± 0,343	11,7
Ερύμανθος	3	2,178	2,178	2,178 ± 0,000	0,0
Άσπρα Σπίτια	4	17,745	17,894	17,820 ± 0,074	0,4
Λανθάνουσα κόμβου	-	0,616	0,000	0,308 ± 0,308	100,0
<i>Εξόρμηση 6 (2.6.2007)</i>					
Άγιος Ιωάννης	1	11,753	11,454	11,604 ± 0,15	1,5
Λάδωνας	2	2,286	3,727	3,007 ± 0,721	11,7
Ερύμανθος	3	2,178	2,513	2,347 ± 0,168	0,0
Άσπρα Σπίτια	4	18,716	20,212	19,464 ± 0,748	0,4
Λανθάνουσα κόμβου	-	1,517	2,513	2,015 ± 0,498	24,7
<i>Εξόρμηση 7 (24- 25.11.2007)</i>					
Άγιος Ιωάννης	1	7,384	7,384	7,384 ± 0	0,0
Λάδωνας	2	10,040	10,294	10,167 ± 0,127	1,2
Ερύμανθος	3	4,568	4,148	4,358 ± 0,21	4,8
Άσπρα Σπίτια	4	25,293	25,556	25,425 ± 0,131	0,5
Λανθάνουσα κόμβου	-	0,029	0,038	0,034 ± 0,004	13,4

Παρατήρηση. Τα δεδομένα της Εξόρμησης 3 (Πίνακας 1) δείχνουν σαφώς ότι η μετρηθείσα παροχή στην διατομή 4, που προηγήθηκε της μέτρησης στη διατομή 2, ήταν μικρότερη από την παροχή στη 2, αλλά και η εκροή από τον κόμβο (22,62 m³/s) προέκυψε μικρότερη από την συνολική εισροή στον κόμβο (36,1 m³/s). Αυτό υποδηλώνει μη μονιμότητα ροής κατά τη διάρκεια της Εξόρμησης 3 και, επομένως, είναι αδύνατη η αξιοποίηση των μετρήσεων.

Για τους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό LINGO (Schrage, 1997; Lindo Systems Inc., 1996). Τελικώς, από σημαντικό πλήθος συνδυασμών, που εξετάστηκαν για τις μετρήσεις κάθε εξόρμησης, επιλέχθηκε ο συνδυασμός που ελαχιστοποιεί την εξίσωση (2.11). Στον Πίνακα 2, εκτός από τα τελικά αποτελέσματα

ακροτάτων, δίδονται και οι μέσες τιμές και το σφάλμα εκτίμησής τους που έχουν υπολογισθεί με βάση την προτεινόμενη μεθοδολογία.

Τα αποτελέσματα διορθωμένων παροχών που προέκυψαν είναι προφανώς πλέον αξιόπιστα συγκρινόμενα με τις μάλλον πρόχειρες ταχείες μετρήσεις – εκτιμήσεις παροχών. Αυτό οφείλεται στο προτεινόμενο μεθοδολογικό πλαίσιο, όπου οι λύσεις πρέπει να επαληθεύουν το σύνολο των περιορισμών, οι οποίοι υπαγορεύονται από τις αρχές της διατήρησης όγκου και μαζών όσων δεικτών μετρήθηκαν με ικανοποιητική ακρίβεια. Επιπροσθέτως, η μεθοδολογία έδωσε δύο σημαντικές δυνατότητες εκτίμησης: α) Του πιθανού εύρους, εντός του οποίου κείται η διορθωμένη παροχή της κάθε διατομής ή διαφορετικά του πιθανού σφάλματος εκτίμησης της παροχής αυτής, και β) της πιθανής λανθάνουσας παροχής της υπολεκάνης απορροής, η οποία ορίζεται από τις διατομές ελέγχου του κόμβου.

Είναι αξιοσημείωτο ότι το εύρος της διορθωμένης παροχής βρέθηκε σημαντικά περιορισμένο, συγκριτικά με την αρχική εκδοχή της μεθοδολογίας για τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν. Για την διατομή 4, τα σφάλματα (E_i/X_{mean_i}) κυμαίνονται από 0,4% έως $\pm 12,3\%$. Τα σφάλματα παροχής για τις διατομές 2 και 3 προέκυψαν να κυμαίνονται αντίστοιχα από 0,4% έως $\pm 20\%$ και από 0% έως $\pm 19,7\%$, ήτοι επίσης σε αρκετά περιορισμένο εύρος. Για την διατομή 1 υπολογίστηκαν στο εύρος τιμών από 0% έως $\pm 1,5\%$. Τέλος, για την λανθάνουσα (επιφανειακή ή/και υπόγεια μη άμεσα μετρήσιμη) παροχή, με την βελτιωμένη προσέγγιση υπολογισμού του πεδίου τιμών της, προέκυψαν πολύ πιο περιορισμένα σφάλματα κυμαινόμενα από 13,4% έως 54,6% για όλες τις εξορμήσεις εκτός από την 5, για την οποία το αντίστοιχο σφάλμα προκύπτει 100%.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η προτεινόμενη μεθοδολογία διόρθωσης των παροχών, οι οποίες μετρώνται ή εκτιμώνται με απλές και ταχείες τεχνικές χαμηλής ακρίβειας σε διατομές ποταμών, εκμεταλλεύεται τις αρχές διατήρησης όγκου του ύδατος και μαζών των δεικτών, των οποίων οι μετρήσεις παρουσιάζουν ευκολία, ικανοποιητική ακρίβεια και μονιμότητα, και καταστρώνει την κατάλληλη αντικειμενική συνάρτηση σε συνδυασμό με το γραμμικό σύστημα περιορισμών της. Η βελτιστοποίηση γίνεται με χρήση γραμμικού προγραμματισμού και οι προτιμώμενες τιμές διορθωμένων παροχών επιλέγονται με βάση την ελαχιστοποίηση του αθροίσματος των τετραγώνων των αποκλίσεων των παροχών αυτών από τις μετρηθείσες. Επιπλέον, η προτεινόμενη μέθοδος παρέχει την δυνατότητα εκτίμησης της λανθάνουσας παροχής που προέρχεται από την αντιστοιχούσα υπολεκάνη απορροής μεταξύ των διατομών ελέγχου του κόμβου. Η μέθοδος αυτή δύναται να εφαρμοσθεί σε ποταμούς με ή χωρίς παραποτάμους και ταυτόχρονες μετρήσεις συγκεντρώσεων καταλλήλων φυσικών δεικτών. Η εφαρμογή της μεθόδου στον κόμβο συμβολής του Αλφειού Ποταμού με τους παραπόταμους Λάδωνα και Ερύμανθο έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα διορθωμένων παροχών, περιορίζοντας σημαντικά τα σχετικά σφάλματα εκτίμησης των παροχών αυτών. Για τις περισσότερες περιπτώσεις, που εξετάστηκαν, ακόμη και των πλέον ανώμαλων διατομών με ανομοιόμορφη στροβιλώδη ροή, τα σφάλματα εκτίμησης ήσαν μικρότερα από 20%, εκτός από την λανθάνουσα της οποίας το σφάλμα περιορίστηκε σημαντικά σε σχέση με την αρχική μορφή της προτεινόμενης μεθοδολογίας. Τα παρουσιαζόμενα αποτελέσματα καθιστούν την προτεινόμενη μέθοδο χρήσιμη και ενδιαφέρουσα για ενσωμάτωση στα Προγράμματα Παρακολούθησης της ρύπανσης υδρολογικών λεκανών, προκειμένου να διατίθενται αξιόπιστες τιμές παροχών και να υπολογίζονται αξιόπιστα φορτία ρύπανσης, ελαχιστοποιώντας τη διάρκεια κάθε εξόρμησης δειγματοληψίας, το προσωπικό και τελικώς το συνολικό κόστος των προγραμμάτων.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα έρευνα έχει συγχρηματοδοτηθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο - ΕΚΤ) και από εθνικούς πόρους μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» του Εθνικού Στρατηγικού Πλαισίου Αναφοράς (ΕΣΠΑ) – Ερευνητικό Χρηματοδοτούμενο Έργο: Ηράκλειτος II. Επένδυση στην κοινωνία της γνώσης μέσω του Ευρωπαϊκού Κοινωνικού Ταμείου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Charlton, F.G., 1978. *Measuring Flow in Open Channels: A Review of Methods*, CIRIA, London.
- Eaton, A.D., Clesceri, L.S. and Greenberg, A.E., 1995. *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*. 19th Edition, APHA, NW, Washington.
- Frazier, A.H., 1974. *Water Current Meters in the Smithsonian Collections of the National Museum of History and Technology*, No. 28, Smithsonian Institution Press, Washington.
- Kinori, B.Z. and Mevorach, J., 1984. *Manual of Surface Drainage Engineering, Vol. II: Stream Flow Engineering and Flood Protection*, Elsevier Science, Amsterdam, The Netherlands.
- Lindo Systems Inc., 1996. *LINDO User's Manual*. Lindo Systems Inc., Chicago, Illinois, 390 pp.
- Manariotis, I.D. and Yannopoulos, P.C., 2004. *Adverse effects on Alfeios River Basin and an integrated management framework based on sustainability*. *Environmental Management*, 34(2): 261-269.
- Morgenschweis, G., 2010. *Hydrometrie: Theorie Und Praxis Der Durchflussmessung in Offenen Gerinnen*, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 582 pp.
- Müller, A., (ed.), 1988. *Discharge and Velocity Measurements*, IAHR Proceedings, Zurich 1987, Balkema, Rotterdam, Vol. 2, pp. 1-207.
- Schrage, L.E., 1997. *Optimization Modeling with LINDO.5th ed.*, ITP Duxbury Press, USA, 470 pp.
- White, W.R., 1988. *Discharge measuring methods in open channels*, IAHR Proceedings on Discharge and Velocity Measurements, Zurich 1987, Müller (ed.), Balkema, Rotterdam, Vol. 2, pp. 17-37.
- Yannopoulos, P. C., 1995. *Bubble size and movement in wide channel flows*. Proc. of the 4th Greek National Congress on Mechanics, Demokritus University of Thrace, June 26-29, 1995, Xanthi, Greece, P.S. Theocaris, E.E. Gdoutos (Editors), Vol. II: Mechanics of Fluids and Thermal Sciences, pp. 886-893.
- Yannopoulos, P. C., Demetracopoulos, A. C. and Hatjitheodorou, Ch., 2007a. *Quick method for open channel discharge measurements using air bubbles*. *J. Hydr. Eng. (ASCE)* (in print).
- Yannopoulos, P.C., Manariotis, I.D., Ziogas, A.I. and Kaleris, V.K. 2007b. *Methodology of river pollution assessment and preliminary results*. Proc.of 32nd IAHR Congress “Harmonizing the Demands of Art and Nature in Hydraulics”, Giampolo Di Silvio and Stefano Lanzoni (editors), July 1-6 2007, Venice, Italy, Theme A – Engineering and Management of Freshwater Systems, A1.c: Water resources and river basin management, 059-O, pp. 307; 12 pages in CD-ROM Proc.
- Γιαννόπουλος, Π.Χρ., 2005. *Ανάπτυξη Μεθοδολογιών Χαμηλού Κόστους για Ταχεία Πρόβλεψη και Παρακολούθηση Ρύπανσης Ποταμών*. Έκθεση Προόδου, Πυθαγόρας II – Περιβάλλον, ΕΠΕΑΕΚ II – ΕΚΤ, 42 σελίδες.

- Γιαννόπουλος Π.Χρ., 2009. Διόρθωση Μετρήσεων Παροχών Ποταμού με Χρήση Φυσικών Δεικτών. *ΥΔΡΟΓΑΙΑ*, τιμητικός τόμος στον Καθηγητή Χρήστο Τζιμόπουλο, επιμέλεια έκδοσης: Σταύρος Γιαννόπουλος, Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, σελ. 171-184.
- Γιαννόπουλος, Π. Χρ., Δημητρακόπουλος, Α. Κ. και Χατζηθεοδώρου, Χρ., 1995. *Μέτρηση παροχής ποταμού με αναδύμενες φυσαλλίδες αέρα*, Πρακτικά 4^{ου} Συνεδρίου Περιβαλλοντικής Επιστήμης και Τεχνολογίας, Μόλυβος Λέσβου, 4-7 Σεπτ. 1995, Εκδ. Θ. Λέκκας, Τόμος Β', σελ. 389-398.
- Γιαννόπουλος, Π., Μαυρίκος, Γ., Δημητρακόπουλος Α. και Χατζηθεοδώρου, Χρ., 2000. *Μέτρηση Ταχυτήτων σε Διώρυγες με την Βοήθεια Σφαίρας*, Πρακτικά 8ου Πανελληνίου Συνεδρίου Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης (Ε.Υ.Ε.), 19-21 Απριλίου 2000, Αθήνα, Επιμέλεια Έκδοσης: Γ. Χριστοδούλου, Α. Στάμου, Αικ. Νάνου, σελ. 127-134.
- Yannopoulos P.C. and Bekri E.S., 2010. *Correction of quick discharge measurements in rivers using natural tracers*, in Proceedings of the 6th International Symposium on Environmental Hydraulics, 23-25 June 2010, Environmental Hydraulics – Christodoulou & Stamou (eds), Taylor & Francis Group, London, Vol. 2, pp. 857-862.
- Τερζίδης, Γ.Α., 1985. *Μαθήματα Υδραυλικής 1. Γενική Υδραυλική*. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
- Τσόγκας, Χ.Ε., 1993. *Μηχανική των Ποταμών*. Εκδόσεις Ίων, Περιστερί, Αθήνα.

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΕΝΟΣ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟΥ
ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ
ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ-ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕΡΩΝ**

Κατερίνα Σπανουδάκη, Αναστάσιος Στάμου, Αικατερίνη Νάνου-Γιάνναρου

Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Υδραυλικής,
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται το τρισδιάστατο ολοκληρωμένο αριθμητικό μοντέλο επιφανειακών-υπόγειων νερών IRENE, το οποίο βασίζεται στη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών και αποτελείται από: (α) ολοκληρωμένο υδροδυναμικό μοντέλο επιφανειακών-υπόγειων νερών (IRENE-HYD) και (β) ολοκληρωμένο μοντέλο ποιότητας επιφανειακών-υπόγειων νερών (IRENE-QUAL). Στο IRENE-HYD οι εξισώσεις ρηχών υδάτων και η εξίσωση μη μόνιμης τρισδιάστατης κορεσμένης υπόγειας ροής συνδυάζονται στην κοινή διεπιφάνεια των επιφανειακών-υπόγειων νερών μέσω του νόμου του Darcy και επιλύονται ταυτόχρονα σε κάθε χρονικό βήμα. Το IRENE-QUAL επιλύει τις εξισώσεις μεταφοράς-διάχυσης ρύπων σε επιφανειακά νερά και μεταφοράς-διασποράς ρύπων σε υπόγεια νερά, οι οποίες συνδυάζονται υπολογίζοντας τη ροή μάζας ρύπου εγκάρσια στην κοινή διεπιφάνεια των επιφανειακών-υπόγειων υδάτων λόγω μεταφοράς και διασποράς. Το IRENE εφαρμόστηκε στην περιοχή των υδρολογικών λεκανών Αχελώου-Λυσιμαχίας-Τριχωνίδας.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: ολοκληρωμένα μαθηματικά μοντέλα επιφανειακών-υπόγειων νερών, ολοκληρωμένη διαχείριση υδατικών πόρων, Αχελώος

**DEVELOPMENT AND APPLICATION OF A 3-D INTEGRATED
SURFACE WATER-GROUNDWATER MODEL**

Katerina Spanoudaki, Anastasios Stamou, Aikaterini Nanou-Giannarou

Laboratory of Applied Hydraulics,
School of Civil Engineering, National Technical University of Athens

ABSTRACT

In the present paper, a 3-D Integrated surface water-groundwater model (IRENE) is presented, which is based on the finite difference method and consists of (a) an integrated surface water-groundwater flow model (IRENE-HYD) and (b) an integrated surface water-groundwater quality model (IRENE-QUAL). In IRENE-HYD, the 3-D shallow water equations are coupled to the 3-D non-steady state saturated groundwater flow equation using Darcy's law and are solved simultaneously at each time step. In IRENE-QUAL, the partial differential equations describing the fate and transport of contaminants in surface water and groundwater systems are coupled by calculating the total contaminant mass flux (advective and dispersive) normal to the surface water-groundwater interface. IRENE was applied to the area of the hydrological basins of Acheloos river, lake Lisimachia and lake Trichonida.

KEY WORDS: integrated surface water-groundwater modelling, integrated water resources management, Acheloos river

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα επιφανειακά και τα υπόγεια νερά δεν αποτελούν μεμονωμένες συνιστώσες του υδρολογικού κύκλου. Αντιθέτως, πολύ συχνά αλληλεπιδρούν μεταξύ τους μέσω της κοινής τους διεπιφάνειας με αποτέλεσμα να επηρεάζεται τόσο η ποσότητα όσο και η ποιότητά τους. Η εκτίμηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ επιφανειακών και υπόγειων νερών έχει μεγάλη σημασία για την αποτελεσματική διαχείριση των υδατικών πόρων. Σημαντικά εργαλεία για την πρόβλεψη της αλληλεπίδρασης ροής και ρύπανσης μεταξύ επιφανειακών και υπόγειων νερών και την κατάστρωση αποτελεσματικών διαχειριστικών σχεδίων αποτελούν τα αριθμητικά μοντέλα. Στα περισσότερα αριθμητικά μοντέλα επιφανειακών-υπόγειων νερών που έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα εξετάζεται η αλληλεπίδραση της ροής κατά μήκος υδατορευμάτων ή της επίγεια ροής (overland flow) με την υπόγεια ροή (π.χ. Swain and Wexler, 1996, Vanderkwaak, 1999, Panday and Huyakorn, 2004,). Ο αριθμός των μοντέλων που έχουν αναπτυχθεί για την προσομοίωση της αλληλεπίδρασης παράκτιων υδάτων, εκβολών ποταμών, λιμνών και υδροτόπων με τα υπόγεια νερά είναι σχετικά μικρός (π.χ. Ebrahimi, 2004, Sparks, 2008).

Η εξίσωση που χρησιμοποιείται για την περιγραφή της υπόγεια ροής στα ολοκληρωμένα μοντέλα επιφανειακών-υπόγειων νερών εξαρτάται από το αν εξετάζεται η περίπτωση υδραυλικής επαφής μεταξύ επιφανειακών και υπόγειων νερών, οπότε θεωρείται η υπόγεια ροή μόνο στην κορεσμένη ζώνη (π.χ. Swain and Wexler, 1996, Sparks, 2008), ή η περίπτωση που επιφανειακά και υπόγεια νερά μπορεί να μη βρίσκονται σε υδραυλική επαφή οπότε προσομοιώνεται η υπόγεια ροή τόσο στην κορεσμένη όσο και στην ακόρεστη ζώνη (π.χ. Vanderkwaak, 1999, Panday and Huyakorn, 2004). Η κορεσμένη υπόγεια ροή θεωρείται γενικά διδιάστατη, οριζόντια ή στο κατακόρυφο επίπεδο, ή τρισδιάστατη. Για την περιγραφή της κορεσμένης-ακόρεστης ροής, η οποία θεωρείται τρισδιάστατη, διδιάστατη στο κατακόρυφο επίπεδο ή μονοδιάστατη στην κατακόρυφη διεύθυνση, χρησιμοποιείται η εξίσωση Richards.

Η ροή των επιφανειακών υδάτων στα ολοκληρωμένα αριθμητικά μοντέλα επιφανειακών-υπόγειων νερών που έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα θεωρείται μονοδιάστατη ή διδιάστατη. Μονοδιάστατη θεωρείται η ροή κατά μήκος υδατορευμάτων, για την προσομοίωση της οποίας επιλύονται αριθμητικά οι εξισώσεις Saint Venant είτε στην πλήρη τους μορφή (π.χ. Swain and Wexler, 1996) είτε έπειτα από απλοποιητικές παραδοχές, οπότε προκύπτουν οι εξισώσεις του κύματος μηδενικής αδράνειας ή του κινηματικού κύματος (π.χ. Hussein and Schwartz, 2003). Η ροή των επιφανειακών υδάτων θεωρείται διδιάστατη στα μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί για την προσομοίωση της αλληλεπίδρασης μεταξύ της επίγεια και της υπόγεια ροής ή της αλληλεπίδρασης παράκτιων υδάτων, εκβολών ποταμών και υδροτόπων με τα υπόγεια νερά. Για την περιγραφή της επίγεια ροής χρησιμοποιούνται συνήθως οι εξισώσεις του κύματος μηδενικής αδράνειας (π.χ. Vanderkwaak, 1999, Panday and Huyakorn, 2004). Για την προσομοίωση της υδροδυναμικής κυκλοφορίας σε παράκτιες περιοχές, εκβολές ποταμών και υδροτόπους επιλύονται οι διδιάστατες εξισώσεις ρηχών υδάτων (π.χ. Ebrahimi, 2004, Sparks, 2008).

Η προσεγγιστική παραδοχή της σχεδόν οριζόντιας ροής ρηχών υδάτων, που σημαίνει την αμέληση των κατακόρυφων επιταχύνσεων και τη θεώρηση υδροστατικής κατανομής της πίεσης, απλοποιεί σημαντικά τη μαθηματική διατύπωση και την αριθμητική επίλυση των εξισώσεων κυκλοφορίας. Υπάρχουν όμως πολλές περιπτώσεις που μπορεί να γίνει η παραδοχή ρηχών νερών αλλά η υπόθεση πως οι ταχύτητες ροής είναι περίπου οριζόντιες και δε μεταβάλλονται σημαντικά με το βάθος δεν είναι ρεαλιστική (π.χ. περιπτώσεις ανεμογενούς κυκλοφορίας). Σε τέτοιες περιπτώσεις χρειάζεται να χρησιμοποιηθεί ένα τρισδιάστατο μοντέλο για την προσομοίωση της υδροδυναμικής κυκλοφορίας στα επιφανειακά υδάτινα σώματα. Ωστόσο, στη βιβλιογραφία δεν έχει δημοσιευθεί κάποιο ολοκληρωμένο αριθμητικό

μοντέλο επιφανειακών-υπόγειων νερών στο οποίο να θεωρείται τρισδιάστατη η ροή τόσο των επιφανειακών όσο και των υπόγειων υδάτων.

Παρόλο που έχει αναπτυχθεί ένας σημαντικός αριθμός αριθμητικών μοντέλων για την προσομοίωση της αλληλεπίδρασης μεταξύ της ροής επιφανειακών και υπόγειων υδάτων, δεν είναι πολλά τα αριθμητικά μοντέλα προσομοίωσης της αλληλεπίδρασης ροής και ρύπανσης μεταξύ επιφανειακών και υπόγειων νερών. Μερικά παραδείγματα αποτελούν τα μοντέλα που παρουσιάζονται στις εργασίες των Vanderkwaak (1999) και Sparks (2008).

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται το τρισδιάστατο ολοκληρωμένο αριθμητικό μοντέλο επιφανειακών-υπόγειων νερών IRENE, το οποίο αποτελείται από: (α) ολοκληρωμένο υδροδυναμικό μοντέλο επιφανειακών-υπόγειων νερών (IRENE-HYD) (βλ. Spanoudaki et al., 2009) και (β) ολοκληρωμένο μοντέλο ποιότητας επιφανειακών-υπόγειων νερών (IRENE-QUAL). Στις επόμενες παραγράφους διατυπώνονται αρχικά οι μερικές διαφορικές εξισώσεις που χρησιμοποιούνται στο IRENE για την περιγραφή της ροής των επιφανειακών και των υπόγειων υδάτων και της συμπεριφοράς ποιοτικών παραμέτρων σε επιφανειακά και υπόγεια νερά και στη συνέχεια περιγράφεται η αριθμητική τους επίλυση με σχήματα πεπερασμένων διαφορών και ο συνδυασμός τους στην κοινή διεπιφάνεια των επιφανειακών-υπόγειων υδάτων. Η ακρίβεια του IRENE ελέγχεται εφαρμόζοντάς το σε δύο απλές περιπτώσεις αλληλεπίδρασης επιφανειακών-υπόγειων νερών. Παρουσιάζεται επίσης η εφαρμογή του IRENE στην περιοχή των υδρολογικών λεκανών Αχελώου-Λυσιμαχίας-Τριγωνίδας.

2. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ

2.1 ΕΙΣΩΣΕΙΣ ΤΟΥ IRENE-HYD

Το IRENE-HYD αποτελείται από: (α) τρισδιάστατο υπό-μοντέλο ροής επιφανειακών νερών και (β) τρισδιάστατο υπό-μοντέλο ροής υπόγειων νερών. Το υπό-μοντέλο ροής επιφανειακών νερών του IRENE-HYD βασίστηκε στο αριθμητικό μοντέλο FLOW-3DL που έχει αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Υδραυλικής του Τομέα Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. για την προσομοίωση της υδροδυναμικής κυκλοφορίας μεταβατικών και παράκτιων υδάτων (π.χ. Stamou et al., 2007). Στο υπό-μοντέλο ροής επιφανειακών υδάτων του IRENE-HYD επιλύονται οι εξισώσεις συνέχειας (Εξ. (2.1)) και ποσότητας κίνησης (Εξ. (2.2) και (2.3)) για ρηχά νερά, οι οποίες περιγράφουν ροές με ελεύθερη επιφάνεια υπό σταθερή πυκνότητα. Το υπό-μοντέλο ροής υπόγειων νερών επιλύει τη μερική διαφορική εξίσωση που περιγράφει την τρισδιάστατη μη μόνιμη κορεσμένη υπόγεια ροή σε ετερογενές ανισότροπο πορώδες μέσο (Εξ. (2.4)).

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(v_h \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_h \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_v \frac{\partial u}{\partial z} \right) + fv \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(v_h \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_h \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_v \frac{\partial v}{\partial z} \right) - fu \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.4)$$

Στις εξισώσεις (2.1)-(2.3), t [T] είναι ο χρόνος, u , v και w [LT^{-1}] είναι οι συνιστώσες της ταχύτητας των επιφανειακών νερών στις διευθύνσεις x , y και z , αντίστοιχα, ενός καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων, ζ [L] είναι το υψόμετρο της ελεύθερης

επιφάνειας μετρούμενο από ένα επίπεδο αναφοράς, v_h και v_v [L^2T^{-1}] συμβολίζουν τους συντελεστές οριζόντιας και κατακόρυφης κινηματικής τυρβώδους συνεκτικότητας, αντίστοιχα, f είναι η παράμετρος Coriolis και g [LT^2] είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας. Στην εξίσωση (2.4), h [L] είναι το πιεζομετρικό φορτίο, S_s [L^{-1}] είναι η ειδική αποθηκευτικότητα του υδροφορέα, K_x , K_y και K_z [LT^{-1}] συμβολίζουν τις συνιστώσες της υδραυλικής αγωγιμότητας στις διευθύνσεις x , y και z του καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων, αντίστοιχα, οι οποίες θεωρούνται παράλληλες στις κύριες διευθύνσεις της υδραυλικής αγωγιμότητας και W [T^{-1}] συμβολίζει εισροές ή/και εκροές ρευστού στον/από τον υπόγειο υδροφορέα (π.χ. αντλήσεις, παροχετεύσεις, κλπ).

Ολοκληρώνοντας την εξίσωση συνέχειας (2.1) κατά z από τον πυθμένα ως την ελεύθερη επιφάνεια του επιφανειακού υδάτινου σώματος και λαμβάνοντας υπ' όψη τις κινηματικές οριακές συνθήκες που ισχύουν στην ελεύθερη επιφάνεια και στον πυθμένα προκύπτει η ονομαζόμενη εξίσωση της ελεύθερης επιφάνειας (Εξ. (2.5)), η οποία περιγράφει τη διακύμανσή της με το χρόνο. Έτσι, στο υπό-μοντέλο ροής επιφανειακών νερών του IRENE-HYD επιλύονται οι εξισώσεις (2.1)-(2.3), και (2.5) για τον προσδιορισμό του τρισδιάστατου πεδίου ταχυτήτων και του υψομέτρου της ελεύθερης επιφάνειας των επιφανειακών υδάτων.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\int_z udz \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\int_z vdz \right) = Q_s \quad (2.5)$$

όπου Q_s [LT^{-1}] συμβολίζει την εισροή/εκροή νερού μέσω του πυθμένα του επιφανειακού υδάτινου σώματος, όπως π.χ. τη διήθηση επιφανειακού νερού στο υποκείμενο πορώδες μέσο.

2.2 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΤΟΥ IRENE-QUAL

Το IRENE-QUAL αποτελείται από: (α) υπό-μοντέλο ποιότητας επιφανειακών νερών και (β) υπό-μοντέλο ποιότητας υπόγειων νερών. Στο υπό-μοντέλο ποιότητας επιφανειακών νερών επιλύεται η εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης, η οποία εκφράζει την αρχή διατήρησης της μάζας τυχαίας ουσίας που εισάγεται σε επιφανειακό υδάτινο σώμα και η οποία για τρισδιάστατο τυρβώδες πεδίο ροής και αμελώντας τη συμβολή της μοριακής διάχυσης εκφράζεται ως:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = - \frac{\partial(uC)}{\partial x} - \frac{\partial(vC)}{\partial y} - \frac{\partial(wC)}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{tx} \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{ty} \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{tz} \frac{\partial C}{\partial z} \right) + q_{ss} C_{ss} + R_s \quad (2.6)$$

όπου C [ML^{-3}] είναι η συγκέντρωση της διαλυμένης στο νερό ουσίας, q_{ss} [T^{-1}] συμβολίζει την παροχή εισροής ή εκροής ύδατος στο/από το επιφανειακό υδάτινο σώμα, ανά μονάδα όγκου του επιφανειακού υδάτινου σώματος, C_{ss} [ML^{-3}] είναι η συγκέντρωση της διαλυμένης ουσίας στην εισροή/εκροή, R_s [$ML^{-3}T^{-1}$] είναι ο ρυθμός πρόσθεσης ή απώλειας της ουσίας λόγω φυσικών, χημικών ή βιολογικών διεργασιών και D_{tx} , D_{ty} και D_{tz} [$ML^{-2}T^{-1}$] είναι οι συντελεστές τυρβώδους διάχυσης στις διευθύνσεις x , y και z , αντίστοιχα.

Η μερική διαφορική εξίσωση που περιγράφει τους μηχανισμούς κίνησης και τις φυσικές, χημικές ή βιολογικές διεργασίες που υφίσταται ρύπος που εισάγεται σε τρισδιάστατο πεδίο ροής υπόγειων υδάτων, προκύπτει από την εφαρμογή της αρχής διατήρησης της μάζας του ρύπου σε στοιχειώδη όγκο του πορώδους μέσου και μπορεί να διατυπωθεί σε μητρική μορφή ως:

$$n_e \frac{\partial C}{\partial t} = -\operatorname{div}(n_e \mathbf{V}_p C) + \operatorname{div}(n_e \mathbf{D}_h \operatorname{grad}(C)) + q_{gs} C_{gs} + R_g \quad (2.7)$$

όπου \mathbf{V}_p [LT^{-1}] συμβολίζει το διάνυσμα της πραγματικής μέσης ταχύτητας ροής των υπόγειων υδάτων, \mathbf{D}_h συμβολίζει το συμμετρικό τανυστή των συντελεστών υδροδυναμικής διασποράς $D_{h_{xx}}, D_{h_{yy}}, D_{h_{zz}}, D_{h_{xy}}, D_{h_{yx}}, D_{h_{xz}}, D_{h_{zx}}, D_{h_{yz}}$ και $D_{h_{zy}}$ [L^2T^{-1}], n_e είναι το ενεργό πορώδες, q_{gs} [T^{-1}] είναι η παροχή εισροής ή εκροής ρυπασμένου ύδατος στον/από τον υδροφορέα ανά μονάδα όγκου του υδροφορέα, C_{gs} [ML^{-3}] είναι η συγκέντρωση του διαλυμένου ρύπου στην εισροή/εκροή του ρυπασμένου ύδατος και R_g [$\text{ML}^{-3}\text{T}^{-1}$] είναι ο ρυθμός πρόσθεσης ή απώλειας ρύπου λόγω φυσικών, χημικών ή βιολογικών διεργασιών. Οι κυριότεροι μηχανισμοί γένεσης ή απώλειας ρύπων είναι η προσρόφηση ρύπων από το πορώδες μέσο και η βιολογική ή ραδιενεργός διάσπαση. Στο υπό-μοντέλο ποιότητας υπόγειων νερών του IRENE-QUAL θεωρείται ότι η διάσπαση ρύπου ακολουθεί κινητική πρώτης τάξης και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας από τους ακόλουθους τύπους ισόθερων προσρόφησης σε κατάσταση ισορροπίας για την περιγραφή της προσρόφησης ρύπου από το πορώδες μέσο: γραμμική ισόθερμη, ισόθερμη Freundlich ή ισόθερμη Langmuir.

3. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΕΠΙΛΥΣΗ

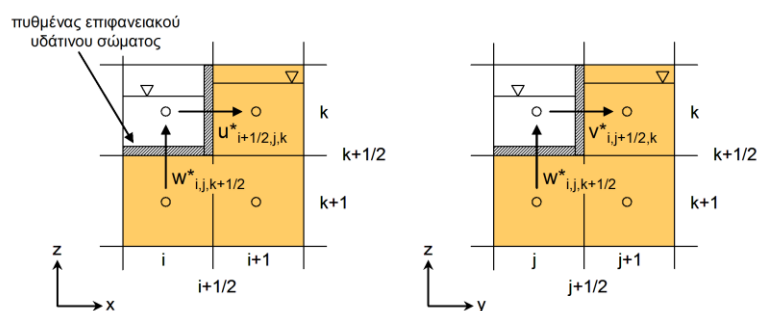
3.1 ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ ΤΟΥ IRENE-HYD

Οι εξισώσεις των επιφανειακών και των υπόγειων νερών επιλύονται με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών μετά τη διακριτοποίηση του υπολογιστικού πεδίου με πλέγμα που αποτελείται από ορθογωνικούς διαφορικούς όγκους (υπολογιστικά κελιά). Το υπολογιστικό πλέγμα είναι εναλλασσόμενο, δηλαδή τα διάφορα βαθμωτά μεγέθη (τα πιεζομετρικά φορτία, η στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας, κλπ) υπολογίζονται στα κέντρα (κόμβους) των κελιών, ενώ οι συνιστώσες της ταχύτητας των επιφανειακών και των υπόγειων νερών υπολογίζονται στα μέτωπα των διαφορικών όγκων. Εισάγονται οι δείκτες i, j και k οι οποίοι συμβολίζουν τη στήλη, τη γραμμή και το στρώμα, στα οποία χωρίζεται το πεδίο στις διευθύνσεις x, y και z , αντίστοιχα. Τα κέντρα των κελιών συμβολίζονται ως (i, j, k) και τα μέτωπα των κελιών ως $(i \pm 1/2, j, k)$, $(i, j \pm 1/2, k)$ και $(i, j, k \pm 1/2)$. Στις οριζόντιες διευθύνσεις x και y το πλέγμα είναι ορθογώνιο και μπορούν να χρησιμοποιηθούν μεταβλητές διαστάσεις Δ_{xi} και Δ_{yj} , αντίστοιχα. Στη διεύθυνση z , τα στρώματα είναι οριζόντια στην περιοχή των επιφανειακών νερών, ενώ στην περιοχή του υδροφορέα μπορεί να μην είναι οριζόντια ώστε να ακολουθούν τα όρια διαφορετικών γεωλογικών σχηματισμών. Το υπολογιστικό πλέγμα παραμένει αμετάβλητο κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, ενώ η ελεύθερη επιφάνεια των επιφανειακών και των υπόγειων νερών μπορεί να μετακινηθεί σε οποιοδήποτε υψόμετρο εντός του υπολογιστικού πεδίου.

Οι εξισώσεις του υπό-μοντέλου ροής επιφανειακών νερών του IRENE-HYD επιλύονται χρησιμοποιώντας ένα ημι-πεπλεγμένο σχήμα πεπερασμένων διαφορών (Casulli and Cheng, 1992), έτσι ώστε η ευστάθεια του σχήματος να μην εξαρτάται από την ταχύτητα διάδοσης των επιφανειακών κυμάτων και ταυτόχρονα να αποφευχθεί ο υπολογιστικός φόρτος που συνεπάγεται ένα πλήρως πεπλεγμένο σχήμα. Η εξίσωση συνέχειας (2.1), η εξίσωση της ελεύθερης επιφάνειας (2.5) και οι όροι κατακόρυφης διάχυσης και βαθμίδας του υψόμετρου της ελεύθερης επιφάνειας στις εξισώσεις ποσότητας κίνησης (2.2) και (2.3) διακριτοποιούνται με πεπλεγμένο τρόπο. Οι όροι μεταφοράς, οριζόντιας διάχυσης και επιτάχυνσης Coriolis διακριτοποιούνται με ρητό τρόπο. Τελικά προκύπτει ένα γραμμικό πενταδιαγώνιο σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων με μοναδικό άγνωστο το υψόμετρο της ελεύθερης επιφάνειας των επιφανειακών υδάτων (βλ. Σπανουδάκη, 2011). Το μητρώο συντελεστών του συστήματος είναι συμμετρικό και θετικά ορισμένο, οπότε το πενταδιαγώνιο σύστημα μπορεί να επιλυθεί πολύ αποτελεσματικά με την επαναληπτική μέθοδο συζυγών

κλίσεων. Πρέπει να σημειωθεί ότι στο υπό-μοντέλο ροής επιφανειακών υδάτων του IRENE–HYD συμπεριλαμβάνεται αλγόριθμος διαβροχής και ξήρανσης υπολογιστικών κελιών του επιφανειακού υδάτινου σώματος, ο οποίος αποτελεί τροποποίηση του αλγόριθμου που προτάθηκε από τους Casulli and Cheng (1992). Οι περιπτώσεις ελέγχου που διερευνήθηκαν έδειξαν ότι το FLOW–3DL μπορεί να εκτιμήσει με ακρίβεια τη διακύμανση της θέσης της ελεύθερης επιφάνειας των επιφανειακών υδάτων σε δύσκολα προβλήματα όπου λαμβάνει χώρα διαβροχή ή ξήρανση περιοχών του υπολογιστικού πλέγματος (βλ. Σπανουδάκη, 2011).

Για την επίλυση της εξίσωσης (2.4) των υπόγειων νερών χρησιμοποιείται ένα πλήρως πεπλεγμένο σχήμα πεπερασμένων διαφορών. Το μητρώο συντελεστών του αλγεβρικού συστήματος εξισώσεων που προκύπτει από τη διακριτοποίηση (με αγνώστους τις τιμές των πιεζομετρικών φορτίων) έχει επτά διαγώνιους μη μηδενικές, ενώ τα υπόλοιπα στοιχεία του είναι μηδενικά και είναι συμμετρικό. Έχει επίσης αυστηρή διαγώνια κυριαρχία και θετικά στοιχεία στην κύρια διαγώνιο, άρα είναι θετικά ορισμένο. Για περιορισμένους υδροφορείς, οι τιμές των συντελεστών των άγνωστων πιεζομετρικών φορτίων είναι σταθερές σε κάθε χρονικό βήμα, οπότε το σύστημα εξισώσεων που προκύπτει είναι γραμμικό. Για φρεάτιους υδροφορείς, οι τιμές των στοιχείων του μητρώου συντελεστών εξαρτώνται από το υψόμετρο της ελεύθερης επιφάνειας των υπόγειων υδάτων –και άρα από τις τιμές των πιεζομετρικών φορτίων– κατά το χρονικό βήμα $n+1$, οπότε το σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων που προκύπτει είναι μη γραμμικό και επιλύεται χρησιμοποιώντας τη μέθοδο επαναλήψεων Picard. Σε κάθε επανάληψη Picard το σύστημα εξισώσεων επιλύεται χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Bi-CGSTAB (Bi-Conjugate Gradient Stabilised method) με προρύθμιση μη πλήρους διάσπασης κατά Stone. Σε κάθε χρονικό βήμα, η στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας των υπόγειων νερών προσδιορίζεται εφαρμόζοντας μία μέθοδο που αποτελεί ουσιαστικά έναν συνδυασμό των μεθόδων που εφαρμόζονται στα αριθμητικά μοντέλα των Huyakorn et al. (1994), και Nanou-Giannarou and Helmig (1998). Είναι η πρώτη φορά που παρόμοια μέθοδος εφαρμόζεται σε μη εμπορικό κώδικα πεπερασμένων διαφορών. Βασίζεται στην παραδοχή ότι στο πορώδες μέσο νερό και αέρας διαχωρίζονται πλήρως και στην αντίστοιχη μεταβολή της σχετικής υδραυλικής αγωγιμότητας ανάλογα με το βαθμό κορεσμού των διαφορικών όγκων. Το βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι τα πιεζομετρικά φορτία υπολογίζονται για ολόκληρο το υπολογιστικό πεδίο, οπότε τα ξηρά υπολογιστικά κελιά δεν απομονώνονται από το υπολογιστικό πεδίο, αποφεύγοντας έτσι αριθμητικές αστάθειες κατά τη λύση (βλ. Σπανουδάκη, 2011).



Σχήμα 1: Συμβολισμός των μεταβλητών στη διεπιφάνεια επιφανειακών-υπόγειων νερών

Τα υπό-μοντέλα ροής επιφανειακών και υπόγειων υδάτων του IRENE–HYD συνδυάζονται στην κοινή διεπιφάνεια των επιφανειακών-υπόγειων νερών μέσω του νόμου του Darcy. Χρησιμοποιώντας το συμβολισμό του Σχήματος 1, η οριζόντια συνιστώσα της ταχύτητας, $u_{i+1/2,j,k}^{*n+1}$, για παράδειγμα, στην κοινή διεπιφάνεια των επιφανειακών-υπόγειων νερών, υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση (2.8). Για τη διατύπωση της εξίσωσης (2.8) θεωρείται ότι το νερό κινείται διαμέσου του πορώδους μέσου και του πυθμένα του

επιφανειακού υδάτινου σώματος. Ο δείκτης * χρησιμοποιείται για το συμβολισμό των μεταβλητών στα κοινά μέτωπα μεταξύ διαφορικών όγκων επιφανειακών και υπόγειων νερών. Στο επιφανειακό υδάτινο σώμα η κατανομή της πίεσης θεωρείται υδροστατική, οπότε για τα πιεζομετρικά φορτία στα υπολογιστικά κελιά του επιφανειακού υδάτινου σώματος ισχύει: $h_{i,j,k} = \zeta_{i,j}$. Η υδραυλική αγωγιμότητα στο μέτωπο $(i+1/2, j, k)$ υπολογίζεται ως ο σταθμικός αρμονικός μέσος όρος των υδραυλικών αγωγιμοτήτων του πυθμένα του επιφανειακού υδάτινου σώματος και του κελιού των υπόγειων υδάτων $(i+1, j, k)$.

$$u_{i+1/2, j, k}^{*n+1} = -K_{x_{i+1/2, j, k}}^* \frac{h_{i+1, j, k}^{n+1} - h_{i, j, k}^{n+1}}{b + 0.5\Delta x_{i+1}} = -K_{x_{i+1/2, j, k}}^* \frac{h_{i+1, j, k}^{n+1} - \zeta_{i, j}^{n+1}}{b + 0.5\Delta x_{i+1}} \quad (2.8)$$

Οι συνιστώσες της ταχύτητας στη διεπιφάνεια μεταξύ επιφανειακών και υπόγειων νερών, όπως υπολογίζονται μέσω του νόμου του Darcy, εισάγονται στις διακριτοποιημένες εξισώσεις ελεύθερης επιφάνειας των επιφανειακών νερών (2.5) και συνέχειας των υπόγειων νερών (2.4). Στην εξίσωση της ελεύθερης επιφάνειας των επιφανειακών υδάτων, ο όρος Q_s , που εκφράζει την εισροή/εκροή νερού μέσω του πυθμένα του επιφανειακού υδάτινου σώματος, τίθεται ίσος με την κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας στη διεπιφάνεια επιφανειακών-υπόγειων νερών. Τελικά προκύπτει ένα σύστημα εξισώσεων με αγνώστους το υψόμετρο της ελεύθερης επιφάνειας των επιφανειακών νερών και τις τιμές των πιεζομετρικών φορτίων στο πεδίο των υπόγειων νερών, οι οποίες πρέπει να επιλυθούν ταυτόχρονα σε κάθε χρονικό βήμα. Αυτό το σύστημα εξισώσεων μπορεί να διατυπωθεί υπό τη μορφή μίας μόνο μητρικής εξίσωσης, ως εξής:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{D} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{CC} \end{bmatrix}^{n+1, \ell} \begin{bmatrix} \zeta \\ \mathbf{h} \end{bmatrix}^{n+1, \ell+1} = \begin{bmatrix} \mathbf{G} \\ \mathbf{E} \end{bmatrix}^{n+1, \ell+1} \quad (2.9)$$

όπου \mathbf{D} είναι το μητρώο συντελεστών του διανύσματος ζ των άγνωστων τιμών του υψομέτρου της ελεύθερης επιφάνειας, \mathbf{CC} είναι το μητρώο συντελεστών του διανύσματος \mathbf{h} των άγνωστων τιμών των πιεζομετρικών φορτίων, \mathbf{G} και \mathbf{E} συμβολίζουν διανύσματα γνωστών τιμών και $\ell, \ell+1$ συμβολίζουν διαδοχικές επαναλήψεις Picard κατά το χρονικό βήμα $n+1$. Σε κάθε επανάληψη Picard, τα συστήματα εξισώσεων $\mathbf{D}^{n+1, \ell} \zeta^{n+1, \ell+1} = \mathbf{G}^{n+1, \ell}$ και $\mathbf{CC}^{n+1, \ell} \mathbf{h}^{n+1, \ell+1} = \mathbf{E}^{n+1, \ell}$ που αποτελούν την εξίσωση (2.9) επιλύονται με τις μεθόδους συζυγών κλίσεων και Bi-GSTAB, αντίστοιχα.

3.1 ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ ΤΟΥ IRENE-QUAL

Οι εξισώσεις μεταφοράς-τυρβώδους διάχυσης ρύπων σε επιφανειακά νερά και μεταφοράς-διασποράς ρύπων σε υπόγεια νερά (2.6) και (2.7), αντίστοιχα, έχουν μικτό υπερβολικό-παραβολικό χαρακτήρα και αποτελούν ουσιαστικά σύνθεση των εξισώσεων απλής μεταφοράς και απλής διάχυσης ή διασποράς. Λόγω του μικτού υπερβολικού-παραβολικού χαρακτήρα των εξισώσεων (2.6) και (2.7), στο IRENE-QUAL χρησιμοποιούνται διαφορετικά αριθμητικά σχήματα για την αντιμετώπιση των όρων μεταφοράς και των όρων διάχυσης ή διασποράς. Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται συνοπτικά τα αριθμητικά σχήματα που περιλαμβάνονται στο IRENE-QUAL για την επίλυση των εξισώσεων (2.6) και (2.7). Το απλούστερο από τα αριθμητικά σχήματα επίλυσης που περιλαμβάνονται στο IRENE-QUAL, είναι το ρητό σχήμα πεπερασμένων διαφορών, όπου για τους όρους μεταφοράς χρησιμοποιείται σχήμα ανάντη διαφορών και για τους όρους διάχυσης σχήμα κεντρικών διαφορών. Ωστόσο, σε προβλήματα όπου ο μηχανισμός της

μεταφοράς υπερισχύει σημαντικά του μηχανισμού της τυρβώδους διάχυσης ή της υδροδυναμικής διασποράς, η αριθμητική διάχυση που εισάγεται στη λύση λόγω της ανάντη διακριτοποίησης των όρων μεταφοράς είναι σημαντική και μπορεί να υπερισχύει της φυσικής διάχυσης, επηρεάζοντας έτσι τις υπολογιζόμενες τιμές της συγκέντρωσης στο υπολογιστικό πεδίο. Σε τέτοιες περιπτώσεις θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί το μικτό σχήμα Euler–Lagrange (Cheng et al., 1984) ή το σχήμα τρίτης τάξης ULTIMATE-QUICKEST (Leonard and Niknafs, 1990) για τη διακριτοποίηση των όρων μεταφοράς.

Πίνακας 1: Αριθμητικά σχήματα που περιλαμβάνονται στο IRENE–QUAL για την επίλυση των εξισώσεων (2.6) και (2.7)

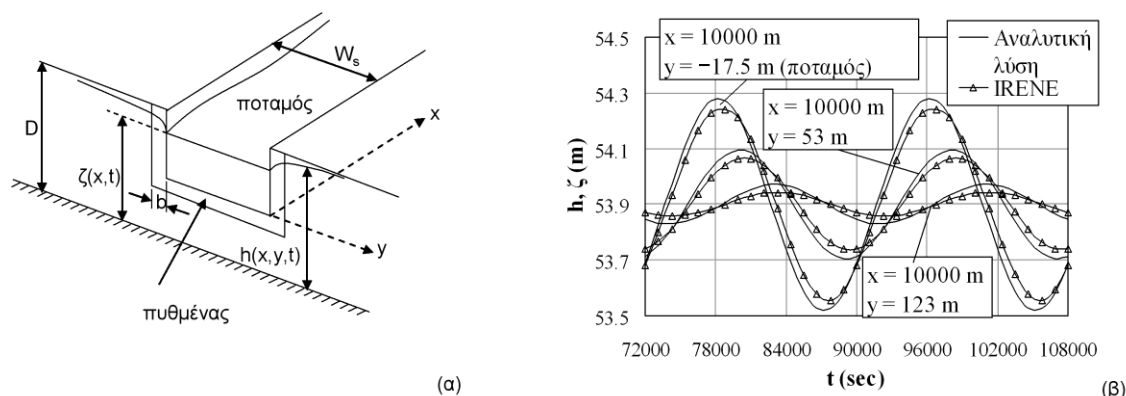
Δυνατοί συνδυασμοί αριθμητικών σχημάτων για την επίλυση των εξισώσεων (2.6) και (2.7)	
Αριθμητικά σχήματα επίλυσης των όρων μεταφοράς	Αριθμητικά σχήματα επίλυσης των όρων διάχυσης ή διασποράς και των όρων απώλειας ή πρόσθεσης ρύπου στο υπολογιστικό πεδίο
Ρητό σχήμα ανάντη διαφορών	Ρητό ή πεπλεγμένο σχήμα κεντρικών διαφορών
Ρητό σχήμα TVD (Total Variation Diminishing, μείωσης της ολικής απόκλισης) τρίτης τάξης: ✓ σχήμα ULTIMATE–QUICKEST (Leonard and Niknafs, 1990)	Ρητό ή πεπλεγμένο σχήμα κεντρικών διαφορών
Μικτό αριθμητικό σχήμα Euler–Lagrange (Cheng et al., 1984)	Ρητό ή πεπλεγμένο σχήμα κεντρικών διαφορών

Ο συνδυασμός των υπό-μοντέλων ποιότητας των επιφανειακών και των υπόγειων υδάτων του IRENE–QUAL πραγματοποιείται στην κοινή διεπιφάνεια των επιφανειακών-υπόγειων νερών, θεωρώντας –σε αντίθεση με προηγούμενες εργασίες– ότι τόσο ο μηχανισμός της μεταφοράς όσο και ο μηχανισμός της διασποράς συμβάλλουν στην ανταλλαγή ρύπων μεταξύ των επιφανειακών και των υπόγειων νερών. Ο μηχανισμός της διασποράς είναι σημαντικός για την εκτίμηση της ανταλλαγής ρύπων μεταξύ επιφανειακών και υπόγειων υδάτων σε περιπτώσεις μικρών υδραυλικών κλίσεων μεταξύ των επιφανειακών και των υπόγειων νερών και άρα μικρών ταχυτήτων στην κοινή τους διεπιφάνεια. Έτσι, οι διακριτοποιημένες εξισώσεις (2.6) και (2.7) συνδυάζονται υπολογίζοντας τη ροή μάζας ρύπου εγκάρσια στην κοινή διεπιφάνεια των επιφανειακών-υπόγειων υδάτων λόγω μεταφοράς και διασποράς. Όταν χρησιμοποιείται πεπλεγμένο σχήμα για την επίλυση των όρων διάχυσης ή διασποράς προκύπτει ένα σύστημα γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων που θα πρέπει να επιλυθεί σε κάθε χρονικό βήμα για τον υπολογισμό των ρυπαντικών φορτίων στο υπολογιστικό πεδίο των επιφανειακών-υπόγειων υδάτων. Το σύστημα αυτό των εξισώσεων επιλύεται με την επαναληπτική μέθοδο συζυγών κλίσεων με προορύθμιση μη πλήρους διάσπασης κατά Cholesky.

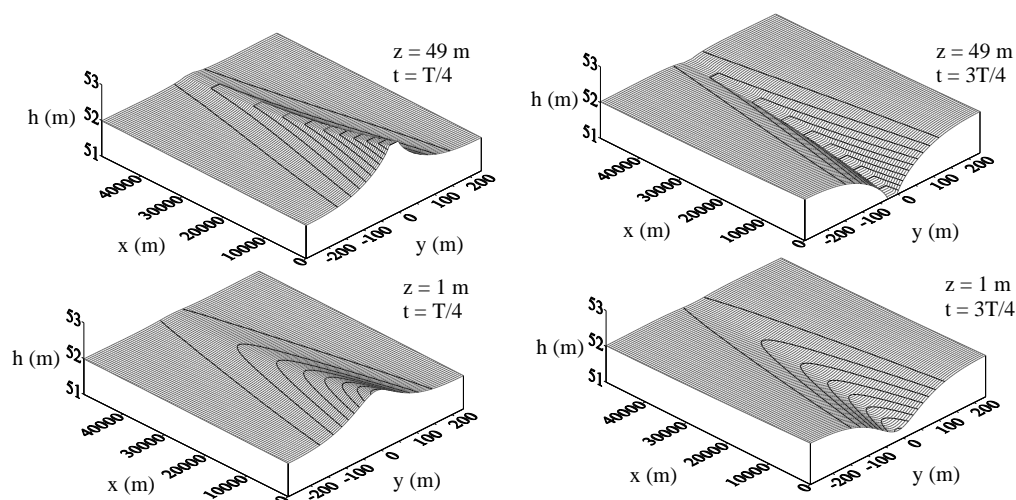
4. ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΟΥ IRENE

Η ακρίβεια του IRENE ελέγχθηκε εφαρμόζοντάς το σε δύο απλές περιπτώσεις αλληλεπίδρασης επιφανειακών-υπόγειων νερών. Στην πρώτη περίπτωση τα αποτελέσματα του IRENE-HYD συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα της αναλυτικής λύσης του Lal (2001) για την αλληλεπίδραση ανάμεσα σε υδατόρευμα και ομογενή και ισότροπο υδροφορέα (Σχήμα 2 (α)). Ο Lal (2001) έλυσε τις εξισώσεις του κινηματικού κύματος για τη ροή κατά μήκους του υδατορεύματος σε συνδυασμό με τη διδιάστατη (στις διευθύνσεις x και y) εξίσωση διάχυσης για την υπόγεια ροή, για ημιτονοειδή διαταραχή της στάθμης του υδατορεύματος στο ανάντη όριο. Για την επιβεβαίωση του IRENE-HYD θεωρήθηκε ημιτονοειδής διαταραχή πλάτους $\zeta'=1$ m και περιόδου $T=5$ hrs σε υδατόρευμα μήκους $L=50000$ m και πλάτους $W_s=30$ m το οποίο έχει κλίση πυθμένα $S_0=10^{-5}$ και δεν διεισδύει καθόλου στον υδροφορέα. Ο υδροφορέας θεωρήθηκε περιορισμένος με πλάτος $W_a=500$ m και υδραυλική αγωγιμότητα $K=0.001$ m/s.

Αρχικά ο υδροφορέας και το υδατόρευμα βρίσκονταν σε υδραυλική ισορροπία και το βάθος ροής στο υδατόρευμα ήταν 4 m. Η προσομοίωση με το IRENE-HYD έγινε χρησιμοποιώντας ένα στρώμα για τη διακριτοποίηση του υδροφορέα. Στο Σχήμα 2 (β) φαίνεται η σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων της αναλυτικής λύσης και του μοντέλου για τη στάθμη του υδατορεύματος και τα πιεζομετρικά φορτία, όταν αποκατασταθεί μόνιμη περιοδική ροή. Το μέσο σχετικό σφάλμα ανάμεσα στα αποτελέσματα του μοντέλου και την αναλυτική λύση είναι 4.2% για τη στάθμη του υδατορεύματος και 6.3% για τα πιεζομετρικά φορτία.



Σχήμα 2: Αλληλεπίδραση υδατορεύματος-υδροφορέα: (α) σχήμα ορισμού και (β) σύγκριση των αποτελεσμάτων του IRENE-HYD με την αναλυτική λύση του Lal (2001)

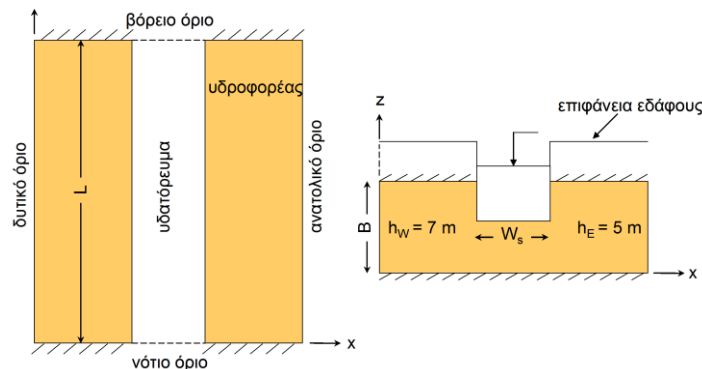


Σχήμα 3: Πιεζομ. φορτία στο υδατόρευμα και στον υδροφορέα, στο επίπεδο x-y (πιεζομ. επιφάνειες), για το πρώτο ($z=49$ m) και το τελευταίο ($z=1$ m) στρώμα του υδροφορέα για $t=T/4$ και $t=3T/4$. Το πρώτο στρώμα τέμνει το υδατόρευμα από $y=-30$ m ως $y=0$ m

Η σύγκριση δείχνει ότι το IRENE-HYD προσεγγίζει με ικανοποιητική ακρίβεια τα αποτελέσματα της αναλυτικής λύσης. Ωστόσο αυτή η περίπτωση αλληλεπίδρασης μπορεί να προσομοιωθεί από οποιοδήποτε από τα διαθέσιμα μοντέλα επιφανειακών-υπόγειων νερών στα οποία η ροή στον ποταμό θεωρείται μονοδιάστατη και συνδέεται στην κατακόρυφη διεύθυνση με την υπόγεια ροή (π.χ. Swain and Wexler, 1996). Για να αναδειχθεί η εφαρμογή του IRENE-HYD σε μία περίπτωση αλληλεπίδρασης όπου χρειάζεται να χρησιμοποιηθεί ένα τρισδιάστατο ολοκληρωμένο μοντέλο επιφανειακών-υπόγειων νερών, η παραπάνω περίπτωση αλληλεπίδρασης επιλύθηκε θεωρώντας ότι το υδατόρευμα διεισδύει κατά 10 m στον περιορισμένο υδροφορέα και ότι το αρχικό βάθος ροής σε αυτό είναι 12 m. Το υπολογιστικό πεδίο διακριτοποιήθηκε με 26 στρώματα πάχους 2 m. Ο τρισδιάστατος χαρακτήρας της εφαρμογής φαίνεται στο Σχήμα 3. Για $t=T/4$ τα πιεζομετρικά φορτία στο

υδατόρευμα είναι υψηλότερα από τα πιεζομετρικά φορτία στον υδροφορέα και η πιεζομετρική επιφάνεια για $z=49$ m είναι υψηλότερη από την πιεζομετρική επιφάνεια για $z=1$ m, δηλαδή το υδατόρευμα τροφοδοτεί τον υδροφορέα. Το αντίθετο ισχύει για $t=3T/4$, οπότε ο υδροφορέας τροφοδοτεί το υδατόρευμα. Η συμπεριφορά αυτή μπορεί να είναι σημαντική, για παράδειγμα, για τη μελέτη μεταφοράς ρύπου στο σύστημα των επιφανειακών-υπόγειων νερών και μπορεί να προβλεφθεί μόνο από ένα τρισδιάστατο μοντέλο επιφανειακών-υπόγειων νερών, όπως το IRENE-HYD.

Στη δεύτερη περίπτωση ελέγχου του IRENE, αξιολογήθηκαν ποιοτικά τα αποτελέσματα του μοντέλου για ένα υποθετικό πρόβλημα αλληλεπίδρασης ροής και ρύπανσης μεταξύ περιορισμένου υδροφορέα και υδατορεύματος μερικής διείσδυσης. Θεωρήθηκε ομογενής και ισότροπος υδροφορέας με μήκος $L=370$ m, πλάτος $W_a=210$ m, πάχος $B=5$ m και υδραυλική αγωγιμότητα $K=0.005$ m/s και υδατόρευμα με πλάτος $W_s=5$ m και βάθος διείσδυσης στον υδροφορέα 2 m (Σχήμα 4). Το δυτικό και το ανατολικό όριο του υδροφορέα θεωρήθηκαν όρια σταθερού πιεζομετρικού φορτίου, συγκεκριμένα $h_w=7$ m και $h_e=5$ m (βλ. Σχήμα 4). Το νότιο όριο και το βόρειο όριο του υδροφορέα θεωρήθηκαν αδιαπέρατα. Η αρχική στάθμη του νερού στο υδατόρευμα ήταν ίση με 6 m. Το νότιο και το βόρειο όριο του υδατορεύματος θεωρήθηκαν ανοικτά όρια και στο νότιο όριο καθορίστηκε σταθερή εισροή ίση με 15 m³/s. Το υπολογιστικό πεδίο διακριτοποιήθηκε στο IRENE χρησιμοποιώντας 21 στήλες, 37 γραμμές και 12 στρώματα. Τη χρονική στιγμή $t=0$ θεωρήθηκε στο δυτικό όριο του υδροφορέα συνεχής πηγή ρύπανσης σταθερής συγκέντρωσης $C=1000$ mg/L. Το μέτωπο του συντηρητικού ρύπου που εισέρχεται στο πεδίο ροής από το δυτικό όριο του υδροφορέα εκτείνεται από $y=50$ m έως $y=100$ m και από $z=0$ m έως $z=5$ m.

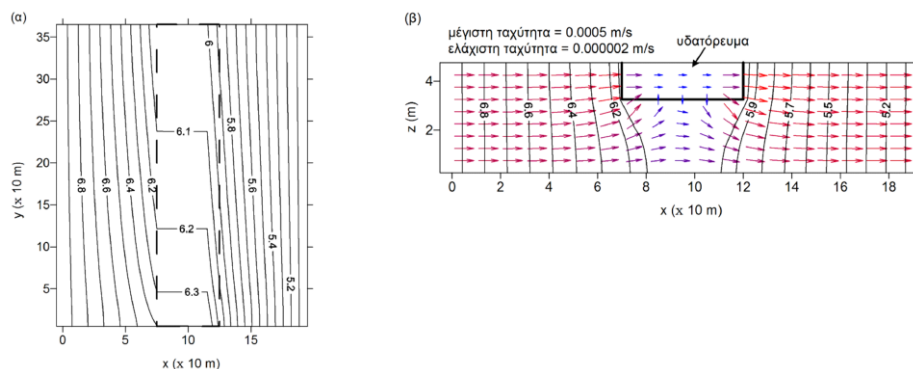


Σχήμα 4: Γεωμετρία της περίπτωσης αλληλεπίδρασης υδατορεύματος-περιορισμένου υδροφορέα

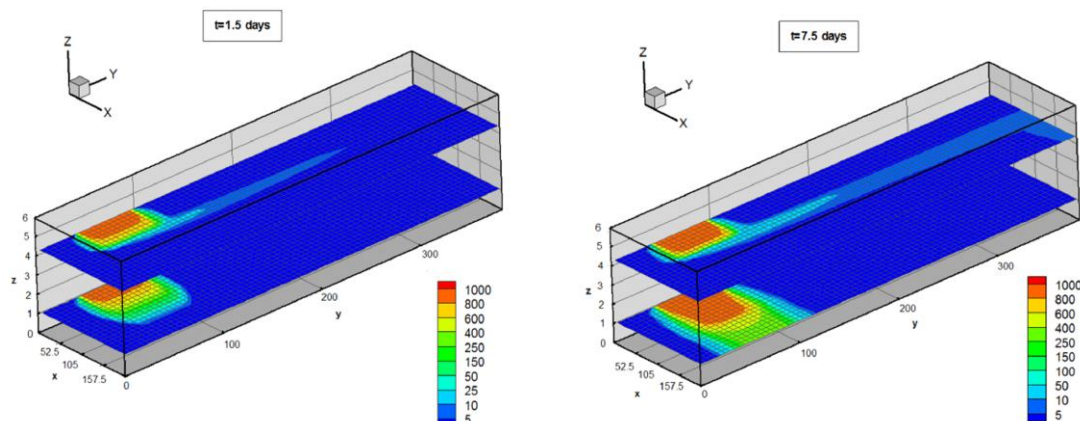
Στο Σχήμα 5 (α) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του IRENE-HYD για την κατανομή των πιεζομετρικών φορτίων και της στάθμης του υδατορεύματος στο επίπεδο $x-y$, για $z=4.75$ m (πρώτο στρώμα του υδροφορέα), μετά την αποκατάσταση μόνιμης ροής. Το πρώτο στρώμα του υδροφορέα τέμνει το υδατόρευμα από $x=80$ m έως $x=130$ m. Στο Σχήμα 5 (β) φαίνονται τα πιεζομετρικά φορτία και το πεδίο ταχυτήτων στο κατακόρυφο επίπεδο $x-z$, στη θέση $y=185$ m. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5, η διεύθυνση της ροής των υπόγειων υδάτων είναι από το δυτικό προς το ανατολικό όριο του υδροφορέα. Ένα τμήμα της υπόγειας ροής τροφοδοτεί το υδατόρευμα, ενώ το άλλο τμήμα της υπόγειας ροής, μαζί με την τροφοδοσία των υπόγειων νερών από το υδατόρευμα μέσω του ανατολικού τμήματος του πυθμένα και της όχθης, κατευθύνεται προς το ανατολικό όριο του υδροφορέα.

Στο Σχήμα 6 απεικονίζονται οι τιμές των συγκεντρώσεων του ρύπου στο σύστημα των επιφανειακών-υπόγειων νερών κατά τους χρόνους $t=1.5$ days και $t=7.5$ days. Οι συγκεντρώσεις απεικονίζονται στο επίπεδο $x-y$ για $z=4.75$ m (πρώτο στρώμα του υδροφορέα) και $z=0.25$ m (τελευταίο στρώμα του υδροφορέα). Για χρόνο $t=1.5$ days, ο ρύπος έχει ήδη

εισέλθει στο υδατόρευμα, όπου υπερισχύει ο μηχανισμός της μεταφοράς του ρύπου κατάντη. Στο τελευταίο στρώμα του υδροφορέα ο ρύπος κινείται προς το ανατολικό όριο. Αξιολογώντας ποιοτικά τα αποτελέσματα του IRENE για την παραπάνω υποθετική περίπτωση αλληλεπίδρασης μεταξύ υδροφορέα και υδατορεύματος αποδεικνύεται (α) η ικανότητα του IRENE-QUAL να εκτιμά τα ρυπαντικά φορτία σε ένα σύστημα επιφανειακών-υπόγειων νερών και (β) η ανάγκη να χρησιμοποιηθεί ένα τρισδιάστατο ολοκληρωμένο αριθμητικό μοντέλο ποιότητας επιφανειακών-υπόγειων νερών για την ακριβή εκτίμηση της ρύπανσης σε συστήματα επιφανειακών-υπόγειων υδάτων.



Σχήμα 5: Αποτελέσματα του IRENE-HYD για (α) την κατανομή των πιεζομετρικών φορτίων στο επίπεδο x - y για $z=4.75$ m και (β) την κατανομή των πιεζομετρικών φορτίων και το πεδίο ταχυτήτων στο κατακόρυφο επίπεδο x - z , στη θέση $y=185$ m.



Σχήμα 6: Συγκεντρώσεις ρύπου στο σύστημα υδροφορέα-υδατορεύματος για $t=1.5$ d και $t=7.5$ d. Οι συγκεντρώσεις απεικονίζονται στο επίπεδο x - y για $z=4.75$ m και $z=0.25$ m

5. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ IRENE ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΩΝ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΛΕΚΑΝΩΝ ΑΧΕΛΩΟΥ-ΛΥΣΙΜΑΧΕΙΑΣ-ΤΡΙΧΩΝΙΔΑΣ

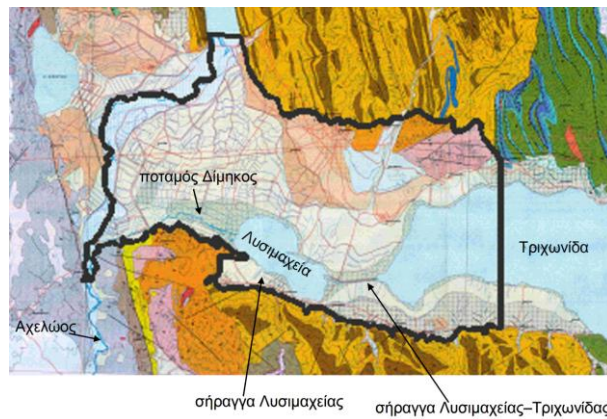
Το IRENE-HYD εφαρμόστηκε στην περιοχή των υδρολογικών λεκανών Αχελώου-Λυσιμαχείας-Τριχωνίδας. Οι πληροφορίες για την περιοχή προήλθαν από στοιχεία του ΙΓΜΕ που ευγενικά μας παρείχε ο υδρογεωλόγος Γ. Ζαχαριουδάκης και από τη μελέτη του Ν. Κουρμούλη, 2001: Υδρογεωλογική έρευνα λεκανών Ν. Αιτωλοακαρνανίας. Δίατα και έλεγχος ποιότητας των υδάτινων πόρων. Η περιοχή μελέτης οριοθετείται Α του ποταμού Αχελώου από το φράγμα του Στράτου και Ν έως το σημείο που ενώνεται με το Δίμηκο ποταμό και περιλαμβάνει τη λίμνη Λυσιμαχεία και ένα κομμάτι της λίμνης Τριχωνίδας έως τα καρστικά πετρώματα (πετρώματα με πράσινο χρώμα στο Σχήμα 7). Στο Β και Ν τμήμα οριοθετείται από τα αδιαπέρατα πετρώματα του Φλύσχη (κίτρινο χρώμα στο Σχήμα 7). Στο Σχήμα 7 φαίνεται το όριο της περιοχής μελέτης με έντονη μαύρη γραμμή.

Η λίμνη Τριχωνίδα είναι το σημαντικότερο υδάτινο σώμα της περιοχής μελέτης. Το μέγιστο βάθος της λίμνης, η οποία περιβάλλεται από καρστικούς σχηματισμούς, φθάνει τα 57 m. Η στάθμη του νερού της Τριχωνίδας ρυθμίζεται τεχνητά με υδατοφράκτη στα 15.5 m περίπου. Η λίμνη Τριχωνίδα συνδέεται με τη λίμνη Λυσιμαχεία με σήραγγα που περιλαμβάνει θυρόφραγμα και δίνει τη δυνατότητα για ελεγχόμενη τροφοδοσία νερού προς αυτήν και έπειτα μέσω συστήματος αρδευτικών καναλιών προς την πεδιάδα του Μεσολογγίου και προς τον ποταμό Αχελώο. Το μέγιστο βάθος της λίμνης Λυσιμαχείας δεν ξεπερνάει τα 8-9 m, ενώ η στάθμη της ρυθμίζεται τεχνητά στα 14-14.5 m. Εκτός των εποχικών υδατορευμάτων που καταλήγουν στη Λυσιμαχεία, αλλά και των περιμετρικά αυτής υδροφόρων οριζόντων που υπόγεια αποστραγγίζονται σ' αυτήν, η λίμνη δέχεται και τις ποσότητες νερών της λίμνης Τριχωνίδας που προέρχονται από την υπερχειλίση του τεχνητά ρυθμιζόμενου ταμιευτήρα της. Η αποχέτευση των νερών της λίμνης επιτυγχάνεται αφενός μέσω του Δίμηκου ποταμού και αφετέρου μέσω της σήραγγας που έχει διανοιχθεί και εξέρχεται προς την πλευρά της λιμνοθάλασσας Αιτωλικού. Οι λεκάνες της Λυσιμαχείας και του Αχελώου περιλαμβάνουν κυρίως αλλουβιακές αποθέσεις. Κατά το μεγαλύτερο μέρος της λεκάνης, ο Αχελώος την διατρέχει διευθετημένος σε τσιμεντένια αύλακα, η οποία απάγει τα νερά που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ενέργειας, από την τεχνητή λίμνη του Στράτου. Ένα μέρος των υδάτων της τεχνητής λίμνης –τα θεωρούμενα ως "υπερχειλιστικά"– διοχετεύονται στην παλιά κοίτη του ποταμού και απορρέουν ελεύθερα. Παράλληλα, από την τεχνητή λίμνη ξεκινά ένα δίκτυο καναλιών, τα οποία διακλαδιζόμενα σε όλη την περιοχή της λεκάνης διασφαλίζουν την άρδυσή της.

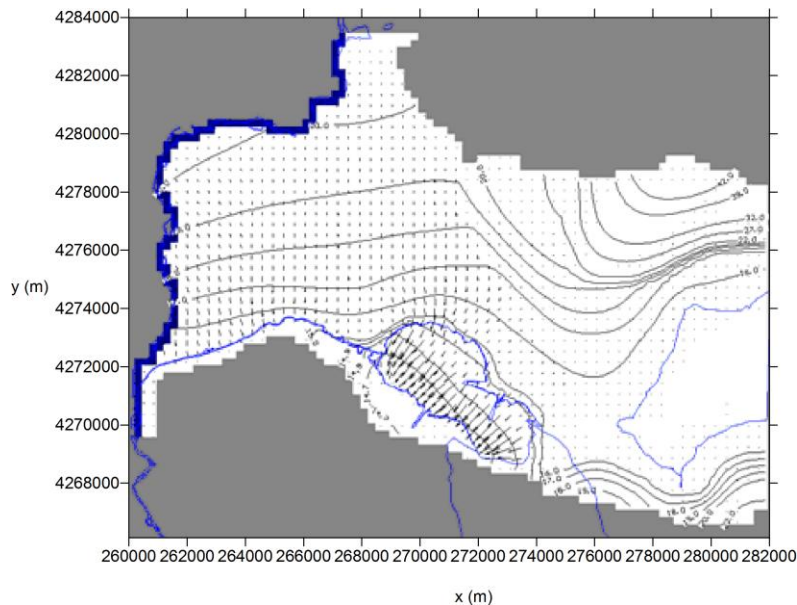
Τα όρια των λιμνών Λυσιμαχείας και Τριχωνίδας, ο ποταμός Αχελώος και ο ποταμός Δίμηκος ψηφιοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας το λογισμικό Arc GIS προκειμένου να εισαχθούν στο IRENE-HYD. Το πάχος του υδροφορέα θεωρήθηκε ίσο με 100 m. Το υπολογιστικό πεδίο διακριτοποιήθηκε στις διευθύνσεις x και y χρησιμοποιώντας 79 στήλες, 89 γραμμές και 2 στρώματα. Το πάχος των υπολογιστικών κελιών στη διεύθυνση z ήταν μεταβλητό, καθώς τα δύο στρώματα δεν ήταν οριζόντια, ώστε να ακολουθούν την τοπογραφία του πυθμένα των επιφανειακών υδάτινων σωμάτων. Στο IRENE-HYD εισήχθησαν οι ακόλουθες οριακές συνθήκες: (α) όλα τα όρια του υδροφορέα θεωρήθηκαν αδιαπέρατα λόγω της ύπαρξης Φλύσχη και (β) η λίμνη Τριχωνίδα θεωρήθηκε όριο σταθερού πιεζομετρικού φορτίου, ίσου με τη στάθμη του νερού στη λίμνη που ήταν 15.5 m. Εκτός από τη λίμνη Τριχωνίδα, το πεδίο ροής στα υπόλοιπα επιφανειακά υδάτινα σώματα της περιοχής αποτέλεσε μέρος της λύσης. Ο Αχελώος αποτέλεσε το δυτικό όριο της περιοχής μελέτης. Σύμφωνα με πληροφορίες από τη ΔΕΗ, η παροχή που αφήνεται από το φράγμα του Στράτου στον Αχελώο είναι περίπου 190 m³/s. Θεωρώντας το μέσο πλάτος του Αχελώου ίσο με 80 m, την κλίση του πυθμένα ίση με 0.001 και τον συντελεστή τραχύτητας Manning ίσο με 0.03 και χρησιμοποιώντας τον τύπο του Manning, το βάθος ομοιόμορφης ροής υπολογίζεται ίσο με 6.0 m. Αρχικά, το βάθος ροής στον Αχελώο θεωρήθηκε ίσο με το βάθος ομοιόμορφης ροής. Το βάθος διείσδυσης του Αχελώου στον υδροφορέα θεωρήθηκε ίσο με 6.5 m. Το κανάλι που συνδέει τη Λυσιμαχεία με την Τριχωνίδα και η σήραγγα της Λυσιμαχείας δεν προσομοιώθηκαν ως επιφανειακά υδάτινα σώματα. Ωστόσο, η εκροή από τη λίμνη Τριχωνίδα προς τη λίμνη Λυσιμαχεία, που εκτιμήθηκε από μετρήσεις περίπου ίση με 290×10^6 m³/έτος και η εκροή από τη λίμνη Λυσιμαχεία μέσω της σήραγγας Λυσιμαχείας, που εκτιμήθηκε περίπου ίση με 220×10^6 m³/έτος, χρησιμοποιήθηκαν ως οριακές συνθήκες για τη λίμνη Λυσιμαχεία.

Δεδομένου ότι οι τιμές των πιεζομετρικών φορτίων στις γεωτρήσεις παρατήρησης που υπάρχουν στην περιοχή μελέτης δε μεταβάλλονται σημαντικά μεταξύ της υγρής και της ξηρής περιόδου λόγω της επαναπλήρωσης του υδροφορέα μέσω της άρδευσης, αποφασίστηκε να προσομοιωθούν συνθήκες μόνιμης ροής θεωρώντας τις μέσες ετήσιες τιμές της βροχόπτωσης και της εξατμισοδιαπνοής για τα έτη 1997-1999. Η βαθμονόμηση του μοντέλου πραγματοποιήθηκε για τις μέσες ετήσιες τιμές των πιεζομετρικών φορτίων στις

γεωτρήσεις παρατήρησης για τα έτη 1997-1999. Προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή σύγκλιση μεταξύ των τιμών των πιεζομετρικών φορτίων που υπολογίζονται με το IRENE-HYD και των τιμών των πιεζομετρικών φορτίων στις γεωτρήσεις παρατήρησης, έγιναν αρκετά αριθμητικά πειράματα μεταβάλλοντας τις τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας και τις τιμές της κατείδυσης. Τα όρια των τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας και της κατείδυσης για τα αριθμητικά πειράματα επιλέχθηκαν κατά περιοχή ανάλογα με την υδρογεωλογία.



Σχήμα 7: Γεωλογικός χάρτης και οριοθέτηση της περιοχής μελέτης



Σχήμα 8: Αποτελέσματα του IRENE-HYD για τις τιμές των πιεζομετρικών φορτίων, τη στάθμη των επιφανειακών νερών και το πεδίο ταχυτήτων στην περιοχή μελέτης

Στο Σχήμα 8 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του μοντέλου για τα πιεζομετρικά φορτία, τη στάθμη των επιφανειακών νερών και το πεδίο ταχυτήτων. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 8, ο Αχελώος τροφοδοτεί σε όλο του το μήκος τον υπόγειο υδροφόρα και τα υπόγεια νερά τροφοδοτούν τις λίμνες Λυσιμαχία και Τριχωνίδα. Με το IRENE-HYD υπολογίστηκε ότι ο Αχελώος τροφοδοτεί με περίπου $9.2 \times 10^6 \text{ m}^3$ νερού ανά έτος τα υπόγεια νερά, ενώ επιπλέον περίπου $40.8 \times 10^6 \text{ m}^3$ νερού ανά έτος κατεισδύουν στον αλλουβιακό υδροφόρα των υδρολογικών λεκανών του Αχελώου και της Λυσιμαχίας. Αυτά τα συνολικά $50 \times 10^6 \text{ m}^3$ νερού ανά έτος καταλήγουν μέσω της υπόγειας ροής στη λίμνη Λυσιμαχία. Η Λυσιμαχία έχει επιπλέον εισροή $290 \times 10^6 \text{ m}^3$ νερού ανά έτος από τη λίμνη Τριχωνίδα μέσω της σήραγγας Λυσιμαχίας-Τριχωνίδας. Η εκροή της Λυσιμαχίας γίνεται μέσω του ποταμού Δίμηκου ($120 \times 10^6 \text{ m}^3$ νερού ανά έτος) και τη σήραγγα Λυσιμαχίας ($220 \times 10^6 \text{ m}^3$ νερού ανά έτος) που διοχετεύει το νερό στην υδρολογική λεκάνη του Αιτωλικού.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκε το τρισδιάστατο ολοκληρωμένο αριθμητικό μοντέλο επιφανειακών-υπόγειων νερών IRENE. Ο τρισδιάστατος χαρακτήρας του IRENE επιτρέπει τη λεπτομερή περιγραφή της ανταλλαγής νερού και ρύπων μεταξύ επιφανειακών και υπόγειων υδάτων τόσο στην κατακόρυφη όσο και στις οριζόντιες διευθύνσεις. Αυτό μπορεί να αποδειχθεί σημαντικό, για παράδειγμα, όταν ενδιαφέρει η ακριβής προσομοίωση της κίνησης ρύπων μεταξύ επιφανειακών και υπόγειων νερών. Η ακρίβεια του IRENE ελέγχθηκε εφαρμόζοντάς το σε δύο απλές περιπτώσεις αλληλεπίδρασης επιφανειακών-υπόγειων νερών. Η εφαρμογή του IRENE-HYD στις περιοχές των υδρολογικών λεκανών Αχελώου-Λυσιμαχείας-Τριχωνίδας επιβεβαίωσε τις εκτιμήσεις που είχαν γίνει σε μελέτες του ΙΓΜΕ για το υδρολογικό ισοζύγιο της περιοχής. Ωστόσο, η εφαρμογή του IRENE-HYD στη συγκεκριμένη περιοχή δεν αποτελεί μία διεξοδική αριθμητική προσομοίωση του συστήματος των υδρολογικών λεκανών του Αχελώου, της Λυσιμαχείας και της Τριχωνίδας, αλλά μία επιβεβαίωση ότι το IRENE-HYD μπορεί να εφαρμοστεί επιτυχώς σε πραγματικά προβλήματα αλληλεπίδρασης επιφανειακών-υπόγειων νερών με σύνθετη γεωμετρία και υδρογεωλογικές συνθήκες.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Σπανουδάκη, Κ., 2011. *Ολοκληρωμένα μαθηματικά μοντέλα υδατικών συστημάτων*. Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., 418 σελ.
- Casulli, V., and Cheng, R.T., 1992. *Semi-implicit finite difference methods for three-dimensional shallow water flow*. International Journal for Numerical Methods in Fluids 15: 629–648.
- Cheng, R.T., Casulli, V. and Milford, S.N., 1984. Eulerian-Lagrangian solution of the convection-dispersion equation in natural coordinates. Water Resources Research, 20: 944-952.
- Huyakorn, P.S., Wu, Y.S. and Park, N.S., 1994. An improved sharp-interface model for assessing NAPL contamination and remediation in groundwater systems. Journal of Contaminant Hydrology: 16, 203-234.
- Lal, A.M.W., 2001. *Modification of canal flow due to stream-aquifer interaction*. Journal of Hydraulic Engineering, 127: 567-576.
- Leonard, B. P. and Niknafs, H.S., 1990. Cost-effective accurate coarse-grid method for highly convective multidimensional unsteady flows. NASA Conference Publication 3078: Computational Fluid Dynamics Symposium on Aeropropulsion, Washington, DC.
- Nanou-Giannarou, K. and Helmig, R., 1998. Simulation of 3-D groundwater flow with free surface. Wissenschaftlicher Bericht 4, Technische Universität Carolo Wilhelmina zu Braunschweig, Institut für Computer Anwendungen im Bauingenieurwesen, Braunschweig.
- Panday, S. and Huyakorn, P.S., 2004. *A fully-coupled physically-based spatially-distributed model for evaluating surface/subsurface flow*. Advances in Water Resources, 27: 361-382.
- Spanoudaki, K., Stamou, A.I. and Nanou-Giannarou, A., 2009. *Development and verification of a 3-D integrated surface water-groundwater model*. Journal of Hydrology, 375: 410-427.
- Sparks, T.D., 2008. *Integrated surface water-groundwater modelling linking surface water and groundwater using DIVAST SG*. Ph.D. Dissertation, Cardiff University, 215 pp.
- Stamou, A.I., Memos, C.D. and Spanoudaki, K., 2007. *Estimating water renewal times semi-enclosed coastal areas with complicated geometry using a hydrodynamic model*. Journal of Coastal Research, 50: 282–286.
- Swain, E.D. and Wexler, E.J., 1991. *A coupled surface-water and ground-water model*. Proceedings of the 1991 National Conference of the Irrigation and Drainage Division, American Society of Civil Engineers, 330-335.

**ΥΔΡΟΧΗΜΙΚΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ
ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΔΥΤΙΚΗΣ ΚΩΠΑΙΔΑΣ ΣΤΟ
ΠΛΑΙΣΙΟ ΕΝΟΣ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ**

**Α. Παναγόπουλος, Γ. Αραμπατζής, Ε. Τζιρίτης, Ι. Βρουχάκης, Κ.Α. Κασάπη,
Α.Α. Χρυσάφη, Σ. Σταθάκη, Α. Ζάβρα**

Ελληνικός Γεωργικός Οργανισμός – ΔΗΜΗΤΡΑ, Γενική Διεύθυνση Αγροτικής
Έρευνας, Ινστιτούτο Εγγείων Βελτιώσεων, 57400, Σίνδος, Ελλάδα,
panagopoulousa@gmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο πλαίσιο της ολοκληρωμένης διαχείρισης υδατικών πόρων στην περιοχή της Κωπαΐδας, σχεδιάστηκε και εγκαταστάθηκε ένα δίκτυο περιβαλλοντικής παρακολούθησης προκειμένου να αξιολογηθούν τα ποιοτικά χαρακτηριστικά διακριτών υδατικών συστημάτων. Η αξιολόγηση πραγματοποιήθηκε σε δείγματα νερού που ελήφθησαν από τα επιφανειακά ύδατα, την ακόρεστη ζώνη, καθώς και από την υπόγεια υδροφορία της περιοχής (προσχωματικός και καρστικός υδροφόρος). Διαπιστώθηκαν αυξημένες τιμές αμμωνιακών και νιτρικών ιόντων στην ακόρεστη ζώνη και στον προσχωματικό υδροφόρο, οι οποίες μεταβάλλονται ανάλογα με τις ιδιοσυνθήκες του συστήματος και τα οξειδοαναγωγικά του χαρακτηριστικά. Οι συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα, παρόλο που προκύπτει σχετικός εμπλουτισμός σε Ni και δευτερευόντως σε Mn, λόγω γηγενών αιτιών που σχετίζονται με το γεωλογικό υπόβαθρο.

**HYDROCHEMICAL AND ENVIRONMENTAL ASSESSMENT OF
WESTERN KOPAIDA PLAIN WATER SYSTEMS, IN THE
FRAMEWORK OF AN INTEGRATED ENVIRONMENTAL
MONITORING SYSTEM**

**A. Panagopoulos, G. Arampatzis, E. Tziritis, I. Vrouhakis, K.A. Kassapi,
A.A. Chrysafi, S. Stathaki, A. Zavra**

Hellenic Agricultural Organisation – DEMETER, General Directorate of
Research, Land Reclamation Institute, 57400, Sindos, Greece,
panagopoulousa@gmail.com

ABSTRACT

In the framework of integrated water resources management, an environmental monitoring system was compiled and implemented, in order to assess the water quality characteristics Kopaïda's plain water systems. The environmental evaluation was conducted by means of hydrochemical analyses of samples collected from the discrete water systems of the region: surface waters, vadose zone leachates and groundwater (alluvial and karstic aquifers). The results revealed elevated values for nitrates and ammonium in the vadose leachates and the alluvial aquifer. Heavy metal concentrations were in general low, except the Ni and Mn values that could be attributed to the impact of geological substrate.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

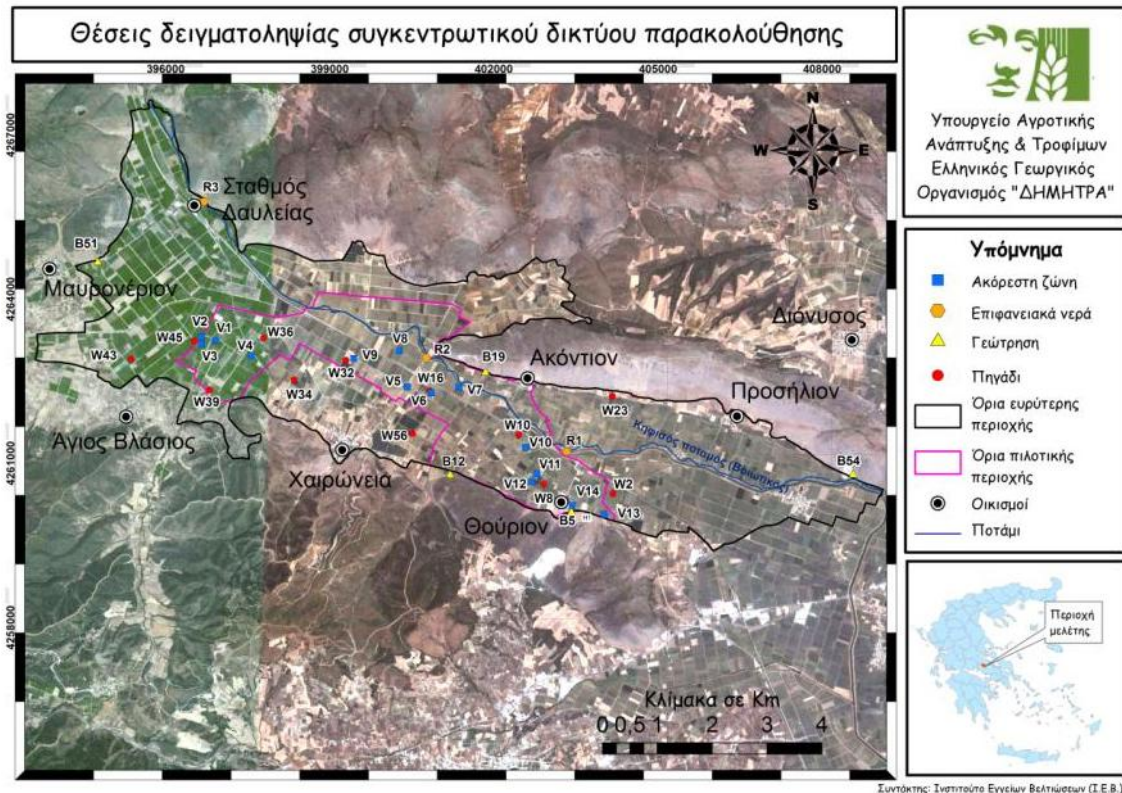
Η περιοχή μελέτης αποτελεί τμήμα της μείζονος λεκάνης του Κωπαϊδικού πεδίου (Σχήμα 1), στην οποία κυριαρχούν εντατικές αγροτικές δραστηριότητες κατά τις τελευταίες δεκαετίες. Οι δραστηριότητες αυτές σε συνδυασμό με τις εσφαλμένες συχνά αγροτικές πρακτικές, οδήγησαν κατά το παρελθόν σε αυξημένες συγκεντρώσεις επιβαρυντικών για το υδατικό περιβάλλον παραμέτρων, όπως οι αζωτούχες ενώσεις NO_3 και NH_4 (Tziritis, 2009).

Η γεωλογική δομή της περιοχής αποτελείται από σύγχρονες αλλουβιακές αποθέσεις με σημαντικό κατά τόπους πάχος (Allen, 1986), ως αποτέλεσμα του περιοδικού λιμναίου χαρακτήρα που διατηρούσε η περιοχή της Κωπαΐδας μέχρι και τις αρχές του προηγούμενου αιώνα. Το υποκείμενο γεωλογικό υπόβαθρο (Παγούνης κ.α., 1994; Tziritis, 2008), περιλαμβάνει μια ανθρακική ακολουθία από ασβεστόλιθους, ενίοτε δολομιτωμένους (ή και καθαρούς δολομίτες) στα κατώτερα στρώματα (Τριαδικό) και συχνά καρστικοποιημένους (Ιουρασικοί και κυρίως Κρητιδικοί ασβεστόλιθοι) στα ανώτερα τμήματα. Μεταξύ της ανθρακικής ακολουθίας παρεμβάλλεται ένας σχιστοκερατολιθικός σχηματισμός με υπερβασικά τεμάχια (κυρίως σερπεντινίτες), γνωστός και ως σχιστοκερατολιθική διάπλαση. Υδρογεωλογικά η περιοχή χαρακτηρίζεται από δυο βασικούς υδροφόρους, που πολλές φορές συνδέονται υδραυλικά. Ο ανώτερος εξ' αυτών αναπτύσσεται εντός των αλλουβιακών αποθέσεων, ενώ ο κατώτερος εντός της μεγάλης καρστικής μάζας του υποβάθρου με κυμαινόμενες τιμές πιεζομετρικής στάθμης (Παγούνης κ.α., 1994).

Ο στόχος της παρούσης εργασίας είναι η καταγραφή των ποιοτικών χαρακτηριστικών των υδατικών συστημάτων της περιοχής, ως αποτέλεσμα των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων και των φυσικών πηγών εμπλουτισμού. Τα αποτελέσματα χρησιμοποιήθηκαν για την ελάττωση των εισροών (ανόργανες και οργανικές ουσίες) που προκύπτουν από τις αγροτικές δραστηριότητες στην περιοχή της Δ. Κωπαΐδας, μέσω της ορθολογικής λίπανσης και των βέλτιστων δυνατών καλλιεργητικών πρακτικών. Συγκεκριμένα, οι συγκεντρώσεις υποβάθρου αποτέλεσαν τον κατευθυντήριο άξονα για το στρατηγικό σχεδιασμό των διαφόρων δράσεων και βοήθησαν στην κατανόηση της περιβαλλοντικής ποιοτικής κατάστασης των διαφόρων υδατικών συστημάτων που αλληλεπιδρούν.

2. ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΕΣ – ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

Συνολικά ελήφθησαν δείγματα από 34 θέσεις που περιλάμβαναν τα βασικά υδατικά συστήματα της περιοχής, ήτοι τους υδροφόρους ορίζοντες (αβαθή προσχωματικό και βαθύ καρστικό), τον ποταμό Βοιωτικό Κηφισό, και τις διασταλλάξεις της ακόρεστης ζώνης (Σχήμα 1). Τα δείγματα της ακόρεστης ζώνης ελήφθησαν από το κατεισδύον νερό το οποίο συλλεγόταν μέσω ειδικής διάταξης που βρισκόταν τοποθετημένη περίπου 40-60cm κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Η διάταξη περιλάμβανε την τοποθέτηση ενός διάτρητου κεκλιμένου σωλήνα σε βάθος περίπου 60 cm κάτω από το έδαφος επενδεδυμένου με φίλτρο χαλκιού, ο οποίος στο χαμηλότερο τμήμα του συγκέντρωνε το κατεισδύον νερό εντός κατακόρυφου συνδεδεμένου σωλήνα. Οι διασταλλάξεις της ακόρεστης ζώνης, ειδικά σε τόσο μικρή απόσταση από την εδαφική επιφάνεια, θεωρούνται ως τα πλέον αντιπροσωπευτικά δείγματα για την εκτίμηση της ενδεχόμενης επίδρασης από τις αγροτικές δραστηριότητες, καθώς αποτελούν το άμεσο κατεισδύον κλάσμα του νερού που αποπλένει τους ανώτερους εδαφικούς ορίζοντες και στο οποίο δεν έχουν δράσει ακόμα (ή έχουν δράσει περιορισμένα) οι φυσικές διεργασίες που καθορίζουν την χημική του σύσταση. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν τρεις περίοδοι δειγματοληψίας (Απρίλιος, Ιούλιος και Σεπτέμβριος του 2009) που καθορίστηκαν με βάση την εφαρμογή



Σχήμα 1: Σημεία δειγματοληψίας του δικτύου περιβαλλοντικής παρακολούθησης

φυτοπροστατευτικών προϊόντων, αρδευτικών δόσεων και καλλιεργητικών φροντίδων και λαμβάνοντας υπόψη κατά το δυνατόν τις συνθήκες υγρής και ξηρής υδρολογικής περιόδου. Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο του Ινστιτούτου Εγγείων Βελτιώσεων (Ι.Ε.Β.) του Ελληνικού Γεωργικού Οργανισμού - Δήμητρα (ΕΛ.Γ.Ο.-Δήμητρα).

Συνολικά στο εργαστήριο προσδιορίστηκαν οι παράμετροι K και Na με φλογοφωτόμετρο SherwoodM410, οι παράμετροι Ca, Mg Fe και Zn με φασματοφωμετρία ατομικής απορρόφησης (AAS) με σύστημα ατομοποίησης καυστήρα, οι παράμετροι HCO₃ και Cl ογκομετρικά, οι παράμετροι NO₃, NH₄, SO₄ με φασματοφωτόμετρο Lambda 35 της PerkinElmer, και τέλος οι παράμετροι Mn, Ni, Pb, Cu με φασματοφωμετρία ατομικής απορρόφησης (AAS) με σύστημα ατομοποίησης εξαχνωτή θερμαινόμενου γραφίτη. Στο πεδίο μέσω φορητού πολυμέτρου προσδιορίστηκαν το pH και η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC). Για τον έλεγχο αξιοπιστίας των αναλύσεων συλλέχθηκαν και αναλύθηκαν διπλά δείγματα και υπολογίστηκε το επί τοις εκατό ιοντικό σφάλμα ισορροπίας (Appelo and Postma, 2005), όπου για το 95% των δειγμάτων ήταν κάτω από 10%. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1: Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία των αναλυτικών δεδομένων για τις 3 περιόδους δειγματοληψίας

		Ακόρεστη ζώνη			Προσχωματικός ΥΟ			Καρστικός ΥΟ			Επιφανειακά νερά		
		min	max	med	min	max	med	min	max	med	min	max	med
pH		7,0	7,6	7,4	6,9	7,3	7,2	7,1	7,4	7,2	7,4	7,5	7,4
E.C	μS/cm	390	1286	724	390	1251	972	472	781	575	453	498	495
K	mg/L	1,4	23,5	2,6	1	6	1	1	7	2	0,7	0,8	0,8
Na	mg/L	10	42	18	10	59	24	7	20	9	6	7	7
Ca	mg/L	80	191	133	80	182	124	85	129	113	85	89	86
Mg	mg/L	11	99	22	11	94	34	12	25	18	17	18	18
Cl	mg/L	7	54	25	7	58	37	14	35	23	13	18	14
HCO ₃	mg/L	232	461	320	232	464	403	281	378	317	256	287	281
SO ₄	mg/L	20	139	45	20	256	106	7	51	24	14	16	16
NO ₃	mg/L	5	89	26	5	83	53	11	71	23	8	9	9
NH ₄	mg/L	0,3	7,5	2,0	0,1	1,9	0,2	0,1	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2
Fe	μg/L	107	9236	267	33	221	74	28	122	61	48	118	57
Cu	μg/L	7	33	13	3	16	5	1	5	4	2	7	3
Zn	μg/L	56	357	116	56	315	113	22	119	94	21	74	34
Mn	μg/L	9	1134	28	1	956	18	3	9	6	18	479	35
Ni	μg/L	6	196	16	2	92	11	3	28	7	2	23	5
Pb	μg/L	3	24	7	2	7	3	2	3	2	2	3	2

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΣΥΖΗΤΗΣΗ

3.1 ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΑ ΝΕΡΑ

Η εκτίμηση της ποιοτικής κατάστασης των επιφανειακών δειγμάτων νερού μπορεί να είναι μόνο ενδεικτική, καθώς ο αριθμός των τριών θέσεων δειγματοληψίας είναι μικρός για να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα. Σε αυτό το πλαίσιο, τα ενδεικτικά δείγματα επιφανειακού νερού έδειξαν ότι η ποιοτική κατάσταση του Β. Κηφισού (κατά μήκος της περιοχής μελέτης) είναι ικανοποιητική, δεδομένου οι συγκεντρώσεις των περισσότερων παραμέτρων κυμαίνονται σε αναμενόμενα πλαίσια για τα φυσικά νερά (Drever, 1997). Οι διάμεσες τιμές των αζωτούχων ενώσεων (NO₃ και NH₄) βρίσκονται σε χαμηλά επίπεδα (9 mg/L και 0,2 mg/L αντίστοιχα) γεγονός που υποδηλώνει την απουσία επιδράσεων από τις αγροτικές δραστηριότητες με τις οποίες μπορούν κυρίως να σχετισθούν, ή/και τη σπουδαιότητα των ζωνών τροφοδοσίας των επιφανειακών υδάτων από περιοχές απαλλαγμένες από ανθρωπογενείς δραστηριότητες (περιβάλλουσα ορεινή ζώνη). Ορισμένες μεμονωμένες αυξημένες τιμές βαρέων μετάλλων (π.χ. 479 μg/L Mn και 23 μg/L Ni), δεν παρουσιάζουν καμία επαναληψιμότητα και θεωρούνται ως τυχαία συμβάντα, που δεν μπορούν να αποδοθούν σε συγκεκριμένα φυσικά και ανθρωπογενή αίτια.

3.2 ΑΚΟΡΕΣΤΗ ΖΩΝΗ

Οι διασταλλάξεις της ακόρεστης ζώνης, αποτελούν το πλέον αντιπροσωπευτικό δείγμα για την εκτίμηση της ενδεχόμενης επίδρασης από τις αγροτικές δραστηριότητες, καθώς αποτελούν το άμεσο κατεισδύον κλάσμα του νερού που αποπλένει τους

ανώτερους εδαφικούς ορίζοντες. Παρόλο που δεν αποτελεί ένα υδατικό σώμα με την κλασική υδρογεωλογική έννοια, εντούτοις σχηματοποιεί ένα ιδιότυπο υδατικό σύστημα, του οποίου τα ποιοτικά χαρακτηριστικά είναι ιδιαίτερα κρίσιμα.

Με βάση τις αναλύσεις και τα περιγραφικά τους στατιστικά (Πίνακας 1) παρατηρείται ένα εμπλουτισμός της ακόρεστης ζώνης σε Ca, απόρροια της ισχυρής επίδρασης του ασβεστολιθικού υποβάθρου (Ammiote-Suchet and Probst, 1993). Οι διάμεσες τιμές των συγκεντρώσεων των νιτρικών ιόντων βρίσκονται σε χαμηλά επίπεδα (26 mg/L). Αντίθετα, ιδιαίτερα αυξημένες είναι οι τιμές των αμμωνιακών (2 mg/L), υπερβαίνοντας κατά πολύ το αντίστοιχο όριο ποσιμότητας (0,5 mg/L) της Council Directive 98/83/EC (1998). Παρόλο που η συσχέτιση τιμών στραγγισμάτων της ακόρεστης ζώνης με όρια που αναφέρονται σε ποσιμότητα είναι αδόκιμη, εντούτοις παρέχεται μια σημαντική πληροφορία σχετικά με τα αρχικά ποιοτικά χαρακτηριστικά του δυνητικού ρυπαντικού φορτίου, το οποίο εν δυνάμει μπορεί να καταλήξει στον υπόγειο υδροφόρο. Η αναντιστοιχία που προκύπτει μεταξύ του εμπλουτισμού σε NO_3 και NH_4 , οφείλεται στις ιδιαίτερες οξειδοαναγωγικές συνθήκες της ακόρεστης ζώνης, όπου η περίσσεια οργανικής ύλης ευνοεί την επικράτηση των αμμωνιακών έναντι των νιτρικών ιόντων, τουλάχιστον για τα ανώτερα εδαφικά στρώματα στα οποία είναι περιορισμένος ο αερισμός. Αξιοσημείωτη είναι και η διάμεση τιμή του Ni (16 $\mu\text{g/L}$), όπου δείχνει ένα σχετικό εμπλουτισμό λόγω της επίδρασης των λατεριτικών οριζόντων και των οφιολιθικών θραυσμάτων της σχιστοκερατολιθικής διάπλασης.

Προκειμένου να εξαχθούν διακριτές σχέσεις και συσχετίσεις μεταξύ των παραμέτρων, πραγματοποιήθηκε στατιστική επεξεργασία (Πίνακας 2) που περιλάμβανε τη διεξαγωγή ανάλυσης συσχέτισης (correlation analysis) και την κατ' επέκταση εξαγωγή συντελεστών συσχέτισης (Pearson correlation coefficients) για τις παραμέτρους που παρουσίαζαν αξιοσημείωτη διακύμανση.

Ως ισχυρές θετικές ή αρνητικές συσχετίσεις θεωρήθηκαν όσες είναι $> + 0.7$ ή $< - 0.7$ αντίστοιχα, ενώ ως μέτριες $0.5 < r < 0.7$ και $-0.7 < r < -0.5$ (Liu at al., 2003). Από τα δεδομένα του πίνακα 2 προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα.:

Οι ισχυρές θετικές συσχετίσεις για τα ζεύγη παραμέτρων EC-Na, EC-Ca, EC-Cl και EC-SO₄ υποδηλώνουν αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας με την παράλληλη αύξηση της συγκέντρωσης των αλάτων στο δείγμα. Συμπληρωματικά στο παραπάνω συμπέρασμα δρουν και οι ισχυρές θετικές συσχετίσεις για τα ζεύγη Na-Mg, Na-Cl, Na-SO₄, Ca-SO₄, Ca-Cl και Cl-SO₄. Επειδή η περίπτωση της υφαλμύρισης θα πρέπει να αποκλεισθεί (δεν προκύπτουν τέτοια δεδομένα από την υδρογεωλογία και τη σχετική θέση της περιοχής με την θάλασσα), θα πρέπει η αιτία της σχετικά αυξημένης αλατότητας ορισμένων δειγμάτων να αποδοθεί σε άλλους παράγοντες, όπως π.χ. στην ύπαρξη συγγεντικού νερού (connate water) ή/και στον εμπλουτισμό των υδροφόρων με νερό το οποίο, αντλείται αρχικά και επανέρχεται στο σύστημα μέσω άρδευσης με αυξημένη κάθε φορά αλατότητα.

- Οι μέτριες θετικές συσχετίσεις για τα ζεύγη παραμέτρων Fe-Cu, Fe-Ni, Cu-Zn, Cu-Mn, Cu-Ni, Cu-Cd, Mn-Ni, Mn-Cd και Ni-Cd σχετίζονται με τους υπερβασικούς σχηματισμούς του γεωλογικού υποβάθρου και συγκεκριμένα της σχιστοκερατολιθικής διάπλασης. Η δε ισχυρή θετική συσχέτιση μεταξύ Fe-Mn αποδίδει την έκπλυση των Fe-Mn οξειδίων που βρίσκονται στους ανώτερους εδαφικούς ορίζοντες.
- Οι μέτριες αρνητικές συσχετίσεις μεταξύ Ca-Mn και Ca-Ni ερμηνεύουν την ανταγωνιστική σχέση του ασβεστολιθικού υποβάθρου με τη διάπλαση που εμπεριέχει τους πλούσιους σε Mn και Ni υπερβασικούς σχηματισμούς. Επίσης, η μέτρια αρνητική συσχέτιση μεταξύ Mn-SO₄ είναι χαρακτηριστική της επίδρασης των αναγωγικών συνθηκών που σημειώνονται στους βαθύτερους ορίζοντες, καθώς

Πίνακας 2: Μήτρα παραμέτρων της ανάλυσης συσχέτισης

	<i>pH</i>	<i>E.C</i>	<i>K</i>	<i>Na</i>	<i>Ca</i>	<i>Mg</i>	<i>Cl</i>	<i>HCO3</i>	<i>SO4</i>	<i>NO3</i>	<i>NH4</i>	<i>Fe</i>	<i>Cu</i>	<i>Zn</i>	<i>Mn</i>	<i>Ni</i>	<i>Pb</i>	<i>Cd</i>
pH	1																	
E.C	-0,33	1,00																
K	0,09	-0,10	1,00															
Na	-0,26	0,89	-0,07	1,00														
Ca	-0,45	0,72	0,13	0,69	1,00													
Mg	-0,21	0,67	-0,42	0,72	0,39	1,00												
Cl	-0,37	0,85	0,02	0,85	0,71	0,47	1,00											
HCO3	-0,13	0,60	-0,20	0,67	0,38	0,71	0,50	1,00										
SO4	-0,47	0,79	-0,22	0,87	0,71	0,62	0,80	0,64	1,00									
NO3	0,02	-0,05	-0,02	0,01	0,00	-0,02	-0,10	-0,07	0,00	1,00								
NH4	-0,06	0,11	-0,14	0,11	0,02	0,16	-0,01	0,19	0,08	-0,42	1,00							
Fe	0,03	-0,56	-0,02	-0,56	-0,57	-0,22	-0,47	-0,20	-0,54	0,07	0,12	1,00						
Cu	0,24	-0,35	0,26	-0,24	-0,30	-0,16	-0,26	-0,03	-0,34	-0,05	0,37	0,61	1,00					
Zn	0,13	-0,05	0,32	-0,06	-0,13	-0,22	0,01	0,14	-0,19	-0,07	0,28	0,40	0,76	1,00				
Mn	0,14	-0,59	-0,07	-0,61	-0,65	-0,21	-0,54	-0,25	-0,61	0,00	0,23	0,94	0,62	0,33	1,00			
Ni	0,33	-0,40	0,12	-0,42	-0,61	-0,32	-0,23	-0,27	-0,56	-0,14	0,08	0,56	0,62	0,51	0,67	1,00		
Pb	0,13	0,04	0,07	-0,13	-0,25	-0,10	-0,04	-0,37	-0,33	0,46	-0,20	0,26	0,12	0,12	0,31	0,41	1,00	
Cd	0,37	-0,36	0,33	-0,28	-0,37	-0,13	-0,22	0,01	-0,40	0,07	0,08	0,53	0,62	0,48	0,57	0,58	0,10	1

κάτω από αναγωγικές συνθήκες (παρουσία H_2S) υφίσταται εμπλουτισμός σε Mn ($Mn^{4+} \rightarrow Mn^{2+}$), ενώ αντίθετα κάτω από οξειδωτικές συνθήκες καταγράφεται ελάττωσή του Mn και δημιουργία SO_4 .

- Αξιοσημείωτο είναι ότι από την ανάλυση δεν προκύπτει συσχέτιση των αζωτούχων ενώσεων καθώς και του Pb με οποιαδήποτε άλλη παράμετρο. Μια πιθανή ερμηνεία είναι ότι οι διακυμάνσεις των NO_3 και NH_4 δεν ακολουθούν καμία συσχέτιση με άλλες παραμέτρους γιατί οφείλονται αποκλειστικά στην εφαρμοζόμενη λίπανση. Η δε έλλειψη συσχέτισης μεταξύ τους (NO_3-NH_4) οφείλεται στο ότι τα NH_4 αποτελούν ένα μετασταθή και ευμετάβλητο ρύπο ο οποίος στις αερόβιες συνθήκες της ακόρεστης ζώνης σταδιακά μετατρέπεται σε NO_3 εξαρτώμενος άμεσα από τις οξειδοαναγωγικές συνθήκες (Bohlke et al., 2006).

3.3 ΠΡΟΣΧΩΜΑΤΙΚΟΣ ΥΔΡΟΦΟΡΟΣ ΟΡΙΖΟΝΤΑΣ

Ο προσχωματικός υδροφόρος αποτελεί τον άμεσο αποδέκτη όλων των δυνητικών ρύπων που απελευθερώνονται σε κάποιο σημείο της επιφάνειας, και των οποίων η συσσωρευτική δράση λειτουργεί αθροιστικά δημιουργώντας περιβαλλοντικές οχλήσεις. Τα όρια του προσχωματικού υδροφόρου εκτείνονται πέραν των επιφανειακών ορίων της ευρύτερης και πιλοτικής περιοχής μελέτης, συνεπώς τα υδρογεωχημικά και ποιοτικά του χαρακτηριστικά είναι αποτέλεσμα των χρήσεων γης και των δραστηριοτήτων της ευρύτερης περιοχής. Με βάση τον πίνακα 1 μπορούν να εξαχθούν συνοπτικά οι εξής σημαντικές παρατηρήσεις:

Η επίδραση των ασβεστολιθικών σχηματισμών είναι εμφανής, καθώς σημειώνεται εμπλουτισμός σε Ca με παράλληλα σχετικά αυξημένη διάμεση τιμή HCO_3 , σύμφωνα με την αντίδραση $CaCO_3 + H_2O + CO_2 \rightarrow Ca^{2+} + 2HCO_3^-$ (Schwartz and Zhang, 2003) που υποδηλώνει την σαφή επίδραση των διεργασιών καρστικοποίησης.

Οι τιμές των νιτρικών ιόντων είναι υψηλές (med: 53 mg/L) υποδηλώνοντας την σαφή επίδραση των αγροτικών δραστηριοτήτων. Αντίθετα οι συγκεντρώσεις των NH_4 παρουσιάζουν ελάττωση, σε σχέση με αυτές τις ακόρεστης ζώνης. Παρατηρείται συνεπώς μια επικράτηση των νιτρικών έναντι των αμμωνιακών ιόντων (το αντίστροφο ίσχυε στην ακόρεστη ζώνη) η οποία οφείλεται προφανώς σε οξειδοαναγωγικά αίτια και είναι η αναμενόμενη λόγω προοδευτικής οξείδωσης των αμμωνιακών ιόντων σε νιτρικά εντός της ζώνης αερισμού της ακόρεστης και της κορεσμένης ζώνης του προσχωματικού υδροφορέα. Τα βαρέα μέταλλα κυμαίνονται εντός των αναμενόμενων πλαισίων για τα φυσικά νερά (Drever, 1997). Ορισμένες ακραίες υψηλές τιμές (Mn, Ni) οφείλονται σε τοπικές επιδράσεις, κυρίως από τους γεωλογικούς σχηματισμούς που σχετίζονται με τη διάπλαση και δεν έχουν γενικευμένο χαρακτήρα. Τέλος, η καταγραφή ορισμένων αυξημένων (>250 mg/L) έναντι των υπολοίπων τιμών SO_4 , πιθανότατα αποδίδεται στην οξείδωση του σιδηροπυρίτη που υπάρχει εν αφθονία στα ιζήματα της περιοχής (Tziritis, 2009).

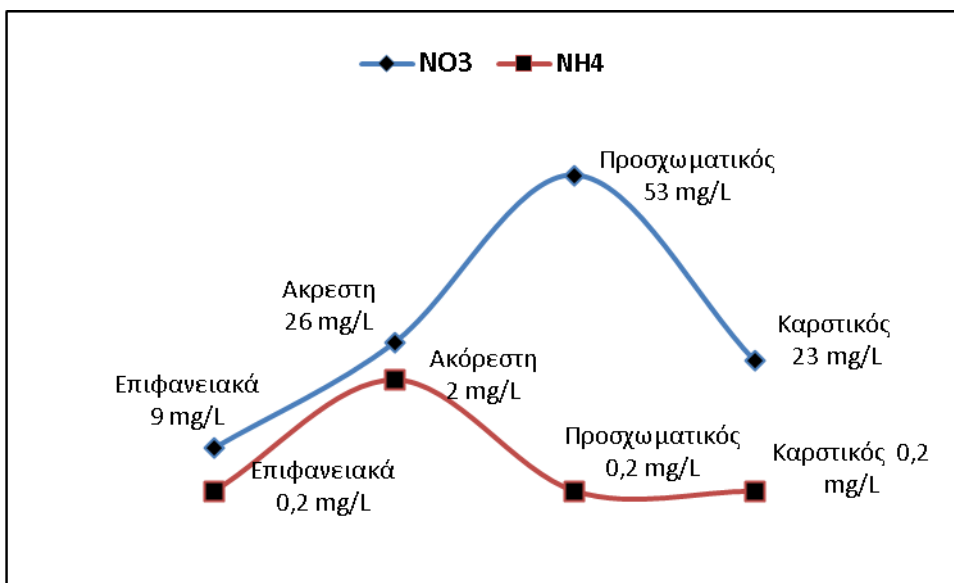
3.4 ΚΑΡΣΤΙΚΟΣ ΥΔΡΟΦΟΡΟΣ ΟΡΙΖΟΝΤΑΣ

Η ποιοτική κατάσταση του καρστικού ορίζοντα μπορεί να εκτιμηθεί μόνο ενδεικτικά, καθώς όπως και στην περίπτωση των επιφανειακών νερών ο συνολικός αριθμός των δειγμάτων (5) προς αξιολόγηση είναι μικρός. Σε αυτό το πλαίσιο, τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του καρστικού υδροφόρου είναι αρκετά ικανοποιητικά, καθώς δεν διαφαίνεται η έντονη επιβάρυνση σε νιτρικά ιόντα που παρατηρείται στον υπερκείμενο προσχωματικό υδροφόρο. Οι διάμεσες τιμές τόσο των νιτρικών όσο και

των αμμωνιακών ιόντων είναι σχετικά χαμηλές (23 και 0,2 mg/L αντίστοιχα), με ελάχιστες βέβαια εξαιρέσεις (π.χ. max τιμή NO_3) που σχετίζονται πιθανόν με καθαρά τοπικά φαινόμενα ή/και με σημειακές πηγές ρύπανσης. Τα γενικότερα χαρακτηριστικά του καρστικού υδροφόρου (μεγάλες ταχύτητες ροής, μεγάλες ποσότητες που μεταγγίζονται από τα ανάντη, καλή οξυγόνωση κτλ) είναι τέτοια που μεγιστοποιούν ορισμένες διεργασίες φυσικής προστασίας, καθιστώντας την ποιοτική του κατάσταση ικανοποιητική. Αυτή ακριβώς είναι και η αιτία ελάττωσης των συγκεντρώσεων όλων περίπου των παραμέτρων που προσδιορίστηκαν (έναντι των υπολοίπων υδατικών συστημάτων).

3.5 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Η συγκριτική αξιολόγηση των υδατικών συστημάτων, στη λογική της κατακόρυφης αλληλουχίας, έχει ως στόχο την διερεύνηση των πιθανών τάσεων που προκύπτουν στις συγκεντρώσεις των διαφόρων παραμέτρων, ως αποτέλεσμα της συνδυαστικής δράσης των ανθρωπογενών και φυσικών διεργασιών. Η αξιολόγηση αυτή, σκοπεύει να δώσει μια γενική εποπτική εικόνα των τάσεων, καθώς οι ακριβέστερες εκτιμήσεις θα απαιτούσαν περαιτέρω πληροφορίες που θα αφορούσαν την σχετική χωρική διασπορά τους. Υπό αυτό το πρίσμα, και λαμβανομένου υπόψη ότι η κυρίαρχη κατηγορία ρύπων, λόγω των χρήσεων γης και των αναλυτικών δεδομένων, είναι οι αζωτούχες ενώσεις (NO_3 , NH_4), έγινε εστίαση στην μεταβολή των συγκεντρώσεών τους (διάμεση τιμή των αναλύσεων των 3 περιόδων) κατά υδατικό σύστημα, που συνεπάγεται και μεταβολή κατά βάθος, σύμφωνα με την αλληλουχία επιφανειακά νερά → ακόρεστη ζώνη → προσχωματικός ΥΟ → καρστικός ΥΟ.



Σχήμα 2: Μεταβολή συγκεντρώσεων (διάμεσες τιμές τριών περιόδων δειγματοληψίας) αζωτούχων ενώσεων (NO_3 , NH_4) κατά υδατικό σύστημα και βάθος.

Σύμφωνα με το σχήμα 2, παρατηρείται μικρό δυνητικό ρυπαντικό φορτίο αζωτούχων ενώσεων στα επιφανειακά νερά, συνεπώς διαφαίνεται ότι η διεργασία της επιφανειακής απορροής στον υδάτινο αποδέκτη του Βοιωτικού Κηφισού είναι μειωμένη, ή η τροφοδοσία των επιφανειακών νερών από πηγές εκτός αγροτικών δραστηριοτήτων

είναι ιδιαίτερα σημαντική. Αντιθέτως, η κατακόρυφη κατείσδυση του δυνητικού ρυπαντικού φορτίου των αζωτούχων είναι εμφανής με την αύξηση των NO_3 , αλλά κυρίως των NH_4 , που σημειώνουν σημαντικά μεγαλύτερη αύξηση σε σχέση με τα νιτρικά. Η ισορροπία αυτή μεταβάλλεται με το βάθος και συγκεκριμένα με την αλλαγή των οξειδοαναγωγικών συνθηκών. Έτσι, από τις ανοξικές συνθήκες που επικρατούν στα πλούσια με οργανικό υλικό εδάφη της ακόρεστης ζώνης (όπου δίνουν αυξημένες συγκεντρώσεις NH_4), μεταβαίνουμε στις αυξημένες συγκεντρώσεις NO_3 στην κορεσμένη ζώνη του προσχωματικού υδροφόρου, λόγω οξείδωσης των αμμωνιακών ιόντων προς νιτρικά που βρίσκονται εν σχετική αφθονία στους ανώτερους εδαφικούς ορίζοντες. Ενδέχεται ωστόσο η αυξημένη συγκέντρωση στην εδαφική ακόρεστη ζώνη να είναι αποτέλεσμα της χρήσης λιπασμάτων αμμωνιακής μορφής. Παρατηρούμε συνεπώς ότι προκύπτει σαφής επίδραση και αλληλεξάρτηση μεταξύ των αυξημένων συγκεντρώσεων αμμωνιακών ιόντων της ακόρεστης και των νιτρικών ιόντων του προσχωματικού υδροφόρου. Η όλη διεργασία είναι άμεσα εξαρτώμενη και από άλλους παράγοντες, όπως η μικροβιολογική δραστηριότητα. Τέλος, λόγω κυρίως της διεργασίας της αραίωσης, αλλά πιθανόν και εξαιτίας των υπολοίπων φυσικών μηχανισμών εξασθένησης ρύπων (π.χ. αραίωση ρύπων σε όγκους νερού προερχόμενους από την ορεινή ζώνη υπό μορφή υπόγειων πλευρικών μεταγγίσεων τροφοδοσίας και οι οποίοι είναι απαλλαγμένοι από ανθρωπογενείς ρύπους), οι συγκεντρώσεις των NO_3 ελαττώνονται σημαντικά στον καρστικό υδροφόρο. Οι καλές συνθήκες αερισμού της κορεσμένης καρστικής ζώνης, διατηρούν επίσης τις συγκεντρώσεις NH_4 σε χαμηλά επίπεδα.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η περιβαλλοντική παρακολούθηση των υδατικών συστημάτων της Δυτικής Κωπαΐδας, κατέγραψε την επιβάρυνση η οποία προκύπτει εξαιτίας των αγροτικών δραστηριοτήτων στην περιοχή. Συγκεκριμένα, διαπιστώθηκαν αυξημένες τιμές αμμωνιακών και νιτρικών ιόντων στην ακόρεστη ζώνη και στον προσχωματικό υδροφόρο, οι οποίες μεταβάλλονται ανάλογα με τις ιδιοσυνθήκες του συστήματος και συγκεκριμένα με τα οξειδοαναγωγικά του χαρακτηριστικά. Οι συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα, παρόλο που διαφαίνεται να προκύπτει ένας σχετικός εμπλουτισμός σε Ni και δευτερευόντως σε Mn , λόγω γηγενών αιτιών που σχετίζονται με το γεωλογικό υπόβαθρο. Εμμέσως, επιβεβαιώνεται η ύπαρξη αναγωγικών συνθηκών στην περιοχή, λόγω αυξημένης οργανικής ουσίας στα ιζήματα της πρώην λίμνης της Κωπαΐδας. Το γεγονός αυτό αποτελεί ρυθμιστικό παράγοντα, τόσο για το είδος των αζωτούχων ενώσεων που αποτελούν το δυνητικό ρυπαντικό φορτίο, όσο και για τις σχετικές τους συγκεντρώσεις. Από την αξιολόγηση των αναλυτικών δεδομένων του υπόγειου υδατικού δυναμικού, ο καρστικός υδροφόρος χαρακτηρίζεται ως καλής ποιότητας, εν αντιθέσει με τον προσχωματικό υδροφόρο που εμφανίζεται ποιοτικά υποβαθμισμένος λόγω της αυξημένης συγκέντρωσης νιτρικών. Είναι προφανής η ευεργετική δράση της ακόρεστης ζώνης δια της οποίας συγκρατείται σημαντικός όγκος ρυπογόνου φορτίου. Είναι επίσης προφανής η ύπαρξη σημαντικών διασταλλάξεων που τελικά καταλήγουν στην κορεσμένη προσχωματική υδροφορία προκαλώντας ποιοτική υποβάθμιση. Η ποιοτική κατάσταση του καρστικού υδροφόρου συστήματος προκύπτει υψηλή, γεγονός το οποίο θα πρέπει να αποδοθεί τόσο στην προστασία που προσφέρεται από το υπερκείμενο προσχωματικό σύστημα και την ακόρεστη ζώνη, όσο και από τους βασικούς μηχανισμούς υδροδυναμικής του λειτουργίας και εξέλιξης. Σε κάθε περίπτωση, η ανάλυση των υδροχημικών

χαρακτηριστικών των υδατικών συστημάτων της περιοχής μελέτης υποδηλώνουν ένα ευαίσθητο σε ρύπανση σύστημα.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια υλοποίησης του προγράμματος Life + ECOPEST με συγχρηματοδότηση του Ευρωπαϊκού Ταμείου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Allen H.D. 1986. *Late Quaternary of the Kopais Basin, Greece: Sedimentary and Environmental History*. PhD Thesis, University of Cambridge, p.282
- Ammiote-Suchet, P. and Probst, J. 1993. *Flux de CO₂ consommé par alteration chimique continentale: Influences du drainage et de la lithologie*. C.R. Academic Science, Paris, 317(II), p.615-622
- Appelo, C. and Postma, D. 2005. *Geochemistry, groundwater and pollution*. 2nd ed. A.A. Balkema Publishers, The Netherlands, p.649
- Bohlke, J.K., Smith, R.L., Miller, D.N., 2006. *Ammonium transport and reaction in contaminated groundwater: Application of isotope tracers and isotope fractionation studies*. Journal of Water Resource Research 42, p.1-19
- Council Directive 98/83/EC (1998) of 3 November on *the quality of the water intended for human consumption*. Off.J. European Community, L530, p.32-54, Brussels
- Drever, J. 1997. *The geochemistry of natural waters: Surface and groundwater environments*. Prentice-Hall, 3rd ed., p.436
- Tziritis, E., Kelepertsis, A., Stamatakis, M., 2008. *Hydrogeochemical and environmental conditions of the karstic system of the area Eastern Kopaida – Yliki*. Proceedings of 8th International Hydrogeological Conference of Greece, p.733-742
- Tziritis, E., 2009. *Groundwater and soil geochemistry of Eastern Kopaida region, (Beotia, central Greece)*. Central European Journal of Geosciences 1 (2): 219-226
- Παγούνης Μ., Γκέρτζος Θ., Γκατζογιάννης Α. (1994) *Υδρογεωλογική έρευνα λεκάνης Βοιωτικού Κηφισού*. Έκθεση ΙΓΜΕ, Αθήνα.σ.89

ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΡΥΠΩΝ ΜΕΣΑ ΣΕ ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟ ΠΟΡΩΔΕΣ ΜΕΣΟ**Χριστίνα Χ. Πλέγα, Βασίλειος Ε. Κατζουράκης,
Κωνσταντίνος Β. Χρυσικόπουλος**Εργαστήριο Τεχνολογίας του Περιβάλλοντος, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Πατρών**ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Αυτή η μελέτη παρουσιάζει μια μέθοδο προσδιορισμού της συγκέντρωσης συντηρητικών ιχνηθετών και ρύπων σε ένα δισδιάστατο γυάλινο μοντέλο δικτύων πόρων. Η μέθοδος περιλαμβάνει αρχικά την κατασκευή του γυάλινου δισδιάστατου μοντέλου δικτύων πόρων χρησιμοποιώντας μία φωτολιθογραφική μέθοδο. Στο γυάλινο δισδιάστατο μοντέλο πραγματοποιήθηκαν πειράματα μεταφοράς ρύπων, όπου πάρθηκαν ψηφιακές φωτογραφίες σε τακτά χρονικά διαστήματα κάτω από συνθήκες υπεριώδους και ορατού φωτός. Η συγκέντρωση των ρύπων στο δισδιάστατο χώρο καθορίστηκε με τη μέτρηση της έντασης του χρώματος σε κάθε φωτογραφία χρησιμοποιώντας ανάλυση εικόνας. Επομένως, η μέθοδος περιορίζεται σε ιχνηθέτες χρώματος ή φθορίζουσες διαλυμένες στο νερό ουσίες. Η μέθοδος υιοθετήθηκε επιτυχώς στον προσδιορισμό της συγκέντρωσης ουρανίνης και κόκκινου ιχνηθέτη.

DETERMINATION OF POLLUTANT CONCENTRATION IN A TWO-DIMENTIONAL POROUS MEDIUM**Christina C. Plega, Vasileios E. Katzourakis,
Constantinos V. Chrysikopoulos**Environmental Engineering Laboratory, Department of Civil Engineering,
University of Patras, Patras 26500, Greece**ABSTRACT**

This study presents a non-invasive imaging method for in situ concentration determination of conservative tracers and pollutants in a two-dimensional glass pore network model. The method consists of fabricating the glass pore network model using a photolithography technique, conducting flowthrough contaminant transport experiments, taking digital photographs at various times of the two-dimensional pore network under ultraviolet or visible light source, and determining the spatially-distributed pollutant concentrations by measuring the color intensity in the photographs with comparative image analysis. Therefore, the method is limited to fluorescent or colored pollutants and tracers. The method was successfully employed to in situ concentration determination of uranine and red color tracers.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

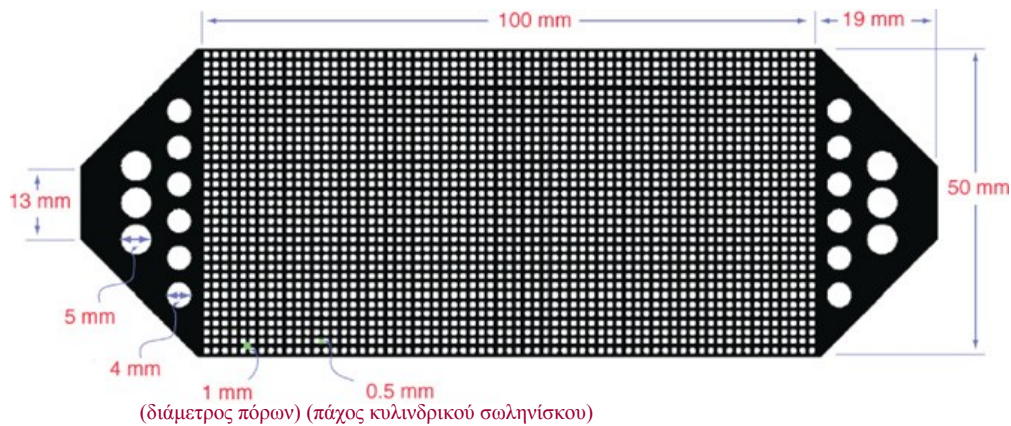
Τα τελευταία χρόνια έχουν δημιουργηθεί πολλές μέθοδοι απεικόνισης της μεταφοράς ρύπων σε πορώδες μέσο. Η πλειοψηφία των μεθόδων αυτών χρησιμοποιούν οπτική, μαγνητική τομογραφία και ακτίνες γάμμα. Μια εξαιρετική σύγκριση των διαφόρων μεθόδων απεικόνισης είναι διαθέσιμο από τους Werth et al. (2010). Συχνά χρησιμοποιούνται αντί των στηλών τα μικρομοντέλα που είναι διαπερατά δίκτυα πόρων και σημείων συγκέντρωσης και προσομοιάζουν κάποιες από τις πολυπλοκότητες των φυσικών πορωδών μέσων. Η παρατήρησή τους μπορεί να βελτιώσει την κατανόηση της ροής και της διαδικασίας μεταφοράς σε μικρής κλίμακας πορώδη μέσα, αναγνωρίζοντας και περιγράφοντας μηχανισμούς σε επίπεδο πόρων. Παρουσιάζονται στη βιβλιογραφία πολυάριθμες μελέτες με προσομοιώσεις ροής και μεταφοράς σε πορώδη μέσα, όπως σε μικρομοντέλα [Wan et al. (1996), Keller et al. (1997), Jia et al. (1999), Tsakiroglou et al. (2003), Sirivithayapakorn and Keller (2003), Theodoropoulou et al. (2003), Baumann and Werth (2004), Auset and Keller (2004), Willingham et al. (2008)] ή σε μονοδιάστατα μοντέλα με γυάλινα σφαιρίδια [Corapcioglu and Fedirchuk (1999), Chrysikopoulos and Vogler (2006), Jones and Smith (2005)].

Μια διαδικασία απεικόνισης κάτω από συνθήκες υπεριώδους ακτινοβολίας (UV) έχει αναφερθεί από τους Huang et al. (2002), προκειμένου να αξιολογήσουν την μεταφορά της φθορίζουσας ουσίας σε ένα διαφανές πλαστικό κουτί με γυάλινα σφαιρίδια, εσωτερικών διαστάσεων 18 X 28 X 1 cm. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε στηρίχτηκε στην ένταση της φθορίζουσας ουσίας κάτω από υπεριώδες φως, τη σύλληψη αυτής με μια φωτογραφική μηχανή και την μετατροπή από την εικόνα της έντασης σε συγκέντρωση της ουσίας. Η διαδικασία είναι απλή και ακριβής αλλά περιορίζεται για ιχνηθέτη φθορίζουσας ουσίας. Πρόσφατα αναπτύχθηκε μια νέα μέθοδος από τους Thomas and Chrysikopoulos (2010) για την ακριβή μέτρηση in situ ιχνηθετών και συγκεντρώσεων κολλοειδών σε συμπαγείς στήλες με γυάλινα σφαιρίδια. Ανά χρονικά διαστήματα πάρθηκαν ψηφιακές φωτογραφίες της στήλης κάτω από υπεριώδη πηγή φωτός, μετατρέποντας τις εντάσεις του φθορισμού του ιχνηθέτη ή των κολλοειδών σε συγκεντρώσεις. Η μέθοδος αυτή φαίνεται να είναι ακριβής, αλλά περιορίζεται σε μονοδιάστατες στήλες. Ο στόχος λοιπόν αυτής της έρευνας είναι να επεκτείνουμε τις εργασίες των Huang et al. (2002), and Thomas and Chrysikopoulos (2010) υπολογίζοντας τις συγκεντρώσεις κόκκινου ιχνηθέτη και ουρανίνης σε διδιάστατο μικρομοντέλο κάτω από συνθήκες ορατού και υπεριώδους φωτός.

2. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

2.1. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΙΚΡΟΜΟΝΤΕΛΟΥ

Το μικρομοντέλο (θαλάμων - λαιμών) δικτύων πόρων που χρησιμοποιήθηκε ήταν προσεκτικά σχεδιασμένο στο AutoCAD[®] και τυπώθηκε σε υψηλής ποιότητας διαφανές φύλλο. Το διαφανές αυτό δίκτυο πόρων, που φαίνεται στο Σχήμα 1, χρησιμοποιήθηκε ως "μάσκα" για την αποτύπωση του μοντέλου στο γυάλινο δοκίμιο. Ως εκ τούτου, οι σκοτεινές περιοχές στη μάσκα αντιπροσωπεύουν τους κενούς χώρους του μικρομοντέλου. Οι διαστάσεις των πόρων του δικτύου είναι $L_x=100$ mm σε μήκος και $L_y=50$ mm σε πλάτος. Η διάμετρος του κάθε σφαιρικού πόρου (θαλάμου) είναι 1 mm και το πλάτος του κυλινδρικού σωληνίσκου (λαιμού) που συνδέει τους πόρους σε μια τετράγωνη διάταξη πλέγματος είναι 0,5 mm. Τα μεγαλύτερα κενά στα δύο άκρα του μικρομοντέλου δημιουργήθηκαν ώστε να επιτυγχάνεται ομοιόμορφη κατανομή του εισερχόμενου και εξερχόμενου υδατικού διαλύματος στο πορώδες μέσο.



Σχήμα 1. Η "μάσκα" του μοντέλου δικτύων πόρων όπου οι σκούρες περιοχές αντιστοιχούν στα κενά του μικρομοντέλου.

Το μικρομοντέλο κατασκευάστηκε με την φωτολιθογραφική μέθοδο που αναπτύχθηκε από McKellar and Wardlaw (1982) με ορισμένες τροποποιήσεις που πρότειναν οι Vizika and Payatakes (1989), Avraam et al. (1994) και Avraam and Payatakes (1995). Δύο κομμάτια καθρέφτη με κατά προσέγγιση διαστάσεις 21 cm μήκος και 12 cm πλάτος είχαν τοποθετηθεί σε 600 mL απεσταγμένου νερού (sdH₂O) διάλυμα που περιέχει 200 g NaOH για χρονική περίοδο 24 h, προκειμένου να αφαιρεθεί το προστατευτικό στρώμα που κάλυπτε την επιφάνεια του χαλκού. Στη συνέχεια, οι καθρέπτες προσεκτικά πλύθηκαν με sdH₂O και τοποθετήθηκαν σε ένα σκοτεινό και χωρίς σκόνη δωμάτιο, όπου η κάθε επιφάνεια του χαλκού ψεκάστηκε με Positive Resist (Cramolin, Germany). Έπειτα, τοποθετήθηκαν οι καθρέπτες για 30 λεπτά σε φούρνο με θερμοκρασία 70 °C, ώστε να σταθεροποιηθεί η επίστρωση. Κάθε καθρέφτης ψύχθηκε και στη συνέχεια προσαρμόστηκε η "μάσκα" με το δίκτυο πάνω στη καλυμμένη από Positive Resist επιφάνεια. Οι καθρέπτες ήταν εκτεθειμένοι για 45 λεπτά στην υπεριώδη ακτινοβολία σε ένα αυτοσχέδιο μεγάλο ξύλινο δοχείο. Στη συνέχεια, οι καθρέπτες διατηρήθηκαν σε σκοτεινό δωμάτιο και τοποθετήθηκαν σε διάλυμα sdH₂O που περιέχει 7 g/L NaOH για λίγα λεπτά (<10 λεπτά) για να διαλυθεί το μη πολυμερισμένο Positive Resist και να εμφανιστεί το δίκτυο. Ο ακριβής χρόνος παραμονής στο διάλυμα καθορίστηκε με οπτική παρακολούθηση με κόκκινο φως (Philips darkroom lamp 230V). Αυτό ήταν το τελευταίο βήμα στο σκοτεινό θάλαμο. Στη συνέχεια, τα δοκίμια πλύθηκαν με sdH₂O και τοποθετήθηκαν σε διάλυμα HNO₃ (200 mL HNO₃ 65% σε 230 mL sdH₂O) για περίπου 10 δευτερόλεπτα, ώστε να διαλυθεί το τμήμα του χαλκού που δεν προστατεύεται από το Positive Resist. Στη συνέχεια εφόσον ξεπλύθηκαν με sdH₂O, θερμάνθηκε κεριά το οποίο απλώθηκε προσεκτικά στο δοκίμιο, ώστε να καλυφθεί η τριγύρω επιφάνεια του δοκιμίου που δεν θα χαρασσόταν. Επιπλέον κεριά τοποθετήθηκε στα τέσσερα άκρα του κάθε γυάλινου δοκιμίου, ώστε να σχηματίσουν ένα χοντρό τοίχωμα. Στη συνέχεια, 20 mL διαλύματος HF (παρασκευασμένο με 75 mL HF 90% σε 25 mL sdH₂O) κάλυψαν την επιφάνεια του κάθε γυάλινου δοκιμίου για 5 λεπτά. Το κάθε δοκίμιο πλύθηκε με άφθονο sdH₂O και το κεριά αφαιρέθηκε προσεκτικά. Στη συνέχεια, τα γυάλινα δοκίμια είχαν τοποθετηθεί σε διάλυμα HNO₃ έως ότου απομακρυνθεί ο χαλκός από αυτά και γίνουν διάφανα. Στη συνέχεια, πλύθηκαν με sdH₂O. Πριν από την πυροσυσσωμάτωση δημιουργήθηκαν δύο οπές τρυπώντας προσεκτικά το ένα από τα δύο γυάλινα δοκίμια που είναι χαραγμένα, προκειμένου να δημιουργηθούν τα απαραίτητα ανοίγματα εισόδου και εξόδου του μικρομοντέλου. Τέλος, το επιθυμητό δισδιάστατο μικρομοντέλο κατασκευάστηκε έπειτα από τη

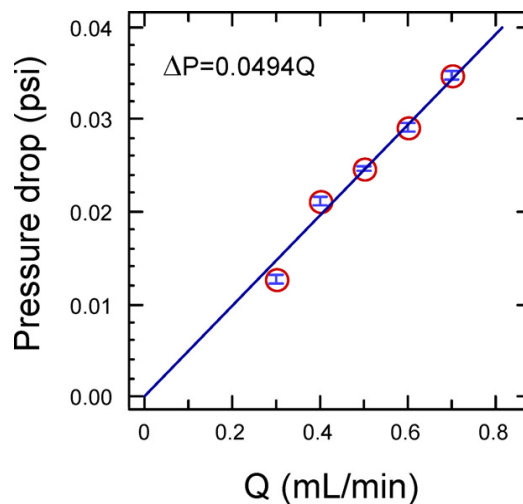
πυροσυσσωμάτωση δύο χαραγμένων γυάλινων δοκιμίων σε προγραμματιζόμενο φούρνο. Η χρονική μεταβολή της θερμοκρασίας ήταν η ακόλουθη: 2 min στους 40 °C, 6 h στους 400 °C, 2 h στους 500 °C, 2 h στους 600 °C, 30 min στους 690 °C, και 30 min στους 600 °C.

Το πορώδες, ο όγκος των κενών, το βάθος χάραξης και η επιφάνεια διατομής του μικρομοντέλου αναφέρονται στον Πίνακα 1. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι τιμή του βάθους χάραξης που εμφανίζεται στον Πίνακα 1 είναι μια βελτιστοποιημένη ως προς μέση τιμή, διότι η τεχνική κατασκευής του μικρομοντέλου δεν εγγυάται ένα χωρικά ομοιόμορφο βάθος.

Πίνακας 1. Παράμετροι του μοντέλου δικτύων πόρων.

Παράμετρος	Σύμβολο	Τιμή
Μήκος	L_x	10 cm
Πλάτος	L_y	5 cm
Πορώδες	θ	59.2%
Βάθος χάραξης	L_p	390.2 μm
Όγκος κενών	V_p	1.184 cm^3
Επιφάνεια διατομής	A_m	$1.95 \times 10^{-5} \text{m}^2$
Απόλυτη διαπερατότητα	k	$2.23 \times 10^{-10} \text{m}^2$

Η απόλυτη διαπερατότητα, k [L^2], του μικρομοντέλου καθορίστηκε έπειτα από τη διεξαγωγή πειραμάτων ροής με sdH_2O σε διάφορες παροχές, Q [L^3/t], και μετρώντας την πτώση πίεσης, ΔP [$\text{M}/(\text{t}^2\text{L})$], σε όλο το μήκος του μικρομοντέλου με αισθητήρες πίεσης.



Σχήμα 2. Διάγραμμα συσχέτισης της πίεσης σε συνάρτηση με τη παροχή σε συνθήκες μόνιμης κατάστασης.

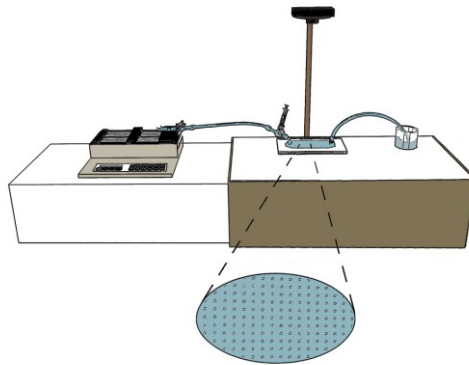
Τα πειραματικά αποτελέσματα για πέντε διαφορετικές τιμές Q απεικονίζονται στο Σχήμα 2. Η τιμή της διαπερατότητας k του μικρομοντέλου καθορίστηκε σύμφωνα με το νόμο του Darcy (Bear, 1972):

$$Q = -A_m \left(\frac{k \gamma_w}{\mu_w} \right) \frac{\Delta h}{\Delta x} \Rightarrow k = -\mu_w \frac{\Delta x}{A_m} \left(\frac{Q}{\Delta P} \right) \quad (2.1)$$

όπου $A_m = L_y \times L_p$ [L^2] είναι η επιφάνεια διατομής του μικρομοντέλου (L_p [L] είναι το βάθος χάραξης του μικρομοντέλου), γ_w [$M / (t^2 L^2)$] είναι το ειδικό βάρος του ενδοπορώδους υγρού, μ_w [$M / (t L)$] είναι το δυναμικό ιξώδες του ενδοπορώδους υγρού, $\Delta h = \Delta P / \gamma_w$ [L] είναι η διαφορά πίεσης στα άκρα του μικρομοντέλου και $\Delta x = L_x$ [L] είναι το μήκος του μικρομοντέλου. Δεδομένου ότι η κλίση της ευθείας που προέρχεται από το Σχήμα 2 υπολογίστηκε να είναι $\Delta P / Q = 0,0494$ psi / (ml/min), το δυναμικό ιξώδες του νερού σε $25^\circ C$ είναι $\mu_w = 0,89 \times 10^{-3}$ (N s) / m^2 (Street et al., 1996) και 1 psi = 6894.7 N/ m^2 , υπολογίστηκε από τη (2.1) η απόλυτη διαπερατότητα του μικρομοντέλου να είναι $k = 2.23 \times 10^{-10}$ m^2 .

2.2. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Το μικρομοντέλο τοποθετήθηκε πάνω από σύστημα φωτισμού εξοπλισμένο με δύο πηγές φωτός χρησιμοποιώντας (α) ορατό φως (Philips TLD grafica Pro 18W/ 95), και (β) υπεριώδες (UV) φως (Philips Black Light lamps). Η ροή των υγρών στο μικρομοντέλο πραγματοποιήθηκε με αντλία σύριγγας (Cole-Parmer 74900) η οποία τοποθετήθηκε ακριβώς στο ίδιο κατακόρυφο επίπεδο με το μικρομοντέλο. Οι ιχνηθέτες εισήχθησαν στιγμιαία στο μικρομοντέλο μέσω της εισόδου που είχαμε δημιουργήσει με πλαστική σύριγγα 1 mL. Μια ψηφιακή φωτογραφική μηχανή (Nikon D5000) τοποθετημένο σε ένα τρίποδο ακριβώς πάνω από το μικρομοντέλο. Η ικανότητα της φωτογραφικής μηχανής για να λαμβάνει μια σειρά από φωτογραφίες με μια ρύθμιση του χρονικού διαστήματος είναι βολική, αλλά όχι απαραίτητη (Thomas and Chrysikopoulos, 2010). Σχηματική απεικόνιση της πειραματικής συσκευής παρουσιάζεται στο Σχήμα 3. Για να αποφύγετε οποιαδήποτε ανεπιθύμητη μεταβολή του φωτός, η πειραματική συσκευή ήταν τοποθετημένη σε σκοτεινό δωμάτιο.



Σχήμα 3. Διάταξη για τη διεξαγωγή πειραμάτων ροής σε γυάλινα δοκίμια και σε συνθήκες ορατού ή υπεριώδους φωτός.

Πριν από τη διενέργεια κάθε πείραματος το μικρομοντέλο ήταν πλήρως εμποτιστεί με sdH_2O . Τουλάχιστον 10 φορές γεμίζαμε τον όγκο των κενών με sdH_2O , έτσι ώστε να απομακρυνθούν από το μικρομοντέλο τυχόν φυσαλίδες αέρα.

2.3. ΡΥΘΜΙΣΗ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ

Μερικά προκαταρκτικά βήματα είχαν ολοκληρωθεί πριν από την έναρξη κάθε πειράματος για να εξασφαλιστεί ότι όλες οι φωτογραφίες θα μπορούσαν να συγκριθούν άμεσα με άλλες, χωρίς οποιαδήποτε προσαρμογή και ότι δεν παρατηρείται υπέρβαση

της μέγιστης τιμής έντασης της ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής. Πρώτον, η ψηφιακή φωτογραφική μηχανή έχει ρυθμιστεί σε αυτόματη έκθεση και φυσικών χρωμάτων (RGB color space) και μια φωτογραφία ελήφθη στο μικρομοντέλο με έγχυση του ιχνηθέτη. Η συγκέντρωση του ιχνηθέτη ήταν ακριβώς η ίδια με αυτή που χρησιμοποιείται στο πείραμα. Η ένταση του εκπεμπόμενου φωτός από τον ιχνηθέτη καταγράφηκε για κάθε pixel. Προσέξτε ότι σε αυτήν την πρώτη φωτογραφία χρησιμοποιήθηκε το πιο πυκνό διάλυμα και η παρατηρούμενη ένταση ήταν στο μέγιστο αναμενόμενο επίπεδο. Ως εκ τούτου, με αυτή την φωτογραφία μπορούμε στην ψηφιακή φωτογραφική μηχανή να εντοπίσουμε το σωστό διάφραγμα, ταχύτητα κλείστρου και ευαισθησία που χρειάζεται ISO, έτσι ώστε η μέγιστη ένταση να μην ξεπεραστεί. Όλες οι επόμενες φωτογραφίες αναμενόταν να έχουν ίση ή χαμηλότερη ένταση για κάθε pixel εξαιτίας της αραίωσης του ιχνηθέτη που προκαλείται από την υδροδυναμική διασπορά εντός του μικρομοντέλου. Στη συνέχεια, οι ρυθμίσεις έχουν καταγραφεί και είναι αυτές που χρησιμοποιούνται στη ψηφιακή φωτογραφική μηχανή. Τέλος, η ψηφιακή κάμερα ήταν εστιασμένη, προκειμένου να διατηρηθούν οι ίδιες ακριβώς συνθήκες καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος.

2.4. ΕΙΚΟΝΑ ΦΟΝΤΟΥ

Πριν από την εκτέλεση οποιουδήποτε πειράματος καθαρίζαμε το μικρομοντέλο με έκπλυση sdH_2O τουλάχιστον 10 φορές τον όγκο κενών. Στη συνέχεια, μια φωτογραφία ελήφθη με το μικρομοντέλο να είναι κορεσμένο σε νερό χωρίς ιχνηθέτη, με τις ρυθμίσεις κάμερας όπως έχουν προηγουμένως προσδιοριστεί και την επιθυμητή πηγή φωτός (ορατού ή υπεριώδους). Αυτή η εικόνα ονομάστηκε "εικόνα φόντου" και χρησιμοποιήθηκε στην ανάλυση που ακολουθεί των φωτογραφικών εικόνων που ελήφθησαν μετά την έγχυση του ιχνηθέτη στο μικρομοντέλο.

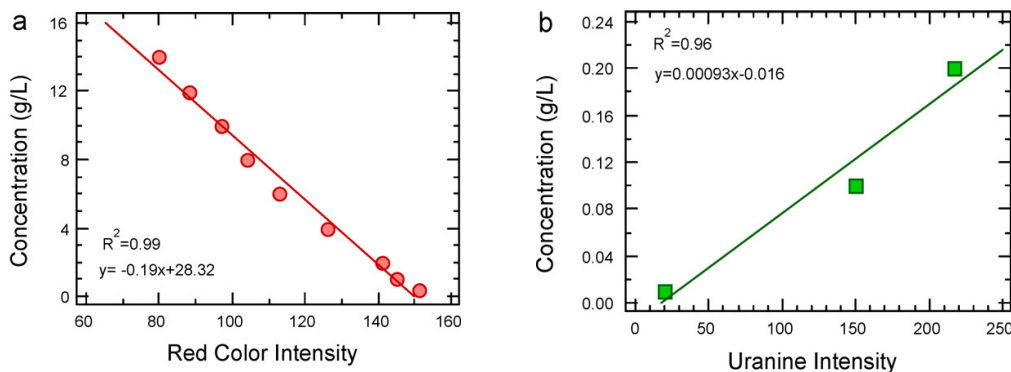
2.5. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΕΙΚΟΝΑΣ

Οι φωτογραφίες του μικρομοντέλου που λαμβάνονται επεξεργάστηκαν χρησιμοποιώντας το MATLAB® Image Processing Toolbox™ ακολουθώντας τις διαδικασίες των Bouhairie (1998) και Thomas and Chrysikopoulos (2010). Η βασική δομή των δεδομένων του MATLAB® είναι η συστοιχία, η οποία είναι ένα διατεταγμένο σύνολο πραγματικών ή σύνθετων στοιχείων. Ομοίως, μια εικόνα RGB κατ' ουσίαν αποθηκεύεται ως μια τρισδιάστατη συστοιχία και αποτελείται από τρία δύο διαστάσεων (2-D) συστοιχίες εντάσεις pixel, μία για το κόκκινο, μια για το πράσινο και μια για το μπλε. Κάθε 2-D συστοιχία έχει x και y διαστάσεις που αντιστοιχούν σε σειρές και στήλες των pixel (δηλαδή στη θέση της εικόνας), με μια τιμή έντασης σε μία κλίμακα από 0 έως 255 σε θέση αυτή. Σε αυτές τις εικόνες μπορούν οι εντάσεις του φωτός να μετατραπούν σε συγκεντρώσεις. Ο συνολικός αριθμός των pixel, και η ποιότητα της εικόνας ήταν προγραμματισμένα στην κάμερα. Ήταν απαραίτητο για να αντιστοιχηθούν τα pixels στις εικόνες σε πραγματικές τοποθεσίες εντός της 2-D επιφάνειας του μικρομοντέλου, να οριστούν κατάλληλες συντεταγμένες σε κάθε pixel (δηλ. x-κατεύθυνση και y-κατεύθυνση). Αυτό έχει επιτευχθεί με τη χρήση του "imtool" λειτουργία του MATLAB® Image Processing Toolbox™ για να μετρήσει τον αριθμό των εικονοστοιχείων κατά μήκος και πλάτος του μικρομοντέλου. Το πραγματικό μήκος του μικρομοντέλου ανά εικονοστοιχείο (pixel) ελήφθη διαιρώντας το μήκος (100 mm) του μικρομοντέλου με τον αριθμό των εικονοστοιχείων στην x-κατεύθυνση και το πραγματικό πλάτος του μικρομοντέλου ελήφθη διαιρώντας το πλάτος (50 mm) του

μικρομοντέλου με τον αριθμό των pixel στην y-κατεύθυνση. Στη συνέχεια, η "εικόνα φόντου" που έχει ληφθεί κατά την έναρξη των πειραμάτων αφαιρείται από κάθε μία από τις επόμενες εικόνες χρησιμοποιώντας το "imsubtract" λειτουργία του MATLAB® Image Processing Toolbox™. Οι προκύπτουσες εικόνες αποτελούνται μόνο από τις εντάσεις του ορατού ή υπεριώδους φωτός που εκπέμπονται από τους αντίστοιχους ιχνηθέτες.

2.6. ΚΑΜΠΥΛΗ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ

Μια καμπύλη βαθμονόμησης απαιτείται για κάθε χρησιμοποιούμενο ιχνηθέτη που να συσχετίζει τις εντάσεις (υπό κλίμακα από 0 έως 255) του χρώματος του κάθε διαλύματος με την πραγματική του συγκέντρωση στο μικρομοντέλο. Οι αναγκαίες καμπύλες βαθμονόμησης κατασκευάστηκαν με μια απλή διαδικασία. Πρότυπα διαλύματα δημιουργήθηκαν σε πολλές διαφορετικές αλλά γνωστές συγκεντρώσεις κάτω από τις ίδιες συνθήκες με τα προς ανάλυση διαλύματα του πειράματος. Χρησιμοποιώντας την ψηφιακή φωτογραφική μηχανή πάρθηκε φωτογραφία του μικρομοντέλου που ήταν πλήρως κορεσμένο με το χαμηλότερης συγκέντρωσης πρότυπο διάλυμα. Στη συνέχεια, το μικρομοντέλο ήταν εμποτισμένο με την επόμενη τυπική συγκέντρωση του ιχνηθέτη και πάρθηκε άλλη φωτογραφία. Η διαδικασία αυτή επαναλήφθηκε μέχρις ότου χρησιμοποιήθηκαν όλα τα πρότυπα διαλύματα. Η επιθυμητή καμπύλη κατασκευάστηκε με τεταγμένη τις εντάσεις του ιχνηθέτη και τεταγμένη τις γνωστές συγκεντρώσεις.



Σχήμα 4. Καμπύλες βαθμονόμησης της συγκέντρωσης σε πειράματα που πραγματοποιήθηκαν με (α) ορατή πηγή φωτός και (β) πηγή υπεριώδους φωτός.

3. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Η δισδιάστατη μεταφορά ρύπων σε ομοιογενές, κεκορεσμένο με νερό πορώδες μέσο διέπεται από την εξής μερική διαφορική εξίσωση:

$$\frac{\partial C(t, x, y)}{\partial t} = D_L \frac{\partial^2 C(t, x, y)}{\partial x^2} + D_T \frac{\partial^2 C(t, x, y)}{\partial y^2} - U \frac{\partial C(t, x, y)}{\partial x} \quad (3.1)$$

όπου C [M/L^3] είναι η συγκέντρωση ρύπου, D_L [L^2/t] και D_T [L^2/t] είναι ο συντελεστής διαμήκους και εγκάρσιας υδροδυναμική διασποράς (Bear, 1972):

$$D_L = \alpha_L U + D_e \quad (3.2)$$

$$D_T = \alpha_T U + \mathcal{D}_e \quad (3.3)$$

όπου α_L [L/t] είναι ο διαμήκης συντελεστής τάσεων διασποράς, α_T [L/t] είναι ο εγκάρσιος συντελεστής τάσεων διασποράς, $D_e = D_{AB}/\tau^*$ [L²/t] είναι ο συντελεστής μοριακής διάχυσης ($\tau^* \geq 1$ [-] είναι το δαιδάλωδες των πόρων και D_{AB} [L²/t] είναι ο συντελεστής μοριακής διάχυσης), U [L/t] είναι η ενδοπορώδης ταχύτητα, x [L] και y [L] είναι οι καρτεσιανές συντεταγμένες και t [t] είναι ο χρόνος. Η ενδοπορώδης ταχύτητα του μικρομοντέλου μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την εξίσωση:

$$U = \frac{Q}{A_m \theta} \quad (3.4)$$

όπου θ [-] είναι το πορώδες του μικρομοντέλου. Ο συντελεστής μοριακής διάχυσης του ρύπου μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την σχέση Wilke–Chang (1955):

$$\mathcal{D}_{AB} = 7.4 \times 10^{-8} \frac{(\psi_B m w_B)^{1/2} T}{\mu_B V_A^{0.6}} \quad (3.5)$$

όπου, A είναι ο ρύπος, B είναι ο διαλύτης (νερό), $\psi_B = \psi_{H_2O} = 2.6$ είναι παράμετρος του B [Bird et al. (2002)], $\mu_B = \mu_w = 0,890 \times 10^{-3}$ (N s) /m² = 0,89 cp είναι το δυναμικό ιξώδες του νερού στους 25 °C (1 cp = 0,001 (N s) /m²), $m w_B = 18$ g/mol είναι το μοριακό βάρος του νερού, T [K] είναι η απόλυτη θερμοκρασία και $V_A = m w_A / \rho_A$ [cm³/g mol] είναι ο μοριακός όγκος του ρύπου A .

Η αρχική συνθήκη για το φυσικό πρόβλημα που εξετάζεται στη παρούσα μελέτη είναι:

$$C(0, x, y) = 0 \quad (3.6)$$

Και οι κατάλληλες οριακές συνθήκες είναι:

$$-D_L \frac{\partial C(t, 0)}{\partial x} + UC(t, 0) = \begin{cases} UC_0 & 0 < t \leq t_p \\ 0 & t > t_p \end{cases} \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial C(t, x, 0)}{\partial y} = \frac{\partial C(t, x, L_y)}{\partial y} = 0 \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial C(t, L_x, y)}{\partial x} = 0 \quad (3.9)$$

όπου t_p [t] είναι ο χρόνος της παλμικής περιόδου. Η συνθήκη (3.6) σημαίνει ότι δεν υπάρχει αρχική συγκέντρωση ρύπου στο δισδιάστατο πορώδες μέσο. Η οριακή συνθήκη (3.7) συνεπάγεται ασυνεχής εισαγωγή συγκέντρωσης ρύπου (Chrysikopoulos et al., 1990). Η συνθήκη (3.8) συνεπάγεται ότι δεν υπάρχει ρύπος σε όλα τα πλάγια όρια του δισδιάστατου πορώδους μέσου. Η τελευταία οριακή συνθήκη (3.9) διατηρεί συνεχή συγκέντρωση για ένα ημι-άπειρο συστήματος.

Το δαιδάλωδες είναι μια θεμελιώδης ιδιότητα ενός πορώδους μέσου, η οποία καθιερώθηκε από τον Carman (1937), ώστε να περιγράψει την διασυνδεσιμότητα του

του χώρου στο πορώδες. Στη μελέτη αυτή, το μοντέλο του δαιδαλώδους των πόρων που χρησιμοποιήθηκε εισήχθη από τον Bruggeman (1935):

$$\tau^* = \theta^{1-\alpha} \approx \frac{1}{\sqrt{\theta}} \quad (3.10)$$

όπου α [-] είναι ο εκθέτης Bruggeman, που συχνά χρησιμοποιείται με την τιμή $\alpha \approx 1.5$ (Pisani, 2011).

4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

Η μέθοδος προσδιορισμού της συγκέντρωσης που χρησιμοποιήθηκε για τον κόκκινο ιχνηθέτη και την ουρανίνη στο μικρομοντέλο, περιγράφεται σε αυτό το κεφάλαιο. Ο κόκκινος ιχνηθέτης που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή τη μελέτη είναι γνωστή ως azorubine ή carmoisine ή Food, Drug and Cosmetic (FD&C) χρωστικής τροφίμων αριθμός 3, με colour index number 14720 (Colour Index, 1971) και E122. Είναι μια κόκκινη σκόνη με μοριακό τύπο $C_{20}H_{12}N_2Na_2O_7S_2$, μοριακού βάρους 502.44 g/mol, πυκνότητας ~ 0.45 g/cm³ και χρησιμοποιείται συχνά για την βαφή των αυγών του Πάσχα. Η ουρανίνη γνωστή ως FD&C κίτρινο αριθμός 8, με colour index Number 45350 (Colour Index, 1971). Είναι μια πορτοκαλοκόκκινη σκόνη με μοριακό τύπο $C_{20}H_{10}O_5Na_2$, μοριακού βάρους 376.28 g/mol, πυκνότητας 1.53 g/cm³, που παρουσιάζει έντονη πρασινωπό-κίτρινο φθορισμό και συχνά χρησιμοποιείται σε πολλές βιομηχανικές εφαρμογές συμπεριλαμβανομένων γεωθερμικής ενέργειας και ανίχνευσης νερού εδάφους (Chrysikopoulos, 1993). Σύμφωνα με την (3.5), η μοριακή διάχυση του κόκκινου ιχνηθέτη εκτιμήθηκε ότι είναι $D_{AB(rc)} = 2.52 \times 10^{-10}$ m²/s, και για την ουρανίνη είναι $D_{AB(u)} = 6.24 \times 10^{-10}$ m²/s. Επίσης, με βάση την (3.10), το δαιδαλώδες των πόρων εκτιμήθηκε ότι είναι $\tau^* = 1.3$. Συνεπώς, ο συντελεστής μοριακής διάχυσης για τον κόκκινο ιχνηθέτη είναι $D_{e(rc)} = 1.94 \times 10^{-10}$ m²/s και για την ουρανίνη είναι $D_{e(u)} = 4.80 \times 10^{-10}$ m²/s.

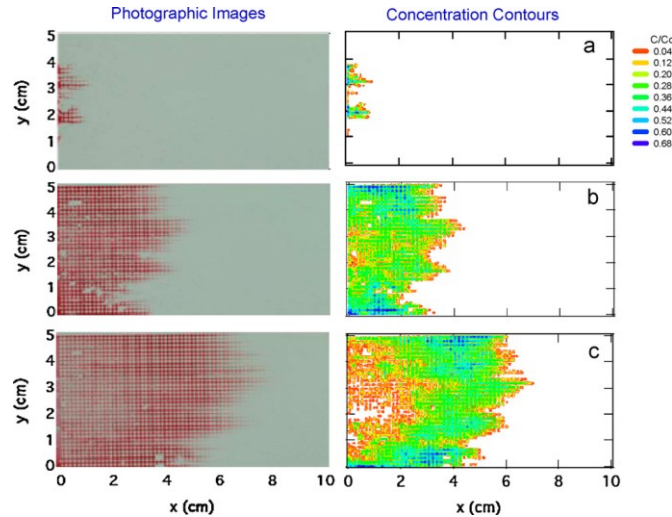
Πριν από την εκτέλεση των πειραμάτων με τον κόκκινο ιχνηθέτη και την ουρανίνη δημιουργήθηκαν οι δύο απαραίτητες καμπύλες βαθμονόμησης που παρουσιάζονται στο Σχήμα 4. Τα πειράματα διεξήχθησαν σύμφωνα με το παραπάνω πρωτόκολλο με ρυθμό ροής $Q = 2$ mL/h. Μετά τον καθορισμό σταθερών συνθηκών ροής εντός του μικρομοντέλου, εισήχθησαν στιγμιαία 0.1 ml του διαλύματος ιχνηθέτη στο κορεσμένο με νερό μικρομοντέλο. Η συγκέντρωση του κόκκινου ιχνηθέτη που εγχύθηκε στο μικρομοντέλο ήταν $C_{0(rc)} = 10$ g/L και η συγκέντρωση της ουρανίνης ήταν $C_{0(u)} = 0.3$ g/L. Για κάθε πείραμα η ψηφιακή φωτογραφική μηχανή ήταν ρυθμισμένη έτσι ώστε να αποτυπώνει στιγμιότυπα σε προεπιλεγμένο χρονικό διάστημα. Κάθε εικόνα RGB ήταν χωρισμένη σε εικόνες κόκκινου, πράσινου και μπλε χρώματος. Χρησιμοποιώντας τις καμπύλες βαθμονόμησης του Σχήματος 5, οι εντάσεις του κόκκινου ιχνηθέτη, $I_{(rc)}$ [-], μετατράπηκαν σε συγκεντρώσεις αυτού, $C_{(rc)}$ με μονάδες [g/L], με τη βοήθεια της σχέσης:

$$C_{(rc)} = -0.19 I_{(rc)} + 28.32 \quad (4.1)$$

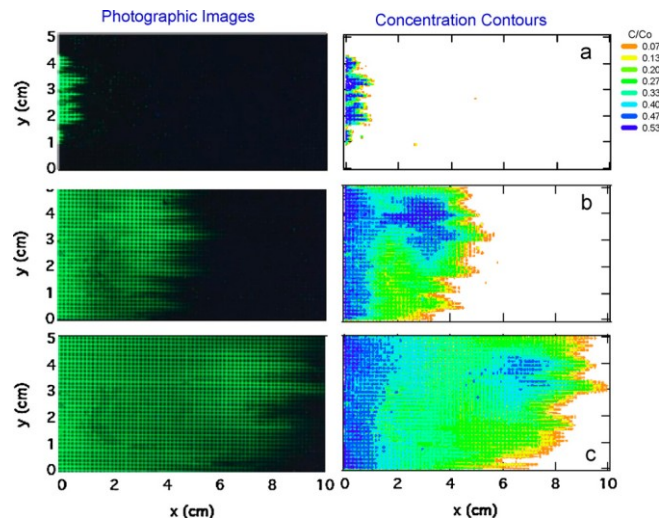
Ομοίως, οι εντάσεις φθορισμού, $I_{(u)}$ [-], μετατράπηκαν σε συγκεντρώσεις ουρανίνης, $C_{(u)}$ με μονάδες [g/L], με τη βοήθεια της σχέσης:

$$C_{(u)} = 9.3 \times 10^{-4} I_{(u)} - 1.6 \times 10^{-2} \quad (4.2)$$

Σημειώστε ότι η ένταση θεωρείται μονοδιάστατη, όπως καταγράφεται από την κάμερα. Επιλεγμένες φωτογραφίες και οι αντίστοιχες καμπύλες ίσης συγκέντρωσης για ένα πείραμα με τον κόκκινο ιχνηθέτη σε συνθήκες ορατού φωτός παρουσιάζονται στο Σχήμα 5 και με την ουρανίνη σε συνθήκες υπεριώδους φωτός παρουσιάζονται στο Σχήμα 6. Οπτικός έλεγχος των φωτογραφιών και των αντίστοιχων καμπυλών ίσης συγκέντρωσης υποδηλώνει ότι η τεχνική του προσδιορισμού συγκέντρωσης στη μελέτη αυτή είναι περισσότερο από ικανοποιητική τόσο για τον κόκκινο ιχνηθέτη όσο και για την ουρανίνη.



Σχήμα 5. Φωτογραφίες (αριστερή στήλη) και καμπύλες ίσης συγκέντρωσης (δεξιά στήλη) του κόκκινου ιχνηθέτη στο μικρομοντέλο κάτω από συνθήκες ορατού φωτός στο (α) 1 min, (β) 4 min και (γ) 7 min.

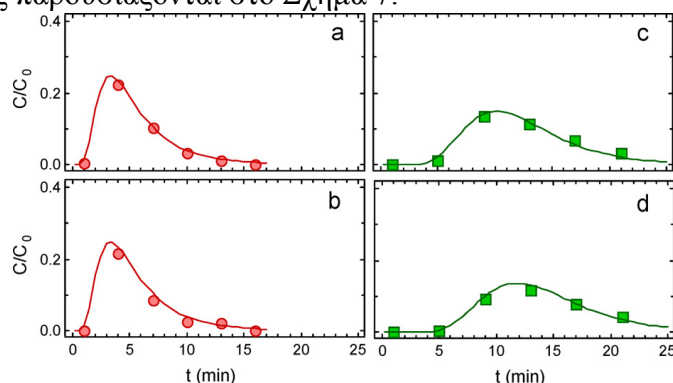


Σχήμα 6. Φωτογραφίες (αριστερή στήλη) και καμπύλες ίσης συγκέντρωσης (δεξιά στήλη) της ουρανίνης στο μικρομοντέλο κάτω από συνθήκες υπεριώδους φωτός στο: (α) 1 min, (β) 5 min και (γ) 9 min.

Η σημασία της τεχνικής του προσδιορισμού συγκέντρωσης που παρουσιάζεται στην παρούσα εργασία είναι σημαντική. Εν συνεχεία υπολογίστηκε στο μικρομοντέλο ο διαμήκης συντελεστής τάσεων διασποράς χρησιμοποιώντας τα πειραματικά δεδομένα.

Ακριβής πρόβλεψη της μεταφοράς ρύπων σε πορώδη μέσα βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στη χρήση των κατάλληλων συντελεστών διασποράς, που παραδοσιακά προσδιορίζονται πειραματικά.

Στη μελέτη αυτή, οι εντάσεις που παράγονται σε μερικά τυχαία επιλεγμένα σημεία εντός του μικρομοντέλου μετατράπηκαν σε συγκεντρώσεις. Το παραπάνω μοντέλο μεταφοράς ρύπων χρησιμοποιήθηκε για να συσχετιστούν οι πειραματικές συγκεντρώσεις, προκειμένου να προσδιοριστούν οι επιθυμητές παράμετροι μεταφοράς. Για τη διαδικασία συσχέτισης του μοντέλου και την εκτίμηση των παραμέτρων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό PEST. Τα πειραματικά δεδομένα μαζί με το μοντέλο προσομοίωσης παρουσιάζονται στο Σχήμα 7.



Σχήμα 7. Οι συγκεντρώσεις που μετρήθηκαν για (a και b) κόκκινο ιχνηθέτη (κυκλικά σύμβολα), και (c και d) ουρανίνη (τετράγωνα σύμβολα). Οι καρτεσιανές συντεταγμένες (x, y) της κάθε μετρήσης εντός του μικρομοντέλου είναι: (a) (15 mm, 20 mm), (b) (15 mm, 38 mm), (c) (35 mm, 45 mm) και (d) (40 mm, 10 mm). Εδώ $Q = 2$ ml/min ή ισοδύναμα $U = 0.288$ cm/min και $t_p = 0.3$ min.

Σαφώς, υπάρχει πολύ καλή συμφωνία μεταξύ των πειραματικών δεδομένων και του μοντέλου προσομοίωσης. Ο συντελεστής διαμήκους διασποράς που προκύπτει για τον κόκκινο ιχνηθέτη ήταν $D_{L(rc)} = 0.08 \pm 0.03$ cm²/min και για την ουρανίνη ήταν $D_{L(u)} = 0.07 \pm 0.03$ cm²/min. Σημειώστε ότι ο συντελεστής εγκάρσιας διασποράς και για τις δύο περιπτώσεις που εξετάστηκαν εδώ ορίστηκε με μηδενική τιμή ($D_{T(rc)} = D_{T(u)} = 0$). Σύμφωνα με τις (3.2) και (3.4) ο διαμήκης συντελεστής τάσεων διασποράς χρησιμοποιώντας τα δεδομένα για τον κόκκινο ιχνηθέτη υπολογίστηκε ως $\alpha_{L(rc)} = 0.27 \pm 0.09$ cm και χρησιμοποιώντας τα δεδομένα για την ουρανίνη υπολογίστηκε ως $\alpha_{L(u)} = 0.24 \pm 0.09$ cm. Αυτές οι τιμές για τους διαμήκης συντελεστές τάσεων διασποράς συγκρίθηκαν και με εκείνες που αναφέρθηκαν στη βιβλιογραφία για μεταφορά χλωρίου σε ένα γυάλινο μικρομοντέλο (Theodoroulou, 2007).

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η μέθοδος προσδιορισμού της συγκέντρωσης που παρουσίασαν οι Huang et al. (2002), η οποία περιορίστηκε σε ιχνηθέτες φθορισμού και η εργασία των Thomas and Chysikoroulos (2010), η οποία περιορίστηκε σε μονοδιάστατες στήλες, επεκτάθηκε. Η αναθεωρημένη μέθοδος περιλάμβανε τη διεξαγωγή πειραμάτων ροής σε δισδιάστατο γυάλινο μοντέλο δικτύου πόρων, λαμβάνοντας ψηφιακές φωτογραφίες και μετατρέποντας τις εντάσεις χρώματος ή φθορισμού σε συγκεντρώσεις. Κατά συνέπεια, δεν παρουσιάστηκαν σφάλματα στην εικόνα λόγω της οπτικής διάχυσης στο γυάλινο δοκίμιο. Η μέθοδος αυτή φαίνεται να είναι εφαρμόσιμη και σε ιχνηθέτες χρώματος και σε φθορισμού.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Auset, M. and Keller, A.A., 2004. *Pore-scale processes that control dispersion of colloids in saturated porous media*. Water Resour. Res. 40 W03503, doi:10.1029/2003WR002800.
- Avraam, D.G., Kolonis, G.B., Roumeliotis, T.C., Constantinides, G.N. and Payatakes, A.C., 1994. *Steady-state two-phase flow through planar and nonplanar model porous media*. Transp. Porous Media 16: 75–101.
- Avraam, D.G. and Payatakes, A.C., 1995. *Flow regimes and relative permeabilities during steady-state two-phase flow in porous media*. J. Fluid Mech. 293: 207–236.
- Baumann, T. and Werth, C.J., 2004. *Visualization and modeling of polystyrol colloid transport in a silicon micromodel*. Vadose Zone J. 3: 434–443.
- Bear, J., 1972. *Dynamics of Fluids in Porous Media*. Dover.
- Bird, R.B., Stewart, W.E. and Lightfoot, E.N., 2002. *Transport Phenomena*. Wiley, 2nd ed..
- Bouhairie, S., 1998. *A study of the entrapment process in a recirculation flow by videoimaging method*. M.S. Thesis, McGill University, Montreal, Canada.
- Bruggeman, D.A.G., 1935. *Berechnung verschiedener physikalischer Konstanten von heterogenen Substanzen*. Ann. Phys. (Leipzig) 24: 636–679.
- Carman, P.C., 1937. *Fluid flow through granular beds*. Trans. Inst. Chem. Eng. 15: 150–156.
- Chrysikopoulos, C.V., 1993. *Artificial tracers for geothermal reservoir studies*. Environ. Geol. 22: 60–70.
- Chrysikopoulos, C.V., Roberts, P.V. and Kitanidis, P.K., 1990. *One-dimensional solute transport in porous media with partial well-to-well recirculation: application to field experiments*. Water Resour. Res. 26: 1189–1195.
- Chrysikopoulos, C.V. and Vogler, E.T., 2006. *Acoustically enhanced ganglia dissolution and mobilization in a monolayer of glass beads*. Transp. Porous Media 64: 103–121.
- Colour Index, 1971. *Society of Dyers and Colourists*. Bradford, vol. 2, 3rd ed.
- Corapcioglu, M.Y. and Fedirchuk, P., 1999. *Glass bead micromodel study of solute transport*. J. Contam. Hydrol. 36: 209–230.
- Huang, W.E., Smith, C.C., Lerner, D.N., Thornton, S.F. and Oram, A., 2002. *Physical modeling of solute transport in porous media: evaluation of an imaging technique using UV excited fluorescent dye*. Water Res. 36: 1843–1853.
- Jia, C., Shing, K. and Yortsos, Y.C., 1999. *Visualization and simulation of non-aqueous phase liquids solubilization in pore networks*. J. Contam. Hydrol. 35: 363–387.
- Jones, E.H. and Smith, C.C., 2005. *Non-equilibrium partitioning tracer transport in porous media, 2-D physical modeling and imaging using a partitioning fluorescent dye*. Water Res. 39: 5099–5111.
- Keller, A.A., Blunt, M.J. and Roberts, P.V., 1997. *Micromodel observation of the role of oil layers in three-phase flow*. Transp. Porous Media 26: 277–297.
- McKellar, M. and Wardlaw, N.C., 1982. *A method of making two-dimensional glass micromodels of pore systems*. J. Can. Petrol. 21: 39–41.
- Pisani, L., 2011. *Simple expression for the tortuosity of porous media*. Transp. Porous Media 88: 193–203.

- Srivithayapakorn, S. and Keller, A.A., 2003. *Transport of colloids in saturated porous media: a pore-scale observation of the size exclusion effect and colloid acceleration*. Water Resour. Res. 39: 1109, doi:10.1029/2002WR001583.
- Street, R.L., Watters, G.Z. and Vennard, J.K., 1996. *Elementary Fluid Mechanics*. Wiley, 7th ed.
- Theodoropoulou, M.A., 2007. *Dispersion of dissolved contaminants in groundwater: from visualization experiments to macroscopic simulation*. Water Air Soil Pollut. 181: 235–245.
- Theodoropoulou, M.A., Karoutsos, V., Kaspiris, C. and Tsakiroglou, C.D., 2003. *A new visualization technique for the study of solute dispersion in model porous media*. J. Hydrol. 274: 176–197.
- Thomas, J.M. and Chrysikopoulos, C.V., 2010. *A new method for in situ concentration measurements in packed-column transport experiments*. Chem. Eng. Sci. 65: 4285–4292.
- Tsakiroglou, C.D., Theodoropoulou, M., Karoutsos, V., Papanicolaou, D. and Sygouni, V., 2003. *Experimental study of the immiscible displacement of shear-thinning fluids in pore networks*. J. Colloid Interface Sci. 267: 217–232.
- Wan, J., Tokunaga, T.K., Tsang, F.C. and Bodvarsson, G.S., 1996. *Improved glass micromodel methods for studies of flow and transport in fractured porous media*. Water Resour. Res. 32: 1955–1964.
- Werth, C.J., Zhang, C., Brusseau, M.L., Oostrom, M. and Baumann, T., 2010. *A review of non-invasive imaging methods and applications in contaminant hydrogeology research*. J. Contam. Hydrol. 113: 1–24.
- Wilke, C.R. and Chang, P., 1955. *Correlation of diffusion coefficients in dilute solutions*. AIChE J. 1: 264–270.
- Willingham, T.M., Werth, C.J. and Valocchi, A.J., 2008. *Evaluation of the effects of porous media structure on mixing-controlled reactions using pore-scale modeling and micromodel experiments*. Environ. Sci. Technol. 42: 3185–3193.

ΔΙΑΧΡΟΝΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΤΟΥ ΠΑΤΡΑΪΚΟΥ ΚΟΛΠΟΥ

Βασιλική Ντζόλα¹, Ελένη Σαζακλή¹, Παναγιώτης Ζάννης², Μάρκος Σκληβανιώτης³, Μιχάλης Λεοτσινίδης¹

¹ Εργ. Υγιεινής, Ιατρικό Τμήμα, Πανεπιστήμιο Πατρών

² ΕΤΒΑ Βιομηχανικές Περιοχές Α.Ε.

³ Δημοτική Επιχείρηση Ύδρευσης – Αποχέτευσης Πάτρας (Δ.Ε.Υ.Α.Π.)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το επίπεδο ρύπανσης του Πατραϊκού κόλπου εκτιμήθηκε σε δύο χρονικές περιόδους, το 1993 προ της κατασκευής και λειτουργίας της μονάδας επεξεργασίας υγρών αποβλήτων της πόλης της Πάτρας καθώς και των δύο υποθαλάσσιων αγωγών διάθεσης των επεξεργασμένων λυμάτων της ΔΕΥΑΠ και της ΒΙ.ΠΕ και το 2010. Η εκτίμηση πραγματοποιήθηκε μέσω αναλύσεων δειγμάτων θαλασσινού νερού, ιζημάτων και του αυτόχθονου οστρακοειδούς *Pinna squamoza*. Παρατηρήθηκε μείωση του ολικού φωσφόρου στα θαλασσινά νερά καθώς και μείωση των μετάλλων ανθρωπογενούς προέλευσης τόσο στα ιζήματα όσο και στα οστρακοειδή. Όσον αφορά τα PAHs οι τιμές τους ήταν κοντά στο όριο ανίχνευσης και στις δύο περιπτώσεις Συμπερασματικά, η λειτουργία εγκαταστάσεων βιολογικού καθαρισμού σε συνδυασμό με τη διάθεση μέσω υποθαλάσσιων αγωγών φαίνεται να αντιστρέφει τη πορεία επιβάρυνσης.

THE EVOLUTION OF POLLUTION IN PATRAS GULF

V. Ntzola¹, E. Sazakli¹, P. Zannis², M. Sklivaniotis³, M. Leotsinides¹

¹School of Medicine, University of Patras

²ETBA S.A

³Patras Municipal Entreprise for Water Supply and Sewarage (DEYAP)

ABSTRACT

The level of pollution in Patraikos Gulf, Greece, was evaluated at two time intervals, in 1993 before the operation of the municipal and industrial wastewater treatment plants and their discharging submarine pipelines and in 2010. Chemical and/or Microbiological parameters were determined in sediments, marine organisms and seawater. Metals originated from anthropogenic activities were found at lower concentrations both in sediments and marine organisms, while phosphorus has been significantly reduced in seawater at the second sampling compared with the first one. As for PAHs, their mean values were close to the detection limit at both time periods. The operation of wastewater treatment plants and the discharge via submarine outfall pipelines seem to reverse the process of pollution burden and contribute to the ecosystem reclamation.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σύμφωνα με την UNESCO ως θαλάσσια ρύπανση ορίζεται κάθε άμεση ή έμμεση ανθρωπογενούς προέλευσης εισαγωγή ουσιών ή ενέργειας στο θαλάσσιο περιβάλλον, η οποία έχει βλαβερή επίδραση στους ζώντες οργανισμούς ή είναι επικίνδυνη για την ανθρώπινη υγεία ή αλλοιώνει την ποιότητα του θαλάσσιου νερού ή υποβιβάζει τις δυνατότητες χρήσης του για ψυχαγωγικούς σκοπούς.

Οι πηγές και οι οδοί διείσδυσης ρύπων στο θαλάσσιο σύστημα είναι ποικίλες και περιλαμβάνουν αγωγούς αποβλήτων, εκβολές ποταμών, βρόχινα νερά, ατμοσφαιρική μεταφορά σωματιδίων, θαλάσσιες μεταφορές και συγκοινωνίες κλπ. Η κατανομή, η τύχη και οι συνέπειες των αποβλήτων στα θαλάσσια συστήματα εξαρτώνται από φυσικές, χημικές και βιολογικές διεργασίες που μεταβάλλουν την συγκέντρωση και τον χημικό χαρακτήρα των ρύπων με τελικό αποτέλεσμα την απομάκρυνσή τους από την υδάτινη στήλη.

Είναι γενικά αποδεκτό ότι οι κίνδυνοι στο θαλάσσιο περιβάλλον που απορρέουν από την απόθεση ή διάθεση των επεξεργασμένων αποβλήτων μπορούν να ομαδοποιηθούν σε δύο κύριες κατηγορίες:

A) Προβλήματα από την διασπορά του υλικού εκροής, όταν αυτό περιέχει σε υψηλές συγκεντρώσεις αιωρούμενα σωματίδια, στον αποδέκτη όπου ιδιαίτερα τα λεπτόκοκκα υλικά μπορεί να προκαλέσουν σημαντική θολότητα στο υδάτινο περιβάλλον. Το μέγεθος του προβλήματος είναι κυρίως συνάρτηση τόσο της κοκκομετρίας όσο και της μεθοδολογίας διάθεσης.

B) Προβλήματα από την εισαγωγή στο θαλάσσιο οικοσύστημα μιας σειράς χημικών ενώσεων που μπορεί να είναι ενώσεις μετάλλων, οργανικών ουσιών ή μεικτές. Τέτοιες ενώσεις αποτελούν σοβαρό κίνδυνο για το οικοσύστημα της περιοχής στην οποία εισάγονται.

Σκοπός της παρούσας μελέτης ήταν η εκτίμηση της διαχρονικής εξέλιξης ρύπανσης του Πατραϊκού Κόλπου πριν και μετά τη λειτουργία μονάδας επεξεργασίας λυμάτων της ΒΙ.ΠΕ. και της ΔΕΥΑ Πάτρας σε συνδυασμό με την κατασκευή και λειτουργία των δύο αντίστοιχων υποθαλάσσιων αγωγών διάθεσης.

1.1 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΘΑΛΑΣΣΙΟΥ ΑΠΟΔΕΚΤΗ

Η εκτίμηση των επιπέδων ρύπανσης ενός θαλάσσιου αποδέκτη μπορεί να πραγματοποιηθεί με τον προσδιορισμό των επιπέδων διαφόρων φυσικοχημικών παραμέτρων και τοξικών ουσιών σε:

A. Δείγματα θαλασσινού νερού.

B. Δείγματα ιζημάτων

Γ. Δείγματα ζώντων οργανισμών.

Η ποιότητα του νερού ενός θαλάσσιου αποδέκτη συνυπολογίζεται στην εκτίμηση της γενικής κατάστασης ρύπανσης του αποδέκτη αλλά υπόκειται σε εποχιακές διακυμάνσεις και επηρεάζεται από τις εκάστοτε μετεωρολογικές συνθήκες (ένταση ανέμων, ένταση και διεύθυνση θαλάσσιων ρευμάτων, βροχοπτώσεις κλπ). Η εκτίμηση της ποιότητας του θαλασσινού νερού τουλάχιστον όσον αφορά για τον χαρακτηρισμό ως αποδέκτη βασίζεται στον προσδιορισμό κλασσικών φυσικοχημικών παραμέτρων καθώς και θρεπτικών αλάτων, οι συγκεντρώσεις των οποίων προσδιορίζουν ευτροφικές ή ολιγοτροφικές καταστάσεις.

Η μέτρηση του ρυπαντικού φορτίου του επιφανειακού στρώματος των πυθμένων δεν υπόκειται σε εποχιακές μεταβολές και παρέχει τη δυνατότητα του προσδιορισμού

των μεταβολών στο χρόνο με δειγματοληψίες ανά αραιά χρονικά διαστήματα (ετήσια ή και μεγαλύτερα).

Κατευθυντήριες Γραμμές για την Ποιότητα των Ιζημάτων (Sediment Quality Guidelines, SQGs) αναπτύχθηκαν προκειμένου να χρησιμεύσουν ως εργαλεία για το σχεδιασμό και την υλοποίηση προγραμμάτων παρακολούθησης και αποκατάστασης θαλάσσιων περιοχών (MacDonald *et al.*, 2000). Οι κατευθυντήριες αυτές γραμμές καθορίζουν δύο επίπεδα συγκεντρώσεων των χημικών ρυπαντών. Το πρώτο επίπεδο αφορά στη συγκέντρωση της υπό εξέταση ένωσης μέχρι την οποία θεωρείται απίθανο να προκληθούν επιπτώσεις στο οικοσύστημα ενώ το δεύτερο επίπεδο αφορά σε συγκέντρωση πάνω από την οποία είναι πιθανόν να προκληθούν επιπτώσεις στο οικοσύστημα. Δύο τέτοια παραδείγματα είναι οι τιμές ERL/ERM (Effects Range Low/Effects Range Median) και TEL/PEL (Threshold Effects Level/Probable Effects Level). Τα ERL και TEL αναφέρονται στην πρώτη βαθμίδα συγκεντρώσεων, ενώ τα ERM και PEL στη δεύτερη βαθμίδα. Συνήθως η εκτίμηση της τοξικότητας των δειγμάτων ιζημάτων πραγματοποιείται μέσω υπολογισμών που βασίζονται στις τιμές ERM ή PEL (Burton 2002). Τα SQGs μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ταξινομήσουν τα ιζήματα ως προς τις πιθανότητες να προκληθεί τοξικότητα σε ζώντες οργανισμούς και να κατηγοριοποιήσουν τις υπό εξέταση περιοχές ανάλογα με τη συχνότητα και το βαθμό που ξεπερνούν τις κατευθυντήριες γραμμές (Long and MacDonald, 1998). Το ERL και ERM ενός χημικού ρυπαντή αριθμητικά είναι αντίστοιχα το 10^ο και 50^ο εκατοστημόριο της κατανομής των συγκεντρώσεων του συγκεκριμένου ρύπου που προκαλεί βιολογικές επιπτώσεις. Για την εξαγωγή των TEL και PEL χρησιμοποιήθηκαν οι γεωμετρικοί μέσοι των εκατοστημορίων των κατανομών των συγκεντρώσεων του ρύπου λαμβάνοντας υπόψη και τις συγκεντρώσεις όπου δεν εμφανίζονται επιπτώσεις στα βιολογικά συστήματα.

Ο αριθμητικός δείκτης του ολικού επιπέδου ρύπανσης είναι το μέσο ERM ή PEL πηλίκου το οποίο ορίζεται ως ο μέσος όρος των λόγων των χημικών συγκεντρώσεων στα δείγματα ιζημάτων και των αντίστοιχων ERM ή PEL τιμών. Αυτά τα πηλικά ουσιαστικά αποτελούν μέτρο της παρουσίας μιγμάτων χημικών ρύπων σε διαφορετικές συγκεντρώσεις που μπορεί να έχουν αθροιστικές τοξικές επιπτώσεις στο οικοσύστημα (Long and MacDonald, 1998). Τα SQGs μπορούν να χρησιμοποιηθούν επιτυχώς για την ταξινόμηση χημικών ρύπων αλλά και περιοχών μέσω της αντιστοίχισης του αριθμού των SQGs που εμφανίζουν υπέρβαση και του μέσου SQG πηλίκου με τις πιθανότητες που υπάρχουν να παρουσιαστεί τοξικότητα στο υπό εξέταση οικοσύστημα (Long and MacDonald, 1998).

Μία διαφορετική προσέγγιση στο θέμα της τοξικότητας των ιζημάτων ακολουθήθηκε από τον Håkanson το 1980, ο οποίος εισήγαγε τις έννοιες των «δεικτών ρύπανσης» και του «βαθμού ρύπανσης» ως διαγνωστικά μέσα για την εκτίμηση και τον έλεγχο της ρύπανσης. Ένας δείκτης ρύπανσης λαμβάνει υπόψη του τη ρύπανση από μία μόνο ουσία ή στοιχείο και ορίζεται ως ο λόγος της μέσης συγκέντρωσης της εν λόγω ουσίας ή στοιχείου σε τουλάχιστον πέντε δείγματα της υπό εξέταση περιοχής προς την αντίστοιχη συγκέντρωση αναφοράς της ουσίας στην προ-βιομηχανική εποχή. Το άθροισμα των επιμέρους δεικτών ρύπανσης για όλες τις εξεταζόμενες ουσίες σε μία συγκεκριμένη περιοχή καλείται βαθμός ρύπανσης και αντιπροσωπεύει την συνολική ρύπανση των ιζημάτων στην περιοχή αυτή.

Τα δίθυρα οστρακοειδή αποτελούν πολύ καλό δείκτη της κατάστασης ρύπανσης ενός θαλάσσιου οικοσυστήματος δεδομένου ότι τα δίθυρα είναι χαρακτηριστικά είδη διηθητικού τύπου και για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται διεθνώς.

Στην παρούσα μελέτη η κατάσταση της ποιότητας του θαλάσσιου αποδέκτη εκτιμήθηκε με συνυπολογισμό και των τριών προαναφερθέντων ειδών.

2. ΥΛΙΚΑ & ΜΕΘΟΔΟΙ

Ο Πατραϊκός Κόλπος έχει χαρακτηριστεί ως αποδέκτης επεξεργασμένων αστικών και βιομηχανικών αποβλήτων τα οποία παροχετεύονται σε αυτόν μέσω υποθαλάσσιων αγωγών που εκτείνονται από την ακτή μέχρι την ισοβαθή των 30 μέτρων, σε απόσταση περίπου 2 km από την ακτογραμμή.

Την πρώτη περίοδο της μελέτης (1993) διερευνήθηκε μία περιοχή μήκους περίπου 16 Km της νότιας περιοχής του Πατραϊκού παράλληλα με την ακτογραμμή και στην ισοβαθή των 10 m, από τον Πείρο έως τα Βραχνέικα. Καθορίστηκαν 4 περιοχές δειγματοληψίας, (Πείρος, Καμίνια, Τσουκαλέικα, Βραχνέικα) και ελήφθησαν δείγματα ιζημάτων, θαλασσινού νερού και οστρακοειδών καθ' όλη τη διάρκεια του έτους.

Τη δεύτερη περίοδο της μελέτης (2010) ελήφθησαν αντίστοιχα δείγματα από τις ανωτέρω περιοχές. Επιπλέον, ελήφθησαν δείγματα και από τις περιοχές στο δυτικό άκρο του Πατραϊκού (Μαύρη Μύτη) και στην περιοχή της εκβολής του αγωγού της ΔΕΥΑΠ (Παραλία Πατρών). Από όλες τις περιοχές ελήφθησαν δείγματα ιζημάτων από τις ισοβαθείς των 30 και 10 m. Στην εικόνα 1 παρουσιάζονται οι περιοχές δειγματοληψίας για τις δύο περιόδους, ενώ ειδικά για το 2010 επισημαίνονται τα ακριβή σημεία.

Η περιοχή Μαύρη Μύτη επιλέχθηκε ως αναφορά για «μη ρυπασμένη περιοχή». Στην ακτή της περιοχής αυτής δεν υπάρχει κάποιος οικισμός και επιπλέον ο πλους των πλοίων είναι αρκετά βορειότερα, πλησίον της ακτής της Αιτωλοακαρνανίας. Τα δείγματα αυτά θεωρήθηκαν αντιπροσωπευτικά του φυσικού οικοσυστήματος της περιοχής που ελέγχεται και χρησιμοποιήθηκαν ως βάση αναφοράς για τη σύγκριση με τα δείγματα στα σημεία του υποθαλάσσιου αγωγού.



Εικόνα 1: Περιοχές δειγματοληψίας στον Πατραϊκό Κόλπο (1993 & 2010).

Συνολικά το 1993 ελήφθησαν 61 δείγματα ιζημάτων, 42 δείγματα θαλασσινού νερού και 30 δείγματα διθύρων. Το 2010 ελήφθησαν 18 δείγματα ιζημάτων (9 από την ισοβαθή των 10 m και 9 από αυτήν των 30 m), 25 δείγματα θαλασσινού νερού και 6 δείγματα διθύρων.

Η συλλογή των ιζημάτων από τα σημεία δειγματοληψίας πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια χειροκίνητης αρπάγης τύπου Petersen grab ενώ η λήψη των δειγμάτων θαλασσινού νερού πραγματοποιήθηκε με τη χρήση ειδικού δειγματολήπτη βάρους, 0,30 m κάτω από την επιφάνεια, στο μέσο και 1 m επάνω από τον πυθμένα στην εκάστοτε υδάτινη στήλη. Τα δίθυρα ελήφθησαν με τη βοήθεια δύτε.

2.1 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

Στα ιζήματα προσδιορίστηκαν οι κάτωθι παράμετροι: pH, οργανικό υλικό (%), μόλυβδος (Pb), κάδμιο (Cd), ψευδάργυρος (Zn), χαλκός (Cu), υδράργυρος (Hg), χρώμιο (Cr), νικέλιο (Ni), αργίλιο (Al), λίθιο (Li), ασβέστιο (Ca) και τοξικές οργανικές ενώσεις (PAHs, PCBs).

Στα δείγματα νερού προσδιορίστηκαν οι συγκεντρώσεις των κάτωθι παραμέτρων: pH, θερμοκρασία, δυναμικό οξειδοαναγωγής, αλατότητα, αγωγιμότητα, διαλυμένο οξυγόνο, νιτρικά, αμμωνία, φωσφόρος, Pb, Cd, Zn, Cu, Hg, Cr, PAHs και PCBs ενώ στα δίθυρα έγινε προσδιορισμός βαρέων μετάλλων και τοξικών οργανικών ενώσεων.

Για τον προσδιορισμό του pH, του ολικού οργανικού φορτίου και των μετάλλων στα ιζήματα ακολουθήθηκε παρόμοια διαδικασία με προηγούμενη εργασία των συγγραφέων (Leotsinidis and Sazakli 2008). Η πιστότητα και η ακρίβεια των προσδιορισμών του οργανικού άνθρακα και των μετάλλων ελέγχθηκαν με χρήση πιστοποιητικού υλικού αναφοράς, το ίζημα IAEA soil-7 και βρέθηκε απόκλιση <5% από τις τιμές αναφοράς. Η επαναληψιμότητα προσδιορίστηκε σε $\pm 10\%$.

Ελέγχθηκε η παρουσία των PCBs Aroclor 1221, 1242, 1016 και των 16 PAHs acenaphthene, acenaphthylene, anthracene, benzo(a)anthracene, benzo(a)pyrene, benzo(b)fluoranthene, benzo(ghi)perylene, benzo(k)fluoranthene, chrysene, dibenzo(a,h)anthracene, fluoranthene, fluorine, indeno(1,2,3-cd)pyrene, naphthalene, phenanthrene και pyrene. Η προετοιμασία των δειγμάτων έγινε σύμφωνα με τους Purcaro *et al.* (2009). Περιληπτικά, η μέθοδος βασίζεται σε εκχύλιση των οργανικών ουσιών με μίγμα διαλυτών (εξάνιο, ακετόνη). Η εκχύλιση λαμβάνει χώρα υπό πίεση σε δοχεία πίεσης από teflon με τη βοήθεια μικροκυμάτων. Ο προσδιορισμός των PCBs έγινε με βάση το πρωτόκολλο της Supelco 817C (1996), ενώ των PAHs με το πρωτόκολλο Varian Application Note no. 7.

Οι φυσικοχημικές παράμετροι στα δείγματα θαλασσινού νερού προσδιορίστηκαν με κατάλληλα φορητά όργανα (pHμετρο HACH sensION1, αγωγιμόμετρο WTW Cond 315i, Redox HACH Sension 1, οξυγονόμετρο HACH Sension 6). Ο προσδιορισμός των ανόργανων μορφών αζώτου (νιτρικά, αμμωνία) βασίστηκε στις μεθόδους 4500-NO₃⁻.E και ASTM 1426-08 αντίστοιχα, ενώ ο προσδιορισμός του ολικού φωσφόρου στη μέθοδο 4500-P. B, C (APHA 2005).

Τα δίθυρα του γένους *Pinna squamoza* τοποθετήθηκαν στην κατάψυξη για 24 ώρες. Κατόπιν αφαιρέθηκαν οι ιστοί, ομογενοποιήθηκαν, τοποθετήθηκαν σε σύστημα εξάχνωσης υπό ψύξη (freeze-dry) αφού πρώτα ζυγίστηκε το συνολικό υγρό βάρος του προς ξήρανση ιστού και προσδιορίστηκαν τα μέταλλα και οι τοξικές οργανικές ενώσεις με ίδια μεθοδολογία με αυτήν για τα ιζήματα (χώνευση σε διάλυμα οξέων κλπ).

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1 ΙΖΗΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα του προσδιορισμού pH και οργανικού κλάσματος στα δείγματα ιζημάτων παρουσιάζονται στον πίνακα 1, ενώ στον πίνακα 2 παρουσιάζονται οι αντίστοιχες συγκεντρώσεις των μετάλλων.

Όσον αφορά στις οργανικές ενώσεις, κατά τη δειγματοληψία του 2010 σε κανένα δείγμα ανιχνεύθηκε κάποιο PCB (<0,5 ppb), ενώ σε δύο μόνο δείγματα ανιχνεύθηκε acenaththene σε χαμηλές συγκεντρώσεις (0,02 και 0,04 $\mu\text{g/g}$).

Πίνακας 1. Τιμές pH και ποσοστού οργανικού κλάσματος στα ιζήματα σε κάθε περιοχή για τα έτη 2010 και 1993.

Έτος	Σημείο	n	pH		Loss-on-ignition (%)		Ολικός Οργανικός Ανθρακας (%)	
			μ.τ.*	τ.α.**	μ. τ.	τ.α.	μ. τ.	τ.α.
2010	Αναφορά	2	7,3	0,1	5,3	1,7	1,6	0,4
	Πείρος	8	7,2	0,1	7,3	1,1	1,9	0,5
	Τσουκαλέικα - Βραχνέικα	4	7,3	0,1	8,6	1,4	2,3	0,4
	Παραλία Πατρών	4	7,2	0,1	7,0	0,8	2,0	0,3
1993	Πείρος	9	8,0	0,2	6,0	0,2	1,9	0,3
	Τσουκαλέικα	17	8,0	0,3	5,4	1,6	1,6	0,4
	Βραχνέικα	17	8,0	0,2	5,1	1,4	1,4	0,4
	Καμίνια	18	8,1	0,2	5,0	1,3	1,4	0,4

*μ.τ.: Μέση τιμή ** τ.α.: τυπική απόκλιση

Πίνακας 2. Συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων στα ιζήματα κατά τα έτη 2010 και 1993.

Έτος	Σημείο	n	Cu (μg/g)		Zn (μg/g)		Cr (μg/g)		Cd (μg/g)		Pb (μg/g)		Ni (μg/g)		Hg (μg/g)		Li (μg/g)		Al (%)		Ca (%)	
			μ.τ.*	τ.α.**	μ. τ.	τ.α.	μ. τ.	τ.α.	μ. τ.	τ.α.	μ. τ.	τ.α.	μ. τ.	τ.α.	μ. τ.	τ.α.	μ. τ.	τ.α.	μ. τ.	τ.α.	μ. τ.	τ.α.
2010	Αναφορά	2	19,04	8,48	39,9	16,7	175,60	20,65	0,04	0,01	8,13	2,97	96,70	30,50	<0,30	-	16,09	3,11	3,58	0,67	2,15	1,86
	Πείρος	8	32,08	2,95	60,5	7,5	174,18	39,39	0,10	0,01	11,28	6,88	122,20	9,95	<0,30	-	21,93	1,65	4,79	1,04	0,97	1,06
	Τσουκαλέικα - Βραχνέικα	4	29,04	3,60	60,0	7,1	172,55	19,93	0,08	0,01	10,40	1,39	108,50	17,81	<0,30	-	22,35	3,19	3,87	1,82	2,25	1,56
	Παραλία Πατρών	4	37,25	2,62	60,0	8,6	194,40	9,59	0,10	0,01	11,22	2,65	92,78	15,25	<0,30	-	18,43	4,32	1,78	0,76	4,23	0,36
1993	Πείρος	9	45,91	9,87	498,0	134,0	150,64	20,73	0,44	0,03	32,27	5,00	144,47	12,76	0,36	0,16						
	Τσουκαλέικα	17	32,13	4,81	193,4	71,2	141,49	18,40	0,47	0,09	29,72	8,05	106,14	12,82	0,59	0,23						
	Βραχνέικα	17	32,82	8,30	168,9	76,7	143,32	19,58	0,44	0,07	29,20	3,11	127,59	8,71	0,62	0,25						
	Καμίνια	18	35,86	6,89	185,3	97,8	143,53	17,98	0,40	0,07	24,72	3,48			0,71	0,26						

*μ.τ.: Μέση τιμή ** τ.α.: τυπική απόκλιση

3.2 ΘΑΛΑΣΣΙΝΑ ΝΕΡΑ

Οι φυσικοχημικές παράμετροι στα δείγματα θαλασσινών νερών ήταν παρόμοιες για τις περιόδους 1993 και 2010 και παρουσιάζονται στον πίνακα 3.

Πίνακας 3. Φυσικοχημικές παράμετροι των δειγμάτων θαλασσινού νερού κατά τα έτη 2010 και 1993.

Έτος	n	Θερμοκρασία	pH	Αγωγιμότητα	Αλατότητα	NH ₃ _N	P (mg/l)
		(°C)		(μS/cm)	(‰)	(mg/l)	
		μ. τ.*. (τ.α.**.)	μ. τ. (τ.α.)	μ. τ. (τ.α.)	μ. τ. (τ.α.)	μ. τ. (τ.α.)	μ. τ. (τ.α.)
2010	25	23,3 (0,4)	8,1 (0,0)	52170 (170)	38,6 (0,2)	0,17 (0,03)	0,01 (0,01)
1993	42	19,0 (1,1)	7,9 (0,1)	53014 (140)	38,7 (0,3)	0,22 (0,07)	0,20 (0,10)

*μ.τ.: Μέση τιμή ** τ.α.: τυπική απόκλιση

Σημαντική μείωση παρουσίασαν οι συγκεντρώσεις του φωσφόρου στα δείγματα νερού κατά το έτος 2010 (μέση τιμή 0,01 mg/l P) έναντι των αντίστοιχων συγκεντρώσεων το έτος 1993 (μέση τιμή 0,20 mg/l P) (t-test, p=0,01).

Το διαλυμένο οξυγόνο προσδιορίστηκε στην επιφάνεια της θάλασσας σε κάθε σημείο δειγματοληψίας και ο κορεσμός κυμάνθηκε από 95% έως 101% κατά το έτος 2010, ενώ το 1993 κυμάνθηκε από 96% έως 111%.

Στον πίνακα 4 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις των μετάλλων στα δείγματα θαλασσινού νερού.

Πίνακας 4. Συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων στα δείγματα θαλασσινού νερού κατά τα έτη 2010 και 1993.

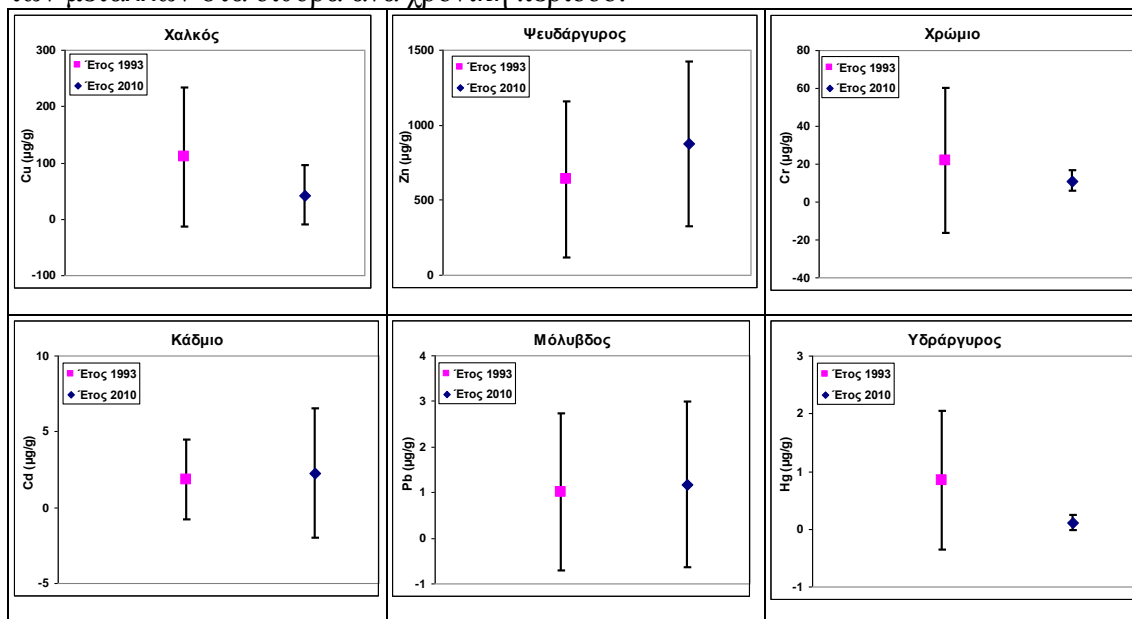
Έτος	Περιοχή	n	Cu (μg/l)		Zn (μg/l)		Cr (μg/l)		Hg (μg/l)		Cd (μg/l)		Pb (μg/l)	
			μ.τ.*	τ.α.**	μ.τ.	τ.α.	μ.τ.	τ.α.	μ.τ.	τ.α.	μ.τ.	τ.α.	μ.τ.	τ.α.
2010	Αναφορά	4	0,99	0,71	5,4	6,9	0,35	0,10	<0,30	-	0,17	0,06	0,49	0,10
	Πείρος	10	3,93	3,90	3,9	2,7	0,28	0,15	<0,30	-	0,21	0,06	0,94	0,33
	Τσουκαλείκ α -	6	1,79	0,89	3,3	2,3	<0,20	-	<0,30	-	0,21	0,06	0,81	0,09
	Βραχνείκα Παραλία Πατρών	5	1,19	0,31	4,3	3,5	<0,20	-	<0,30	-	0,19	0,05	1,02	0,13
1993	Πείρος	6					0,44	0,33	<0,30	-	0,28	0,05	0,79	0,18
	Τσουκαλείκ α	12					0,20	0,25	<0,30	-	0,20	0,07	0,74	0,24
	Βραχνείκα	12					0,22	0,24	<0,30	-	0,22	0,04	0,64	0,22
	Καμίνια	12					0,47	0,25	<0,30	-	0,20	0,08	0,66	0,31

*μ.τ.: Μέση τιμή ** τ.α.: τυπική απόκλιση

Πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες και πολυχλωριωμένα διφαινύλια δεν ανιχνεύθηκαν σε κάποιο δείγμα θαλασσινού νερού κατά το έτος 2010, ενώ το 1993 ανιχνεύθηκαν DDT και Lindane στα όρια της ανιχνευσιμότητας.

3.3 ΖΩΝΤΕΣ ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΙ

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζονται συγκριτικά οι κατανομές των τιμών των μετάλλων στα δίθυρα ανά χρονική περίοδο.



Σχήμα 1: Μέσες τιμές των συγκεντρώσεων των διαφόρων παραμέτρων στα δίθυρα το 1993 και το 2010.

Όσον αφορά στις οργανικές ενώσεις που διερευνήθηκαν ήταν κάτω του ορίου ανιχνευσιμότητας σε όλα τα δείγματα διθύρων κατά το έτος 2010.

4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ

4.1 ΙΖΗΜΑΤΑ

4.1.1. Εκτίμηση τοξικότητας ιζημάτων με βάση τις κατευθυντήριες τιμές ERM και PEL

Οι τιμές των ERM και PEL (είναι οι τιμές επάνω από τις οποίες υπάρχει πιθανότητα να προκληθούν επιπτώσεις στο οικοσύστημα), για τα μέταλλα που εξετάστηκαν παρατίθενται στον πίνακα 5 (Long and MacDonald, 1998).

Ο χαρακτηρισμός των περιοχών γίνεται με βάση τις μέσες τιμές λόγω ως προς ERM και ως προς PEL όπως παρουσιάζεται στον πίνακα 6.

Πίνακας 5. Τιμές ERM και PEL ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ επί ξηρού βάρους)

Παράμετρος	ERM	PEL
Cu	270	108,2
Zn	410	271
Cr	370	160,4
Cd	9,6	4,2
Pb	218	112,2
Ni	51,6	42,8
Hg	0,71	0,7

Πίνακας 6. Χαρακτηρισμός των περιοχών με βάση το μέσο πηλίκο ως προς ERM και PEL.

Μέσο ERM πηλίκο	Μέσο PEL πηλίκο	Επίπεδο ρύπανσης
<0,10	<0,10	Χαμηλό
0,11-0,50	0,11-1,50	Μέτριο-χαμηλό
0,51-1,50	1,51-2,30	Μέτριο-υψηλό
>1,50	>2,30	Υψηλό

Σύμφωνα με τα ανωτέρω, τα ιζήματα χαρακτηρίζονται όπως φαίνεται στον πίνακα 7.

Πίνακας 7. Χαρακτηρισμός με βάση τη μέση τιμή των λόγων ως προς ERM και PEL.

Περιοχή	1993		2010		Επίπεδο ρύπανσης	
	Μέσο ERM πηλίκο	Μέσο PEL πηλίκο	Μέσο ERM πηλίκο	Μέσο PEL πηλίκο	1993	2010
Αναφορά			0,40	0,57		Μέτριο-χαμηλό
Πείρος	0,76	1,07	0,48	0,69	Μέτριο – υψηλό ¹ Μέτριο-χαμηλό ²	Μέτριο-χαμηλό
Τσουκαλείκα	0,58	0,80	0,44	0,63	Μέτριο – υψηλό ¹ Μέτριο-χαμηλό ²	Μέτριο-χαμηλό
Βραχνείκα	0,64	0,86	0,46	0,65	Μέτριο – υψηλό ¹ Μέτριο-χαμηλό ²	Μέτριο-χαμηλό
Παραλία			0,41	0,61		Μέτριο-χαμηλό
Καμίνια	0,35	0,54			Μέτριο-χαμηλό	

¹: ως προς ERM πηλίκο ²: ως προς PEL πηλίκο

Όπως φαίνεται και από τον πίνακα 7, όλες οι περιοχές κατά τη περίοδο 2010 χαρακτηρίζονται ως μέτριας-χαμηλής ρύπανσης, με πιθανότητες 25-30% να προκαλέσουν τοξικότητα σε αμφίποδα (MacDonald *et al.*, 2000), σε αντίθεση με την περίοδο 1993 κατά την οποία τρεις περιοχές που εξετάστηκαν χαρακτηρίστηκαν ως μέτριας – υψηλής ρύπανσης ως προς το μέσο ERM πηλίκο, με πιθανότητες 46-53% πρόκλησης τοξικότητας (MacDonald *et al.*, 2000).

4.1.2. Εκτίμηση τοξικότητας ιζημάτων με βάση τη σύγκριση με την περιοχή αναφοράς.

Ο χαρακτηρισμός σύμφωνα με τον δείκτη ρύπανσης (Contamination Factor C_f^i) για τη κάθε τοξική προς διερεύνηση ουσία έχει ως εξής:

$C_f^i < 1$ χαμηλός δείκτης ρύπανσης

$1 \leq C_f^i < 3$ μέτριος δείκτης ρύπανσης

$3 \leq C_f^i < 6$ σημαντικός δείκτης ρύπανσης

$C_f^i \geq 6$ πολύ υψηλός δείκτης ρύπανσης

Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται οι λόγοι των συγκεντρώσεων των μετάλλων (Contamination factor) στις υπό εξέταση περιοχές σε σχέση προς τη τιμή της περιοχής αναφοράς.

Πίνακας 8: Λόγοι των συγκεντρώσεων των μετάλλων (Contamination factor) στις υπό εξέταση περιοχές σε σχέση προς τη τιμή της περιοχής αναφοράς.

Έτος	Περιοχή	Cu	Zn	Cr	Cd	Pb	Ni	Hg
2010	Πείρος	1,68	1,52	0,90	2,87	1,39	1,26	1,00
	Τσουκ-Βραχνείκα	1,52	1,51	0,98	2,25	1,28	1,12	1,31
	Παραλία Πατρών	1,96	1,51	1,11	2,95	1,38	0,96	1,00
1993	Πείρος	2,41	12,50	0,78	12,48	3,97	1,49	2,40
	Τσουκαλείκα	1,69	4,85	0,73	13,34	3,65	1,10	3,93
	Βραχνείκα	1,72	4,24	0,74	12,48	3,59	1,32	4,13
	Καμίνια	1,88	4,65	0,74	11,35	3,04		4,73

Το άθροισμα όλων των δεικτών ρύπανσης ορίζεται ως βαθμός ρύπανσης (contamination degree) για μία συγκεκριμένη περιοχή. Τα ιζήματα μπορούν να χαρακτηρισθούν ως προς το επίπεδο ρύπανσής τους με υπολογισμό του λόγου C_d/n και σύμφωνα με τον πίνακα 9.

Πίνακας 9. Χαρακτηρισμός ιζημάτων ανάλογα με το βαθμό ρύπανσης

Τιμή μέσου όρου λόγων (C_d)	Επίπεδο ρύπανσης
$(C_d/n^+) < 1$	Χαμηλό
$1 \leq (C_d/n) < 2$	Μέτριο
$2 \leq (C_d/n) < 4$	Σημαντικό
$(C_d/n) \geq 4$	Πολύ υψηλό

⁺ όπου n: ο αριθμός των τοξικών στοιχείων ή ενώσεων που εξετάστηκαν

Πίνακας 10. Χαρακτηρισμός ιζημάτων ανάλογα με το βαθμό ρύπανσης για κάθε περιοχή.

Έτος	Περιοχή	Μέσοι λόγοι βαθμού ρύπανσης (C_d/n)	Επίπεδο ρύπανσης
2010	Πείρος	1,52	Μέτριο
	Τσουκ-Βραχνείκα	1,41	Μέτριο
	Παραλία Πατρών	1,55	Μέτριο
1993	Πείρος	5,15	Πολύ υψηλό
	Τσουκαλείκα	4,18	Πολύ υψηλό
	Βραχνείκα	4,03	Πολύ υψηλό
	Καμίνια	4,40	Πολύ υψηλό

Από τον πίνακα 10 προκύπτει ότι το 1993 τα ιζήματα όλων των υπό μελέτη περιοχών χαρακτηρίζονται ως πολύ υψηλά ρυπασμένα ενώ δεκαεπτά χρόνια αργότερα ως μέτρια ρυπασμένα. Η διαφοροποίηση του χαρακτηρισμού μέσω του βαθμού ρύπανσης, ο οποίος λαμβάνει υπόψη του το εκάστοτε φυσικό περιβάλλον και τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά, καταδεικνύει τη μεγαλύτερη ευαισθησία του για τη χρήση του ως «εργαλείο» στην εκτίμηση μιας θαλάσσιας περιοχής.

4.1.3 Ανάλυση παραγόντων

Στις προσδιορισθείσες τιμές των μετάλλων διενεργήθηκε ανάλυση παραγόντων (factor analysis) (Kleinbaum et al., 1988). Η ανάλυση έδειξε τέσσερις παράγοντες που εξηγούν το 86,1% της διακύμανσης. Ο πρώτος παράγοντας εμφανίζει κορεσμό στις τιμές των μετάλλων Al, Li, Ni και μπορεί να αποδοθεί στη γεωλογική σύσταση των ιζημάτων. Ο δεύτερος παράγοντας περιλαμβάνει τα μέταλλα Cu, Zn, Cd και εν μέρει Ni και μπορεί να αποδοθεί σε ανθρωπογενούς προέλευσης ρύπανση. Ο τρίτος παράγοντας εμφανίζει κορεσμό στις συγκεντρώσεις των μετάλλων Cr και Ca, γεγονός που υποδεικνύει ότι το χρώμιο είναι φυσικής προέλευσης στον Πατραϊκό Κόλπο. Είναι σαφές ότι το Al και το Ca είναι αρνητικά σχετιζόμενα (αργιλικά πετρώματα έναντι ασβεστολιθικών). Τέλος ο τέταρτος παράγοντας περιλαμβάνει τον μόλυβδο και το οργανικό κλάσμα (το οποίο εμφανίζεται και στους άλλους παράγοντες). Ο παράγοντας αυτός μπορεί να ονομασθεί «οργανική ρύπανση».

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο Πατραϊκός Κόλπος είναι ένας σχετικά κλειστός κόλπος, ο οποίος μέχρι και προ εικοσαετίας, δεχόταν ανεπεξέργαστα βιομηχανικά και αστικά λύματα. Η δημιουργία μονάδων επεξεργασίας για το μεγαλύτερο όγκο των αποβλήτων είχε ως αποτέλεσμα τη διαφοροποίηση της κατάστασης ρύπανσης της περιοχής. Όσον αφορά στα θαλασσινά νερά η σημαντική μείωση του φωσφόρου υποδεικνύει την αποφυγή ευτροφικών συνθηκών. Παρατηρήθηκε σημαντική μείωση των συγκεντρώσεων των μετάλλων, που η ανάλυση παραγόντων έδειξε ότι είναι κυρίως ανθρωπογενούς προέλευσης, τόσο στα ιζήματα όσο και στα δίθυρα οστρακοειδή. Το χρώμιο διατηρείται στα ίδια επίπεδα ως αναμένετο δεδομένης της φυσικής του προέλευσης.

Ο συνδυασμός των ανωτέρω οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η λειτουργία του υποθαλάσσιου αγωγού της ΒΙ.ΠΕ σε συνδυασμό με τη λειτουργία του αγωγού της ΔΕΥΑ Πάτρας και επομένως η παύση της ανεξέλεγκτης απόρριψης ανεπεξέργαστων αστικών αποβλήτων, έχει οδηγήσει σε σημαντική βελτίωση της κατάστασης στη νότια περιοχή του Πατραϊκού Κόλπου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- APHA, 2005. *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 21st edition, Washington DC.
- ASTM standard D1426-08. Standard Test Methods for Ammonia Nitrogen in Water.
- Burton, G.A., 2002. *Sediment quality criteria in use around the world*. Limnology, 3: 65–75.
- Hakanson, L., 1980. *An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach*. Wat. Res., 14: 975–1001.
- Kleinbaum, D.G., Kupper, L.L., Muller, K.E., 1988. *Applied Regression Analysis and other Multivariable Methods*. PWS-KENT, Boston, pp. 595-641.
- Leotsinidis, M. and Sazakli, E., 2008. *Evaluating contamination of dredges and disposal criteria in Greek coastal areas*. Chemosphere, 72: 811-818.
- Long, E.R. and MacDonald, D.D., 1998. *Recommended uses of empirically derived, sediment quality guidelines for marine and estuarine ecosystems*. Human and Ecological Risk Assessment, 4: 1019-1039.

- MacDonald, D.D., Ingersoll, C.G. and Berger, T.A., 2000. *Development and evaluation of consensus-based Sediment Quality Guidelines for freshwater ecosystems*. Arch. Environ. Contam. Toxicol., 39: 20–31.
- Purcaro, G., Moret S. and Conte L.S., 2009. *Optimisation of microwave assisted extraction (MAE) for polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) determination in smoked meat*. Meat Science, 81: 275-280.
- Supelco Bulletin 817C, 1996. Analyses of Polychlorinated Biphenyl (PCB) mixtures and individual congeners by GC. Sigma-Aldrich publications. Available on line: <http://www.sigmaaldrich.com/Graphics/Supelco/objects/4500/4495.pdf>
- Varian INC. Identification of Polynuclear Aromatic Hydrocarbons in a Complex Matrix with Diode Array Detection. LC Varian Application Note No 8

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗΣ ΣΕ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΑΡΟΧΗΣ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΣΤΕΡΕΟΠΑΡΟΧΗΣ ΣΤΟΝ ΠΟΤΑΜΟ ΝΕΣΤΟ

Ιωάννης Αγγέλης¹, Βλάσιος Χρυσάνθου^{1*}

¹Τομέας Υδραυλικών Έργων, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών,
Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, 67100 Ξάνθη
*Στοιχεία επικοινωνίας: vhriisan@civil.duth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στον ποταμό Νέστο διεξήχθησαν συστηματικές μετρήσεις παροχής νερού και στερεοπαροχής σε διατομές μεταξύ της εξόδου της λεκάνης απορροής του ποταμού (Τοξότες) και του δέλτα. Σημειωτέον ότι διεξήχθησαν χωριστά μετρήσεις στερεοπαροχής κοίτης και μετρήσεις στερεοπαροχής αιωρούμενων φερτών υλών. Με εφαρμογή μη γραμμικής παλινδρόμησης σε ζεύγη τιμών παροχής νερού και στερεοπαροχής κοίτης προέκυψε, μετά από δοκιμές διαφόρων καμπυλών, μια πολυωνυμική καμπύλη τετάρτου βαθμού επί τη βάσει 63 μετρήσεων. Ο συντελεστής προσδιορισμού, R^2 , λαμβάνει την τιμή 0.62. Επιπλέον, με εφαρμογή μη γραμμικής παλινδρόμησης σε ζεύγη τιμών παροχής νερού και στερεοπαροχής αιωρούμενων φερτών υλών προέκυψε, πάλι μετά από δοκιμές διαφόρων καμπυλών, μια πολυωνυμική καμπύλη πέμπτου βαθμού επί τη βάσει 65 μετρήσεων. Σ' αυτήν την περίπτωση, ο συντελεστής προσδιορισμού λαμβάνει την τιμή 0.95.

APPLICATION OF REGRESSION ANALYSIS TO MEASUREMENTS OF WATER DISCHARGE AND SEDIMENT TRANSPORT IN NESTOS RIVER

Ioannis Angelis¹, Vlassios Hrissanthou^{1*}

¹Section of Hydraulic Engineering, Department of Civil Engineering,
Democritus University of Thrace, 67100 Xanthi
*Corresponding author: vhriisan@civil.duth.gr

ABSTRACT

Systematic measurements of water discharge and sediment transport were conducted in the Nestos River, at cross sections located between the outlet of Nestos River basin and the river delta. Separate measurements of bed load transport and suspended load transport were conducted. A nonlinear regression curve (polynomial curve of 4th degree) between bed load transport rates and water discharge, on the basis of 63 measurements, was developed. The coefficient of determination, R^2 , equals 0.62. In addition, a nonlinear regression curve (polynomial curve of 5th degree) between suspended load transport rates and water discharge, on the basis of 65 measurements, was developed. In this case, R^2 , equals 0.95.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα φερτά υλικά που μεταφέρονται σ' ένα υδατόρρευμα, διακρίνονται σε φορτίο κοίτης και σε φορτίο αιωρούμενων υλών, ανάλογα με τον τρόπο μεταφοράς τους. Το μεταφερόμενο φορτίο κοίτης εξαρτάται πρωτίστως από τα υδραυλικά χαρακτηριστικά του υδατορρέυματος, π.χ. παροχή, συντίθεται κυρίως από χονδρόκοκκα υλικά και προέρχεται από τη διάβρωση της κοίτης του υδατορρέυματος. Το μεταφερόμενο φορτίο αιωρούμενων υλών προέρχεται τόσο από τα προϊόντα της εδαφικής διάβρωσης που εισρέουν στο θεωρούμενο υδατόρρευμα από τη γύρω λεκάνη απορροής, όσο και από τη διάβρωση της κοίτης του υδατορρέυματος, εξαρτάται, μάλιστα, τόσο από τα υδραυλικά χαρακτηριστικά του υδατορρέυματος, όσο και από τα χαρακτηριστικά της βροχής (π.χ. ύψος βροχής, ένταση βροχής). Τα προϊόντα της εδαφικής διάβρωσης, η οποία προκαλείται τόσο από την πρόσκρουση των σταγόνων της βροχής όσο και από την επιφανειακή απορροή, είναι λεπτόκοκκα υλικά. Ως εκ τούτου, όταν εισρέουν σ' ένα υδατόρρευμα, μεταφέρονται σε κατάσταση αιώρησης. Επειδή, όμως, οι μετρήσεις της στερεοπαροχής αιωρούμενων φερτών υλών, αλλά και της στερεοπαροχής κοίτης, δεν διεξήχθησαν μετά από επεισόδια βροχής, θα συσχετιστεί τόσο η στερεοπαροχή κοίτης όσο και η στερεοπαροχή αιωρούμενων υλών με την παροχή νερού.

Η εξάρτηση, γραμμική ή μη γραμμική, μεταξύ δύο μεταβλητών που προκύπτουν από μετρήσεις, μπορεί να υπολογιστεί με τη μέθοδο της παλινδρόμησης. Ένα ζεύγος μετρημένων μεταβλητών παρίσταται μ' ένα σημείο σ' ένα σύστημα ορθογωνίων συντεταγμένων. Η ως άνω εξάρτηση μπορεί να απεικονιστεί γραφικά με μια καμπύλη παλινδρόμησης. Ο βαθμός της γραμμικής εξάρτησης εκφράζεται από το συντελεστή συσχέτισης. Όταν ο συντελεστής συσχέτισης λαμβάνει την τιμή 1 ή -1, αυτό σημαίνει ότι όλα τα σημεία που παριστούν ζεύγη τιμών των μετρημένων μεταβλητών, κείνται στην καμπύλη (ευθεία) παλινδρόμησης, ή, με άλλα λόγια, η προσαρμογή της ευθείας παλινδρόμησης στα δεδομένα των μετρήσεων είναι τέλεια.

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν πολλές εξισώσεις παλινδρόμησης μεταξύ συγκέντρωσης ή στερεοπαροχής αιωρούμενων υλών και παροχής, για διάφορες περιοχές του κόσμου (π.χ. Walling, 1977, Griffiths, 1982, Córdova and González, 1997, Asselman, 2000, Achite and Ouillon, 2007, Sadeghi et al., 2008). Ειδικά για τον ποταμό Νέστο, υπάρχουν επίσης στη βιβλιογραφία εκτιμήσεις της στερεοπαροχής αιωρούμενων υλών (Πούλος και Αλεξανδράκης, 2005).

Το φορτίο κοίτης εκτιμάται, συνήθως, ως ποσοστό του φορτίου αιωρούμενων υλών στην έξοδο μιας λεκάνης απορροής. Η στερεοπαροχή κοίτης μπορεί να υπολογιστεί στη διατομή ενός υδατορρέυματος με τη βοήθεια ημιεμπειρικών τύπων (π.χ. Meyer-Peter und Müller, 1949, Einstein, 1950). Η έλλειψη μετρήσεων στερεοπαροχής κοίτης σε φυσικά υδατορρέυματα οφείλεται στο γεγονός ότι αυτές οι μετρήσεις εκτελούνται με μεγαλύτερες δυσκολίες σε σχέση προς τις μετρήσεις στερεοπαροχής αιωρούμενων υλών, λόγω των ανωμαλιών ή των σχηματισμών της κοίτης.

Ενώ η μέθοδος της παλινδρόμησης είναι πολύ χρήσιμη για τον υπολογισμό της στερεοπαροχής σε μια διατομή ενός υδατορρέυματος ως συνάρτησης της παροχής νερού, οι μηχανισμοί των φυσικών διαδικασιών για τη δημιουργία της στερεοπαροχής δεν λαμβάνονται υπόψη στην εν λόγω μέθοδο.

2. ΛΕΛΟΜΕΝΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Στον ποταμό Νέστο, σε θέσεις που κείνται ανάμεσα στην έξοδο της λεκάνης απορροής (Τοξότες) και στο δέλτα του ποταμού, διεξήχθησαν συστηματικές μετρήσεις παροχής νερού, στερεοπαροχής κοίτης και στερεοπαροχής αιωρούμενων υλών κατά τη

χρονική περίοδο 2005-2009, στα πλαίσια διπλωματικών εργασιών (Λειβαδίτης και Καπόγλης, 2006, Κλαδογένης και Χαλήλογλου, 2007, Λαμπρόπουλος και Τσούλος, 2009, Σταμουλάκης και Λαλιώτης, 2010, Λαζαρίδης κ. άλ., 2010, Αθηνοδώρου κ. άλ., 2010, Εβρένογλου κ. άλ., 2010, Χαλήλ κ. άλ., 2011, Αρβανίτης και Κηπουρίδης, 2011, Μουρατίδης και Σταυρόπουλος, 2011, Κρεμμύδας και Κληροδοτάκος, 2011, Δαρδαμανέλης και Κεχαγιόλου, 2011, Κολέτση και Μητσιολίδου, 2011).

Το τμήμα της λεκάνης απορροής του ποταμού Νέστου, το οποίο βρίσκεται κατάντη του φράγματος της Πλατανόβρυσης και του οποίου η έξοδος είναι στη θέση Τοξότες, έχει έκταση 838 km². Η εδαφοκάλυψη του μελετώμενου τμήματος της λεκάνης απορροής αποτελείται από δάσος (48%), θάμνους (20%), καλλιέργειες (24%), κατοικημένες περιοχές (2%) και περιοχές χωρίς σημαντική βλάστηση (6%). Το υψόμετρο του εν λόγω τμήματος κυμαίνεται από 80 m έως 1600 m, ενώ το μήκος του ποταμού Νέστου σ' αυτό το τμήμα είναι 55 km. Το μελετώμενο τμήμα υποδιαιρείται σε 20 υπολεκάνες, η έκταση των οποίων κυμαίνεται από 13 km² έως 80 km². Η μέση κλίση των υπολεκάνων είναι 37%, ενώ η μέση κλίση της κοίτης του Νέστου στο μελετώμενο τμήμα της λεκάνης απορροής είναι 0.345%.

Το πλάτος των διατομών, όπου εκτελέστηκαν οι μετρήσεις, κυμαίνεται μεταξύ 7 m και 152 m. Κάθε διατομή διαιρέθηκε σε επιμέρους τμήματα, και σε κάθε τμήμα χωριστά μετρήθηκε η μέση ταχύτητα ροής με τη βοήθεια ενός μιλίσκου. Η παροχή νερού σε κάθε τμήμα είναι το γινόμενο της μέσης ταχύτητας ροής και της επιφάνειας του τμήματος της διατομής. Η παροχή μέσω της όλης διατομής είναι το άθροισμα των παροχών των τμημάτων.

Αμέσως μετά τις μετρήσεις της ταχύτητας της ροής διεξήχθησαν οι μετρήσεις της στερεοπαροχής αιωρούμενων υλών και της στερεοπαροχής κοίτης. Συγκεκριμένα, από το μέσο περίπου κάθε διατομής ελήφθη δείγμα νερού, το οποίο περιείχε αιωρούμενες ύλες. Η συγκέντρωση των αιωρούμενων υλών προσδιορίστηκε σε εργαστήριο του Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος ΔΠΘ. Η στερεοπαροχή αιωρούμενων υλών, m_s (kg/s), υπολογίζεται από την κάτωθι σχέση:

$$m_s = C_s Q \quad (2.1)$$

όπου

C_s : συγκέντρωση αιωρούμενων υλών για την όλη διατομή (kg/m³)

Q : παροχή νερού για την όλη διατομή (m³/s)

Για τη μέτρηση της στερεοπαροχής κοίτης χρησιμοποιήθηκε μια «παγίδα» φερτών υλών, η οποία τοποθετήθηκε στην κοίτη, στο μέσο περίπου της όλης διατομής. Για τον προσδιορισμό της στερεοπαροχής κοίτης m_G [kg/(m s)], η αποξηραμένη μάζα των παγιδευμένων φερτών υλών διαιρείται με τη διάρκεια της μέτρησης και το πλάτος της παγίδας φερτών υλών.

Ο Πίνακας 1 περιλαμβάνει τις ημερομηνίες των μετρήσεων και τις μετρημένες τιμές της παροχής νερού, της στερεοπαροχής αιωρούμενων υλών και της στερεοπαροχής κοίτης.

Πίνακας 1: Τιμές μετρήσεων παροχής νερού, στερεοπαροχής αιωρούμενων υλών και στερεοπαροχής κοίτης

Ημερομηνία	Παροχή νερού (m ³ /s)	Στερεοπαροχή αιωρούμενων υλών (g/s)	Στερεοπαροχή κοίτης [kg/(m s)]	Ημερομηνία	Παροχή νερού (m ³ /s)	Στερεοπαροχή αιωρούμενων υλών (g/s)	Στερεοπαροχή κοίτης [kg/(m s)]
16-9-2005	16.96	34.0	0.012	18-1-2010	62.41	0.68	0.012
19-9-2005	13.17	40.0	0.014	18-1-2010	55.30	0.62	0.016
23-9-2005	25.48	255.0	0.054	20-7-2010	2.62	5.77	0.015
24-9-2005	21.25	47.0	0.039	21-7-2010	3.95	9.90	0.043
25-9-2005	16.67	67.0	0.051	22-7-2010	4.22	10.14	0.050
26-9-2005	14.17	42.51	0.024	22-7-2010	4.13	8.70	0.059
27-9-2005	17.77	88.85	0.030	26-7-2010	6.20	16.70	0.0425
28-9-2005	19.50	156.0	0.018	27-7-2010	4.80	11.0	0.060
29-9-2005	16.65	116.55	0.044	29-7-2010	3.76	9.0	0.064
30-9-2005	18.49	73.96	0.027	3-8-2010	3.16	8.20	0.035
11-7-2008	6.98	20.94	0.002	2-11-2010	2.06	6.78	0.0485
13-7-2008	6.37	31.9	0.001	2-11-2010	1.46	3.64	0.019
15-7-2008	5.79	46.35	0.002	3-11-2010	1.88	4.52	0.021
29-10-2008	2.44	5.37	0.003	5-11-2010	1.49	3.57	0.015
30-10-2008	2.73	.80	0.003	5-11-2010	1.75	4.72	0.042
1-11-2008	2.69	6.50	0.0025	18-11-2010	1.66	21.09	0.007
2-11-2008	2.84	5.90	0.003	24-11-2010	2.28	61.70	0.007
3-11-2008	3.09	8.30	0.003	25-11-2010	1.55	47.93	0.017
13-7-2009	49.24	82.47	-	25-11-2010	1.24	13.39	0.021
14-7-2009	45.71	141.14	0.004	26-11-2010	1.65	54.47	0.016
15-7-2009	33.38	44.66	0.0005	3-12-2010	1.55	1.87	0.0085
16-7-2009	86.06	1165.05	0.077	3-12-2010	2.03	1.80	0.004
16-7-2009	28.74	24.43	0.003	3-12-2010	0.80	0.88	0.005
17-7-2009	86.58	543.30	0.096	4-12-2010	0.69	0.68	0.002
17-7-2009	21.62	17.30	0.001	4-12-2010	0.69	0.55	0.002
18-7-2009	74.84	203.95	0.046	5-12-2010	0.89	1.07	0.007
28-9-2009	17.89	-	0.003	24-3-2011	3.27	99.06	0.019
28-9-2009	15.45	-	0.013	24-3-2011	3.70	101.50	0.049
29-9-2009	20.62	-	0.014	29-3-2011	2.83	79.27	0.015
29-9-2009	16.15	-	0.008	2-4-2011	3.40	36.03	0.030
30-9-2009	14.14	-	0.002	2-4-2011	3.28	39.52	0.018
29-12-2009	58.98	0.86	0.0004	7-4-2011	1.77	75.68	0.020
29-12-2009	52.94	1.41	0.002	9-4-2011	1.05	33.23	0.010
3-1-2010	50.14	0.74	0.007	9-4-2011	0.60	20.09	0.009
3-1-2010	48.27	0.52	0.004	10-4-2011	0.39	12.59	0.008
11-1-2010	45.72	0.48	0.009	10-4-2011	0.64	20.93	0.008
11-1-2010	44.45	0.47	0.007				

3. ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗΣ

Για το τμήμα της λεκάνης απορροής του ποταμού Νέστου, το οποίο βρίσκεται κατάντη του φράγματος της Πλατανόβρυσης, αναπτύχθηκαν εξισώσεις απλής, μη γραμμικής παλινδρόμησης, οι οποίες παρίστανται γραφικά από αντίστοιχες καμπύλες (Αγγέλης, 2011). Η ανάλυση παλινδρόμησης συσχετίζει τις ακόλουθες μεταβλητές:

- Στερεοπαροχή αιωρούμενων υλών έναντι παροχής νερού
- Στερεοπαροχή κοίτης έναντι παροχής νερού

Ο συντελεστής προσδιορισμού (R^2) αποτελεί ένα στατιστικό κριτήριο για την προσαρμογή της καμπύλης παλινδρόμησης στα δεδομένα των μετρήσεων. Συγκεκριμένα, ο ως άνω συντελεστής εκφράζει το ποσοστό της διασποράς των δεδομένων των μετρήσεων, στερεοπαροχής αιωρούμενων υλών ή στερεοπαροχής κοίτης, το οποίο εξηγείται από το μοντέλο παλινδρόμησης. Η τιμή 1 του συντελεστή προσδιορισμού εκφράζει το γεγονός ότι η καμπύλη παλινδρόμησης προσαρμόζεται τέλεια στα δεδομένα των μετρήσεων. Στην περίπτωση γραμμικής παλινδρόμησης, ο συντελεστής προσδιορισμού (R^2) είναι το τετράγωνο του συντελεστή συσχέτισης (R).

Ο μαθηματικός ορισμός του συντελεστή προσδιορισμού δίδεται κατωτέρω:

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = \frac{SST - SSE}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (3.1)$$

$$SST = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad SSR = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (3.2)$$

όπου y_i είναι οι μετρημένες τιμές της εξαρτημένης μεταβλητής (στερεοπαροχή αιωρούμενων υλών ή στερεοπαροχή κοίτης), \bar{y} είναι ο μέσος όρος των μετρημένων τιμών, \hat{y}_i είναι οι υπολογισμένες, μέσω του μοντέλου παλινδρόμησης, τιμές της εξαρτημένης μεταβλητής και n ο αριθμός των μετρημένων τιμών.

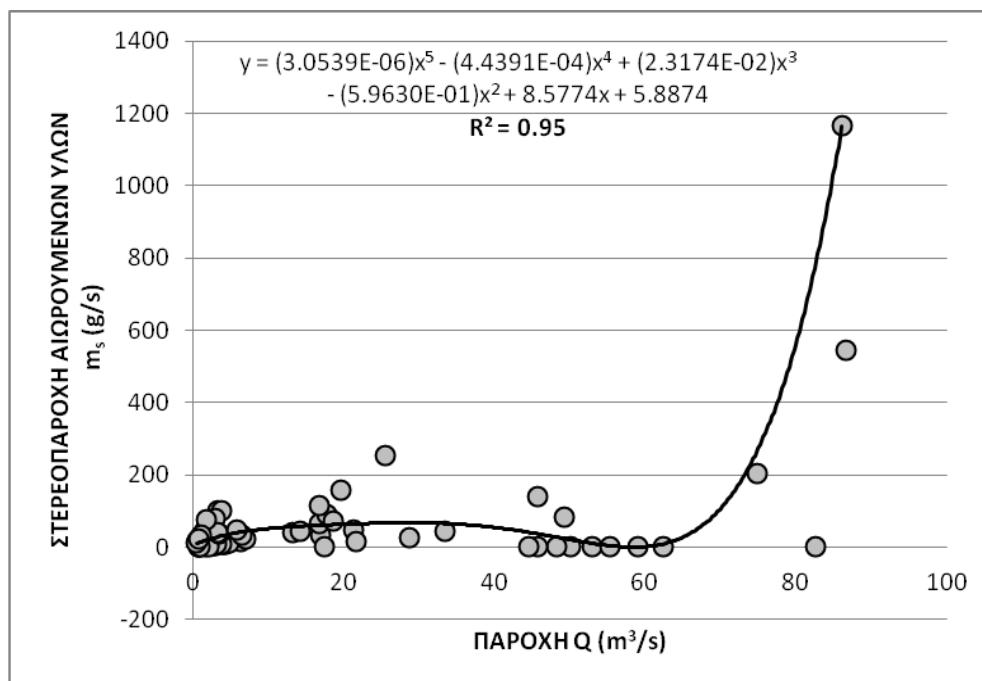
Στον Πίνακα 2 δίδονται οι τύποι των καμπυλών παλινδρόμησης, οι τιμές των συντελεστών προσδιορισμού και ο αριθμός των ζευγών μετρημένων τιμών για τη στερεοπαροχή αιωρούμενων υλών και την παροχή νερού, καθώς και για τη στερεοπαροχή κοίτης και την παροχή νερού.

Το Σχήμα 1 απεικονίζει μια πολυωνυμική καμπύλη 5^{ου} βαθμού, η οποία παριστά γραφικά τη σχέση μεταξύ στερεοπαροχής αιωρούμενων υλών και παροχής νερού για 65 ζεύγη τιμών. Ο συντελεστής προσδιορισμού λαμβάνει την τιμή 0.95.

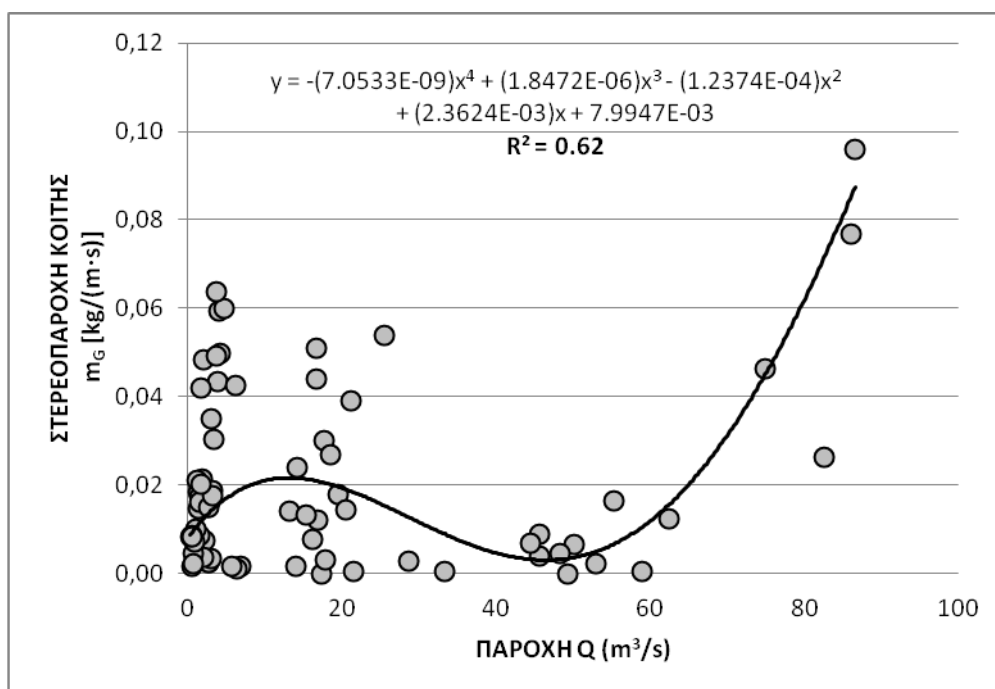
Το Σχήμα 2 απεικονίζει μια πολυωνυμική καμπύλη 4^{ου} βαθμού, η οποία παριστά γραφικά τη σχέση μεταξύ στερεοπαροχής κοίτης και παροχής νερού για 63 ζεύγη τιμών. Ο συντελεστής προσδιορισμού λαμβάνει την τιμή 0.62.

Πίνακας 2: Μη γραμμικές εξισώσεις παλινδρόμησης για τη στερεοπαροχή αιωρούμενων υλών και για τη στερεοπαροχή κοίτης

	Στερεοπαροχή αιωρούμενων υλών (g/s) έναντι παροχής (m ³ /s)	Στερεοπαροχή κοίτης [kg/(m s)] έναντι παροχής (m ³ /s)
Τύπος καμπύλης παλινδρόμησης	πολυωνυμική $y = (3.05 \cdot 10^{-6})x^5 - (4.44 \cdot 10^{-4})x^4 + (2.32 \cdot 10^{-2})x^3 - (5.96 \cdot 10^{-1})x^2 + 8.58x + 5.89$	πολυωνυμική $y = -(7.05 \cdot 10^{-9})x^4 + (1.85 \cdot 10^{-6})x^3 - (1.24 \cdot 10^{-4})x^2 + (2.36 \cdot 10^{-3})x + 7.99 \cdot 10^{-3}$
Συντελεστής προσδιορισμού (R^2)	0.95	0.62
Αριθμός ζευγών μετρημένων τιμών	65	63



Σχήμα 1: Πολυωνυμική καμπύλη παλινδρόμησης 5^{ου} βαθμού για τη σχέση μεταξύ στερεοπαροχής αιωρούμενων υλών και παροχής νερού



Σχήμα 2: Πολυωνυμική καμπύλη παλινδρόμησης 4^{ου} βαθμού για τη σχέση μεταξύ στερεοπαροχής κοίτης και παροχής νερού

Για τον έλεγχο της προσαρμογής του μοντέλου παλινδρόμησης στα δεδομένα των μετρήσεων εφαρμόστηκε, επίσης, το στατιστικό κριτήριο του λόγου F, ο μαθηματικός ορισμός του οποίου για πολυωνυμικές καμπύλες παλινδρόμησης δίδεται κατωτέρω:

$$F = \frac{MSR}{MSE} \quad (3.3)$$

$$MSR = \frac{SSR}{k + 1} \quad MSE = \frac{SSE}{n - k - 1} \quad (3.4)$$

όπου $k + 1$ και $n - k - 1$ οι βαθμοί ελευθερίας για τις ποσότητες SSR και SSE αντίστοιχα. Το k είναι ο βαθμός του πολυωνύμου. Ο λόγος F λαμβάνει την τιμή 212.25 για την πολυωνυμική καμπύλη στερεοπαροχής αιωρούμενων υλών – παροχής νερού και την τιμή 44.0 για την πολυωνυμική καμπύλη στερεοπαροχής κοίτης – παροχής νερού.

Για λόγους σύγκρισης εφαρμόστηκε γραμμική παλινδρόμηση σε 62 ζεύγη μετρημένων τιμών στερεοπαροχής αιωρούμενων υλών – παροχής νερού. Ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 , σ' αυτήν την περίπτωση λαμβάνει την τιμή 0.51. Γραμμική παλινδρόμηση εφαρμόστηκε, επίσης, στα δεδομένα μετρήσεων στερεοπαροχής κοίτης – παροχής νερού. Σ' αυτήν την περίπτωση, όμως, ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 λαμβάνει πολύ χαμηλές τιμές (περίπου 0.04) ανεξαρτήτως του αριθμού των δεδομένων μετρήσεων.

Εκτός από την πολυωνυμική καμπύλη 5^{ου} βαθμού, για τη σχέση στερεοπαροχής αιωρούμενων υλών – παροχής νερού, δοκιμάστηκαν πολυωνυμικές καμπύλες 2^{ου}, 3^{ου} και 4^{ου} βαθμού, λογαριθμική, εκθετική και υπερβολική καμπύλη. Αποδεκτές τιμές του συντελεστή προσδιορισμού, όμως, προέκυψαν μόνο για τις πολυωνυμικές καμπύλες.

Εκτός από την πολυωνυμική καμπύλη 4^{ου} βαθμού, για τη σχέση στερεοπαροχής κοίτης – παροχής νερού, δοκιμάστηκαν πολυωνυμικές καμπύλες 2^{ου} και 3^{ου} βαθμού, λογαριθμική, εκθετική και υπερβολική καμπύλη. Αποδεκτές τιμές του συντελεστή προσδιορισμού, όμως, προέκυψαν μόνο για τις πολυωνυμικές καμπύλες.

4. ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗΣ

Σύμφωνα με τον Πίνακα 2 και τα Σχήματα 1 και 2, παρατηρούνται υψηλές τιμές του συντελεστή προσδιορισμού για την παλινδρόμηση μεταξύ της στερεοπαροχής αιωρούμενων υλών και της παροχής νερού. Σημαντικά χαμηλότερες τιμές του συντελεστή προσδιορισμού, όμως, παρατηρούνται για την παλινδρόμηση μεταξύ της στερεοπαροχής κοίτης και της παροχής νερού. Όπως αναμενόταν, οι αντίστοιχες καμπύλες παλινδρόμησης έχουν εν γένει θετική κλίση, με εξαίρεση μικρές περιοχές των Σχημάτων 1 και 2.

Η υψηλότερη τιμή του συντελεστή προσδιορισμού, για τη σχέση στερεοπαροχής αιωρούμενων υλών – παροχής νερού, σε σύγκριση με την αντίστοιχη τιμή του συντελεστή προσδιορισμού, για τη σχέση στερεοπαροχής κοίτης – παροχής νερού, οφείλεται πιθανώς στο διαφορετικό τρόπο εκτέλεσης των μετρήσεων για τις δύο στερεοπαροχές. Συγκεκριμένα, οι μετρήσεις της στερεοπαροχής κοίτης, οι οποίες πραγματοποιούνται με τη βοήθεια της παγίδας φερτών υλών, δεν είναι πολύ αντιπροσωπευτικές λόγω των ανωμαλιών της κοίτης. Σ' αυτόν το λόγο οφείλονται, πιθανώς, οι αποκλίσεις της καμπύλης παλινδρόμησης του Σχήματος 2 από τη γενική αύξουσα τάση. Επίσης, σε μερικές περιπτώσεις παρατηρούνται ίσες τιμές της στερεοπαροχής κοίτης για διαφορετικές τιμές της παροχής νερού (Πίνακας 1). Οι μετρήσεις της στερεοπαροχής αιωρούμενων υλών, όμως, βασίζονται σε απλές δειγματοληψίες νερού.

Η μεγάλη διασπορά των δεδομένων της στερεοπαροχής κοίτης για τις χαμηλές παροχές νερού (Σχήμα 2) οφείλεται, πιθανώς, στο γεγονός ότι οι ποσότητες φερτών

υλών που παγιδεύονται στη συσκευή μέτρησης της στερεοπαροχής κοίτης κατά τις χαμηλές παροχές νερού, είναι λιγότερο αντιπροσωπευτικές απ' αυτές που παγιδεύονται κατά τις υψηλές παροχές. Προφανώς, η τιμή του συντελεστή προσδιορισμού ($R^2 = 0.62$) θα ήταν μεγαλύτερη, εάν δεν υπήρχε η προαναφερθείσα υψηλή διασπορά.

Στα πλαίσια μιας προηγούμενης εργασίας (Metallinos and Hrissanthou, 2011) προσαρμόστηκε μια υπερβολική καμπύλη παλινδρόμησης σε 18 ζεύγη μετρημένων τιμών της στερεοπαροχής αιωρούμενων υλών και της παροχής νερού στον ποταμό Νέστο. Ο συντελεστής προσδιορισμού είχε την τιμή 0.85. Επίσης, μια εκθετική καμπύλη παλινδρόμησης προσαρμόστηκε σε 23 ζεύγη μετρημένων τιμών της στερεοπαροχής κοίτης και της παροχής νερού στον ίδιο ποταμό. Ο συντελεστής προσδιορισμού είχε την τιμή 0.61. Από τα ανωτέρω συμπεραίνεται ότι ο αριθμός των δεδομένων μετρήσεων επηρεάζει, μεταξύ άλλων, τον τύπο της καμπύλης παλινδρόμησης.

Οι μετρήσεις της στερεοπαροχής αιωρούμενων υλών δεν είναι πολύ ακριβείς, γιατί η συγκέντρωση των αιωρούμενων φερτών υλών, σε αντίθεση με την παροχή νερού, δεν προσδιορίστηκε χωριστά σε κάθε τμήμα της θεωρούμενης διατομής, αλλά μόνο στο μέσο της διατομής. Ανάλογη παρατήρηση ισχύει και για τη στερεοπαροχή κοίτης, δηλ. προσδιορίστηκε μόνο στο μέσο της θεωρούμενης διατομής και όχι χωριστά σε κάθε τμήμα της διατομής.

Οι μετρήσεις παροχής νερού και στερεοπαροχής αιωρούμενων υλών, που αναφέρονται στην παρούσα εργασία, δεν είναι άμεσα συγκρίσιμες με τις αντίστοιχες μετρήσεις που αναφέρονται στην εργασία των Πούλου και Αλεξανδράκη (2005), γιατί οι τελευταίες μετρήσεις, που δίδονται σε μηνιαία χρονική βάση, προέρχονται από μια μακρά χρονική περίοδο (1965 – 1982) και αφορούν μια λεκάνη απορροής έκτασης 4393 km². Σημειώτεον ότι οι μετρήσεις που αναφέρονται στην εργασία των Πούλου και Αλεξανδράκη (2005), διεξήχθησαν στη θέση Τέμενος προ της κατασκευής των φραγμάτων Θησαυρού και Πλατανόβρυσης. Από την άλλη πλευρά, οι μετρήσεις που αναφέρονται στην παρούσα εργασία, είναι στιγμιαίες και αφορούν μια λεκάνη απορροής έκτασης 838 km², η οποία βρίσκεται μεταξύ του φράγματος της Πλατανόβρυσης και του δέλτα του ποταμού Νέστου.

Η σύγκριση μετρήσεων και υπολογισμών της στερεοπαροχής κοίτης, σύμφωνα με τον τύπο των Meyer-Peter και Müller, για τον ποταμό Νέστο παρείχε αποδεκτά αποτελέσματα μόνο για το 59% των ζευγών μετρημένων και υπολογισμένων τιμών (Αντωνιάδης, 2012). Ως αποδεκτές υπολογισμένες τιμές της στερεοπαροχής κοίτης θεωρήθηκαν αυτές που είναι κατά μέγιστο διπλάσιες ή κατ' ελάχιστο μισές των αντίστοιχων μετρημένων τιμών.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ

Οι σχετικά υψηλές τιμές του συντελεστή προσδιορισμού δείχνουν ότι ιδιαίτερα η στερεοπαροχή αιωρούμενων υλών, αλλά και η στερεοπαροχή κοίτης στον ποταμό Νέστο μπορούν να υπολογιστούν ικανοποιητικά ως συναρτήσεις της παροχής νερού. Πιστεύεται ότι η αξιοπιστία των μη γραμμικών εξισώσεων παλινδρόμησης θα ήταν μεγαλύτερη, εάν ήταν διαθέσιμος ακόμα μεγαλύτερος αριθμός δεδομένων μετρήσεων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Αγγέλης, Ι. 2011. *Στατιστική επεξεργασία μετρήσεων παροχής νερού και στερεοπαροχής στον ποταμό Νέστο*. Μεταπτυχιακή Διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Ξάνθη, 136 σελ.

- Αθηνοδώρου, Α., Λαμπρίδης, Ι. και Οικονόμου, Η. 2010. *Μετρήσεις παροχής, στερεοπαροχής κοίτης και αιωρούμενων υλών του ποταμού Νέστου – Υπολογισμοί στερεοπαροχής κοίτης*. Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Ξάνθη, 120 σελ.
- Αντωνιάδης, Α. 2012. *Σύγκριση υπολογισμών και μετρήσεων της στερεοπαροχής κοίτης με στατιστικά κριτήρια*. Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Ξάνθη, 79 σελ.
- Αρβανίτης, Δ. και Κηπουρίδης, Π. 2011. *Εφαρμογή του τύπου των Meyer-Peter και Müller στον ποταμό Νέστο για τον υπολογισμό της στερεοπαροχής κοίτης*. Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Ξάνθη, 81 σελ.
- Δαρδαμανέλης, Γ. και Κεχαγιόγλου, Σ. 2011. *Σύγκριση υπολογισμών και μετρήσεων της στερεοπαροχής κοίτης του ποταμού Νέστου, στη θέση Κύρνος*. Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Ξάνθη, 77 σελ.
- Εβρένογλου, Θ., Μαρκίδης, Χ. και Σπανός, Δ. 2010. *Μετρήσεις στερεοπαροχής κοίτης και αιωρούμενων υλών του ποταμού Νέστου – Υπολογισμοί στερεοπαροχής κοίτης κατά Meyer-Peter και Müller*. Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Ξάνθη, 109 σελ.
- Κλαδογένης, Π. και Χαλήλογλου, Μ. 2007. *Μετρήσεις παροχής νερού και στερεοπαροχής στον ποταμό Νέστο*. Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Ξάνθη, 129 σελ.
- Κολέτση, Ι. και Μητσιολίδου, Ό. 2011. *Μετρήσεις παροχής και στερεοπαροχής κοίτης του ποταμού Νέστου, στη θέση Κύρνος*. Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Ξάνθη, 80 σελ.
- Κρεμμύδας, Ν. και Κληροδοτάκος, Σ. 2011. *Μετρήσεις φερτών υλών στον ποταμό Νέστο, στη θέση Κύρνος*. Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Ξάνθη, 82 σελ.
- Λαζαρίδης, Π., Δαλακούρας, Δ. και Κωστελίδης, Γ. 2010. *Υπολογισμοί και μετρήσεις στερεοπαροχής κοίτης του ποταμού Νέστου*. Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Ξάνθη, 66 σελ.
- Λαμπρόπουλος, Σ. και Τσούλος, Γ. 2009. *Μετρήσεις στερεοπαροχής κοίτης και αιωρούμενων υλών του ποταμού Νέστου – Υπολογισμοί στερεοπαροχής κοίτης*. Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Ξάνθη, 74 σελ.
- Λειβαδίτης, Α. και Καπόγλης, Η. 2006. *Υπολογισμοί και μετρήσεις στερεοπαροχής του ποταμού Νέστου*. Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Ξάνθη, 94 σελ.
- Μουρατίδης, Ρ.-Μ. και Σταυρόπουλος, Ά.-Γ. 2011. *Μετρήσεις στερεοπαροχής κοίτης και αιωρούμενων υλών του ποταμού Νέστου, στη θέση Κύρνος – Υπολογισμοί στερεοπαροχής κοίτης*. Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Ξάνθη, 88 σελ.
- Πούλος, Σ. και Αλεξανδράκης Γ. 2005. *Η εποχιακή διακύμανση του ιζηματολογικού (εν αιωρήσει) δυναμικού των ελληνικών ποταμών και η σχέση του με τις αντίστοιχες τιμές του υδάτινου δυναμικού τους*. Πρακτικά 7th Hellenic Hydrogeological Conference, Αθήνα, 437-444.
- Σταμουλάκης, Ε. και Λαλιώτης, Κ. 2010. *Μετρήσεις παροχής νερού και στερεοπαροχής κοίτης στον ποταμό Νέστο*. Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Ξάνθη, 42 σελ.
- Χαλήλ, Μ., Χάϊτα, Χ. και Καρατσομπάν, Ι. 2011. *Μετρήσεις παροχής νερού και στερεοπαροχής στον ποταμό Νέστο – Υπολογισμοί στερεοπαροχής κοίτης*.

- Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Ξάνθη, 103 σελ.
- Achite, M. and Ouillon, S. 2007. *Suspended sediment transport in a semiarid watershed, Wadi Abd, Algeria (1973-1975)*. Journal of Hydrology, 343(3-4): 187-202.
- Asselman, N.E.M. 2000. *Fitting and interpretation of sediment rating curves*. Journal of Hydrology, 234(3-4): 228-248.
- Córdova, J.R. and González, M. 1997. *Sediment yield estimation in small watersheds based on streamflow and suspended sediment discharge measurements*. Soil Technology, 11(1): 57-65.
- Einstein, H.A. 1950. *The bed-load function for sediment transportation in open channel flows*. U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Technical Bulletin no. 1026.
- Griffiths, G.A. 1982. *Spatial and temporal variability in suspended sediment yields of North Island basins, New Zealand*. Water Resources Bulletin, 18(4): 575-584.
- Metallinos, A. and Hrissanthou, V. 2011. *Regression relationships between sediment transport rates and stream discharge for the Nestos River, Greece*. Proceedings 12th International Conference on Environmental Science and Technology (CEST2011), Rhodes, Greece, Vol. A, 1235-1242 (CD-ROM).
- Meyer-Peter, E. und Müller, R. 1949. *Eine Formel zur Berechnung des Geschiebetriebes*. Schweizer Bauzeitung, 67(3): 29-32.
- Sadeghi, S.H.R., Mizuyama, T., Miyata, S., Gomi, T., Kosugi, T., Fukushima, T., Mizugaki, S. and Onda, Y. 2008. *Development, evaluation and interpretation of sediment rating curves for a Japanese small mountainous reforested watershed*. Geodema, 144(1-2): 198-211.
- Walling, D.E. 1977. *Assessing the accuracy of suspended sediment rating curves for a small basin*. Water Resources Research, 13(3): 531-538.

**ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΥΡΒΩΔΟΥΣ
ΡΟΗΣ ΔΙΑΜΕΣΟΥ ΤΥΧΑΙΑ ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΩΝ ΑΚΑΜΠΤΩΝ
ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ**

**Άγγελος Σ. Δημακόπουλος¹, Ana M. Ricardo^{1,2},
Δημοκράτης Γ.Ε. Γρηγοριάδης³, Rui M.L. Ferreira¹**

¹CEHIDRO, Dept. of Civil Engineering, Instituto Superior Técnico, Lisbon,
Portugal

²LCH - EPFLausanne, Switzerland

³UCY-CompSci, Τμήμα Μηχανικών Μηχανολογίας και
Κατασκευαστικής, Πανεπιστήμιο Κύπρου, Λευκωσία, Κύπρος

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία διερευνά την τυρβώδη ροή που αναπτύσσεται σε ανοιχτό αγωγό διαμέσου στοιχείων άκαμπτης βλάστησης, με τη χρήση αριθμητικής μεθόδου και πειραματικών μετρήσεων με τη μέθοδο PIV. Η αριθμητική προσομοίωση πραγματοποιείται με τη μέθοδο Προσομοίωσης Μεγάλων Δινών ή Large Eddy Simulation (LES), η οποία συνδυάζεται με τη μέθοδο Immersed Boundary (IB) Η εργασία στοχεύει στο χαρακτηρισμό της αντίστασης της ροής με τη χρήση των DNS εξισώσεων.

**NUMERICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF
TURBULENT FLOW THROUGH RIGID, RANDOMLY
DISTRIBUTED VEGETATION ELEMENTS**

**Aggelos S. Dimakopoulos¹, Ana M. Ricardo^{1,2},
Dimokratis G.E. Grigoriadis³, Rui M.L. Ferreira¹**

¹CEHIDRO, Dept. of Civil Engineering, Instituto Superior Técnico,
Lisbon, Portugal

²LCH – EPFLausanne, Switzerland

³UCY-CompSci, Dept. of Mechanical Engineering, University of Cyprus,
Nicosia, Cyprus

ABSTRACT

The turbulent flow through emergent vegetation elements (stems) in a channel is studied by means of physical and numerical modeling. The measurements were obtained with a two-dimensional Particle Image Velocimetry (PIV) system. The numerical simulation is based on the Large Eddy Simulation method combined with the Immersed Boundary (IB) method. To characterize flow resistance, numerical and laboratory data are time- and space-averaged and upscaled to the inter-stem scale.

1. INTRODUCTION

Emergent vegetation in rivers, estuaries and wetlands holds a key role to landscape quality and ecological sustainability. The study of vegetated flows in natural environments is a complex task, as there is a continuous feedback between short-term hydrodynamic processes and long-term geomorphological and biological processes. Apart from the difficulty to predict the temporal evolution of such systems, another complication is the inherent spatial randomness of natural environments.

A first approach to characterize the dynamics of vegetated flows was made within atmospheric boundary layer studies (Raupach and Thom 1981, Finnigan 2000). Recently there has been significant progress in the characterization of vegetated flows in aquatic environments (Nepf 1999, Tanino and Nepf 2008, 2009, Ferreira et al. 2010). The latter studies, that include randomly distributed vegetation flow cases, are mainly experimental. The complexity of the flow structure (a combination of channel and wake flow) hinders the treatment of such flows with numerical models and, so far, the vast majority of numerical studies have focused on problems in which stems are placed in regular or staggered arrays (*e.g.*, Stoesser et al. 2010).

In this work, the flow through emergent, rigid and randomly distributed cylindrical elements of vegetation is examined, with the use of experimental and numerical methods. The characterization of the flow is achieved through the application of Double-Averaging (DA) methods (Gimenez-Curto and Corniero Lera 2000, Finnigan 2000, Nikora et al. 2001, 2007). The DA methodology enables the characterization of three-dimensional flows over irregular boundaries through an upscaling procedure, in the temporal and spatial sense.

In the following two sections, a description of the experimental facilities and the simulation algorithm is given. In the last two sections, results of time-averaged velocities and conclusions are presented.

2. EXPERIMENTAL APPROACH

The experimental work was carried out in a 12.5 m long and 0.408 m wide tilting recirculation flume, located at the Hydraulics Laboratory of IST (Figure 1). The flume side walls are made of glass, thus enabling flow visualization and PIV measurements. The flume bottom is covered with a thin horizontal layer of gravel and sand. The vegetated reach starts at 5.5m from the flume inlet and extends 3.5m downstream, occupying the total flume width. This reach is populated with rigid, vertical and emerged cylindrical elements (stems) with diameter $d=1.1\text{cm}$, fixed on the flume bottom. The stems are randomly distributed, in accordance with a uniform distribution function with a density of 400 stems/m² and average spacing of $4.5d$. A coarse gravel weir is located downstream of the vegetation area, to control flow depth. The flow discharge during the experiments was set to 2.33l/s, while the corresponding mean flow depth and bulk velocity in the vegetation area are $h=0.059\text{m}$ ($5.364d$) and $U_o=0.102\text{m/s}$, respectively. Reynolds numbers with respect to the stem diameter d and the flow depth h are $Re_s=1374$ and $Re_h=7370$, respectively, while the Froude number is $Fr=0.176$.

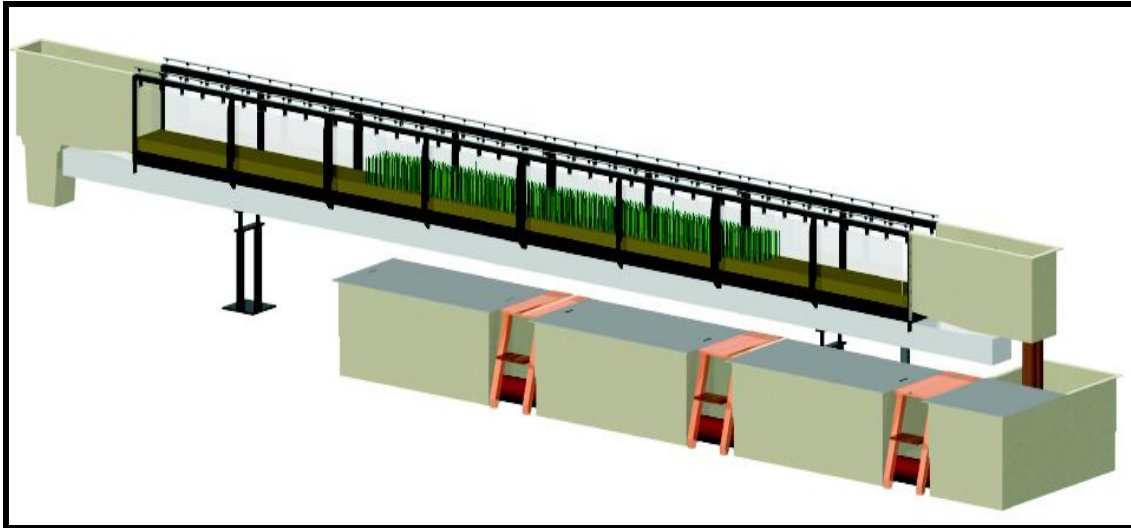


Figure 1: A three-dimensional sketch of the flume located at the Hydraulics Laboratory of IST

The experimental data acquisition is carried out by a 2D Particle Image Velocimetry (PIV) system, based on a double-pulsed laser, with 30 mJ per pulse at 532 nm, a Charge-Coupled Device (CCD) camera and a synchronization unit. The laser allows the user to set the delay between two consecutive laser pulses. During experimental tests presented herein, the PIV was operated at a sampling rate of 15 Hz and with time delay between pulses at 1500 μs . The CCD camera has a resolution of $1600 \times 1200 \text{ px}^2$ and the (adaptive) image correlation was performed with final interrogation areas of $16 \times 16 \text{ px}^2$ without overlap. The seeding particles used in this experimental work for flow visualization were made of polyurethane, with specific gravity of 1.31 and diameter range from 50 to 70 μm , (mean diameter 60 μm).

The PIV produces data in the form of instantaneous velocity maps. The measurements were taken both in vertical and horizontal planes inside a control volume $10 \times 10 \times 6.3 \text{ cm}^3$, located 2.9m downstream the beginning of the vegetated reach (Figure 2). Concerning measurements of velocity profiles, 15 vertical planes were considered. Since the camera's field of view was an area of approximately $8.5 \times 6.5 \text{ cm}^2$ and the laser sheet has about 2 mm of thickness, the resolution of the velocity maps corresponded to interrogation volumes of $0.8 \times 0.8 \times 2 \text{ mm}^3$ ($dx \times dz \times dy$). For the measurements of horizontal velocities, data were acquired at 6 horizontal planes, each one corresponding to a different flow depth. In this case, an area of about $6.0 \times 4.5 \text{ cm}^2$ was measured, leading to interrogation volumes of $0.6 \times 0.6 \times 2 \text{ mm}^3$ ($dx \times dy \times dz$).

For the averaging procedure, at least 10 sets of 490 image pairs were collected, both for vertical and horizontal planes, corresponding to an averaging period of 326sec. All measurements were taken approximately 30min after the initiation of the experiments, so that the flow discharge is stable and the flow is fully developed.

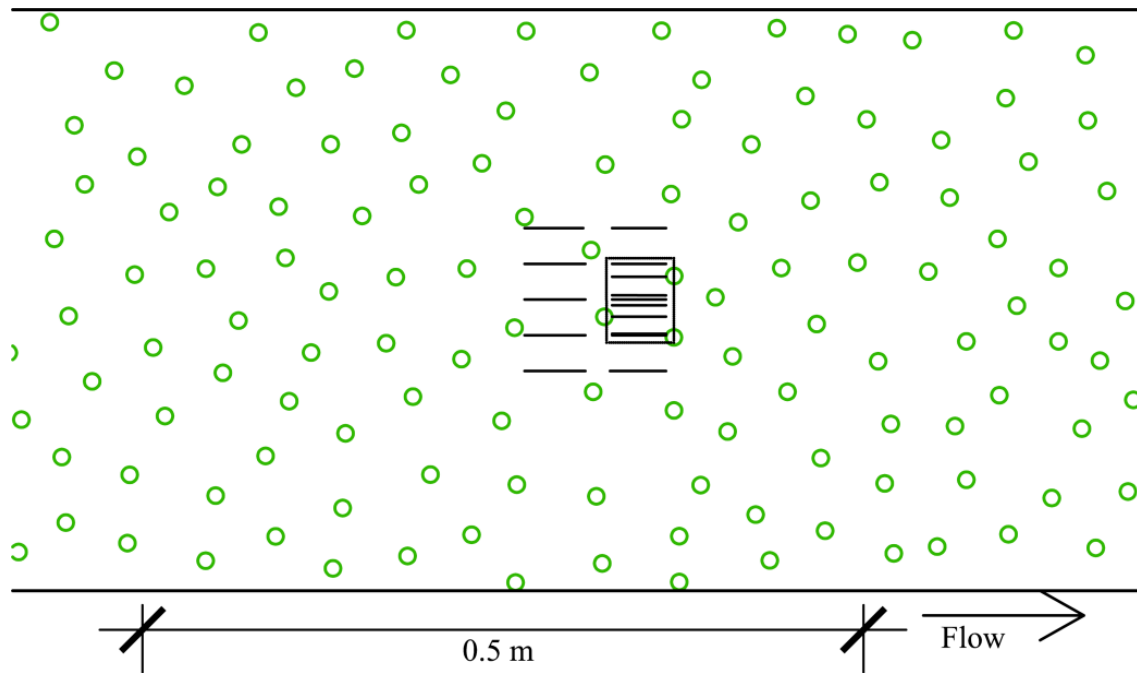


Figure 2: Plan view of the measurement area. The horizontal lines indicate the location of vertical measurement planes, while the rectangle indicates the location of the horizontal measurement planes. Green cylinders correspond to stems and the arrow indicates the streamwise direction

3. NUMERICAL APPROACH

3.1 METHODOLOGY

The numerical simulation part was carried out by using the LES approach. According to the latter, the large scales of flow, which contain most of the turbulent energy, are directly resolved by the numerical method, while the effect of the smaller (or subgrid) scales is accounted for by a subgrid-scale (SGS) model. The separation of scales in the Navier-Stokes and continuity equations is achieved through a filtering operation, rendering

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \frac{1}{\text{Re}} \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_i \partial x_i} \quad (3.2)$$

where x_i ($i = 1, 2, 3$) are the Cartesian spatial coordinates (denoted hereafter x, y, z), corresponding to the streamwise, spanwise and gravity direction, respectively, \bar{u}_i are the resolved velocity components, \bar{p} is the resolved dynamic pressure and $\tau_{ij} = u_i u_j - \bar{u}_i \bar{u}_j$. All variables are rendered non-dimensional, with respect to the stem diameter d , bulk velocity U_0 and fluid density ρ .

For the modeling of SGS stresses an eddy viscosity model is used

$$\tau_{ij} = 2\nu_t S_{ij} \quad (3.3)$$

where ν_t is the eddy viscosity and S_{ij} is the strain rate tensor based on the resolved scales. The eddy viscosity is computed using the Filtered-Structure Function (FSF) model developed by Ducros et al. (1996), which approaches more accurately the energy transfer to SGS scales than the typical Smagorinsky model.

The flow equations are spatially discretized on a central difference staggered grid, with second order accuracy. Time advancement is carried out by a fractional timestep scheme, with the use of an explicit Adams-Bashforth scheme. A detailed presentation of the numerical method can be found in Grigoriadis et al. (2003, 2004).

The stems inside the flow field are simulated with the Immersed Boundary method (IB). According to the method, a set of artificial momentum sources are added to the flow equations in order to adjust the flow in the presence of arbitrary shaped objects within a Cartesian grid. Details of the method can be found in Balaras (2004) and Yang and Balaras (2006). The method advantage is that it enables the use of simple and efficient structured Cartesian grids in complex flow problems (Grigoriadis et al. 2009, 2011).

3.2. COMPUTATIONAL SETUP

The numerical flow field is shown in Figure 3. It reproduces the control volume of the experimental measurements. Three different numerical grids are employed, corresponding to three levels of grid refinement, as shown in Table 1. The numerical grid is stretched along the vertical direction, in order to resolve more accurately the development of the boundary layer near the bottom. The timestep varies according to the restrictive condition,

Table 1: Numerical simulation parameters

Grid	$(L_x \times L_y \times L_z) / d$	$N_x \times N_y \times N_z$	$\Delta x / d$	$\Delta y / d$	$\Delta z / d$	Nodes per cylinder
1	16.5×14.5×5.36	320×320×65	0.052	0.052	0.04-0.16	~20
2		640×640×65	0.026	0.026		~40
3		1280×1280×65	0.013	0.013		~80

The boundary conditions imposed in the domain are the periodicity condition in the spanwise and the streamwise direction, no-slip condition at the bottom and a rigid-lid condition at the free-surface. The stems are introduced through the IB methodology as circular cylinders that extend from the bottom to the rigid lid. The flow is driven by a dynamically defined pressure gradient to reach a steady bulk flow velocity, corresponding to $Re_s=1340$.

For the calculation of averaged variables and turbulent stresses, the simulation is carried out for 140 time units in total, corresponding to the shedding of about 30 vortices behind a stem. Statistics are taken for the last third of the total time, corresponding to the shedding of about 10 vortices.

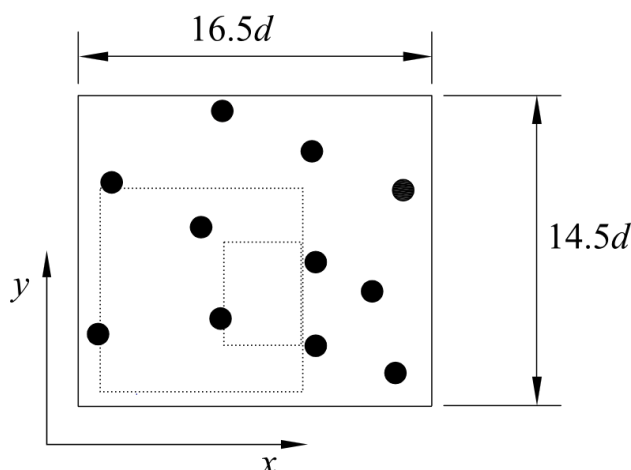


Figure 3: Plan view of the numerical domain. The dot-line boxes correspond to the measurement areas (see Figure 2).

4. RESULTS

The time-averaged results were retrieved from a horizontal plane with elevation, $z = 5.25$ cm, denoted as a rectangle area in Figure 2. The distribution of the mean velocity magnitude in the x - y plane ($U = \sqrt{\overline{u_1^2} + \overline{u_2^2}}$) is shown in Figure 4. The contour plot of the numerical results corresponds to the maximum refinement.

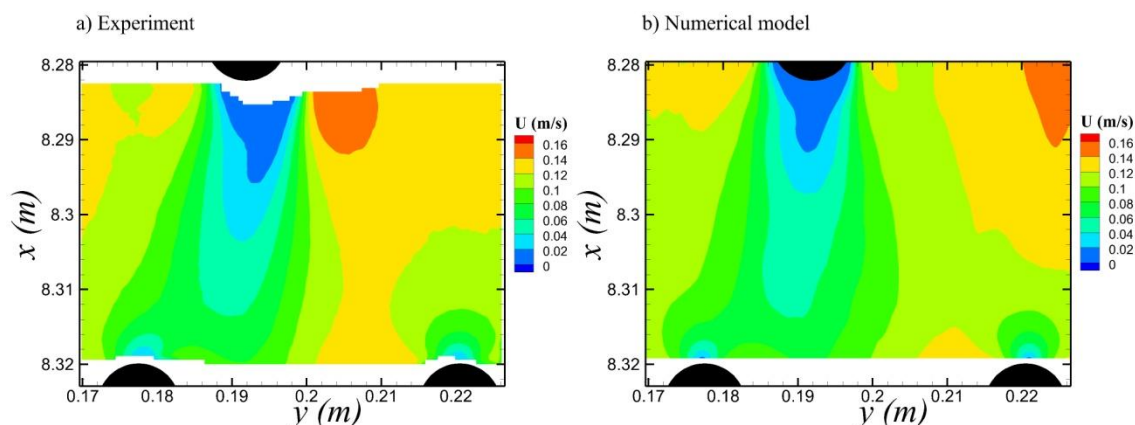


Figure 4: Contour plots of mean velocity magnitude in the plane x - y : a) experimental data b) numerical data. The location of the stems is also presented. Blanked regions correspond to areas where poor or no measurements were taken.

It is observed that the flow in the cylinder's wake is correctly predicted by the numerical model, as this flow region is dominated by the wake oscillation of the cylinder located right upstream, therefore, time averaging over 10 vortex shedding is sufficient. However, this is not the case at the inter-stem areas, where a larger averaging time span is necessary, but not possible, because it would demand an extremely time-consuming simulation for the finer grid.

In multiply connected flow domains with random geometry, as in the present case, a well established tool for analyzing the data is the Double-Averaged (DA) methodology (Nikora et al. 2001, 2007). The extraction of DA quantities from the experimental data is achieved through spatially averaging the time-averaged velocity profiles, measured at the vertical planes x - z . The space-averaging procedure for the experimental case is shown in Figure 5.

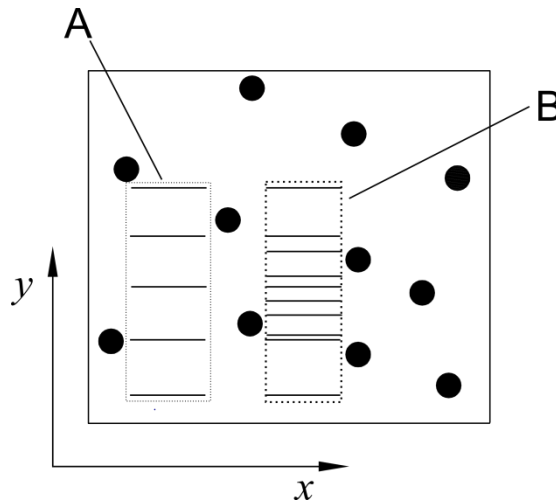


Figure 5: Dotted and dashed rectangles correspond to control volume A and B, respectively. Solid lines corresponds to x - z planes that measurements were taken. The DA procedure is performed according to the following steps: a) Velocity is averaged through x for each x - z plane, resulting to a spatially averaged velocity profile b) For each control volume, the DA profile is calculated by numerically integrating the x - z plane profiles through y . c) The overall DA profile correspond to the weighted average of the two volumes.

In Figure 6 the DA horizontal velocity component profile is shown, for all three numerical grids, in comparison with the experimental DA profile. Figures 6a and 6b correspond to the control volume B and the overall profile, respectively. The DA results for the numerical domain were extracted from the same locations with the experiment, using the procedure described in Figure 5.

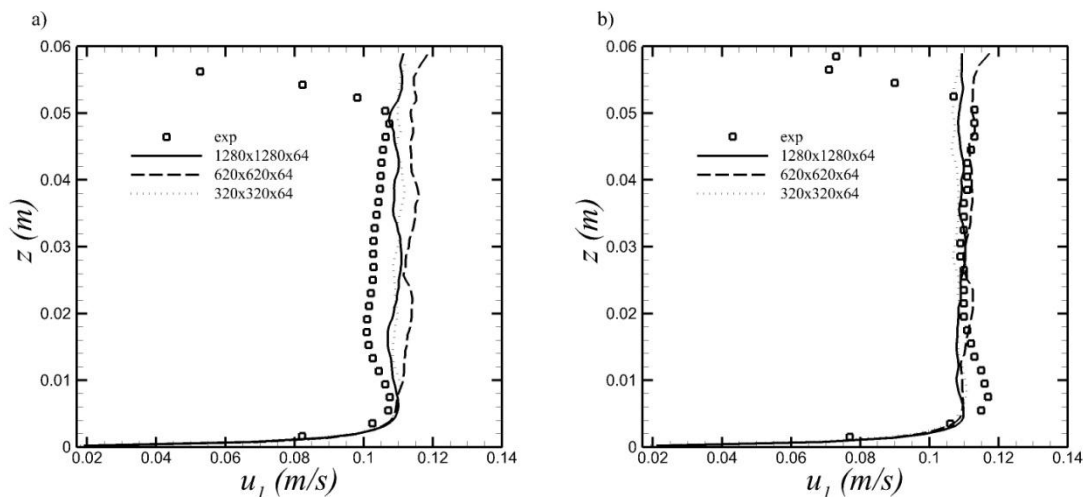


Figure 6: DA horizontal velocity profile: a) averaged through control volume B, and b) overall. The square symbols correspond to the experimental data, while lines correspond to numerical data for different grid refinements. Data are space-averaged following the procedure of Figure 5, for all cases.

Profiles from both cases (experimental and numerical) exhibit very similar trends, especially for Figure 6a, with the exception of the free-surface vicinity. In this area, there is a local flow deceleration within 1cm distance from the free-surface, due to free-

surface intermittency, which is not picked up by the rigid lid condition of the numerical model (Stoesser et al. 2010).

In Figure 7, a similar comparison as in Figure 6 is made, but in this case, the numerical results are integrated over y using the resolution of the numerical grid, for the finest grid. The comparison of the DA velocities for the control volume B in Figure 6a is excellent. However, the overall DA velocity is underestimated by the numerical model (Fig. 7b). It can be concluded that this underestimation is brought about by the space-averaged velocities in control volume A. A possible explanation of this divergence lies in the fewer planes used for space-averaging experimental data and in the proximity of the control volume A to the upstream periodic boundary for the numerical case, as the experimental setup is not periodic but random.

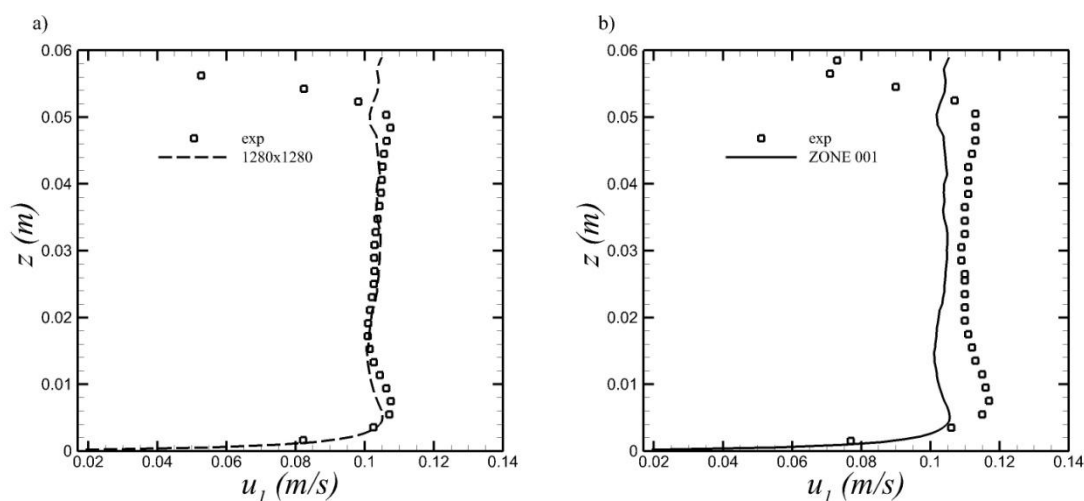


Figure 7: DA horizontal velocity profile: a) averaged through control volume B, and b) overall. The square symbols correspond to the experimental data, while the lines correspond to the numerical data for different grid refinements. The experimental data are integrated following the procedure of Figure 5, while the numerical data are integrated over the numerical grid.

5. CONCLUSIONS

In this work, experimental measurements and numerical simulation results are presented for the flow through a random array of vegetation elements. Despite the inherent limitation of the numerical model in reproducing a very large array of random elements, as in the channel flume, the comparison with the experimental data is satisfactory. In addition, the results processed with the DA method exhibit good agreement, especially when the full resolution of the numerical grid is employed during the integration. Finally, the space-averaged numerical results between the coarser grids and the finer one are close, therefore, a coarser grid could be employed for a more complex or a more prolonged simulation.

ACKNOWLEDGEMENTS

The experimental results were obtained within project PTDC/ECM/099752/2008 “Study of open-channel vegetated flows”, funded by the Portuguese Foundation for Science and Technology.

REFERENCES

- Balaras, E., 2004. *Modeling complex boundaries using an external force field on fixed Cartesian grids in large-eddy simulations*. *Comp. Fluids*, 33: 375-404
- Gimenez-Curto, L. and Corriero Lera, M., 1996. *Oscillating turbulent flows over very rough surfaces*. *J Geoph Res*, 101 (C9), 20745-20758.
- Ducros, F.D., Comte, P.C. and Lesieur, M., 1996. *Large-eddy simulation of transition to turbulence in a boundary layer developing spatially over a flat plate*. *J. Fluid Mech.*, 326: 1-36.
- Ferreira, R.M.L.; Ricardo, A. M. & Franca M. J. (2009) *Discussion of "Laboratory Investigation of Mean drag in a Random Array of Rigid, Emergent Cylinders" by Heidi M. Nepf and Yukie Tanino*, *J. of Hydraul. Eng.*, 135(8), 690-693.
- Finnigan, J., 2000, *Turbulence in plant canopies*. *Annu Rev Fluid Mech*, 32: 519-571.
- Grigoriadis D.G.E., Bartzis, J.G. and Goulas, A., 2003. *LES of the flow past a rectangular cylinder using the immersed boundary concept*. *Int. J. Num. Methods Fluids*, 41: 615-632.
- Grigoriadis D.G.E., Bartzis, J.G. and Goulas, A., 2004. *Efficient treatment of complex geometries for large-eddy simulations of turbulent flows*. *Comp. Fluids*, 33: 201-222.
- Grigoriadis D.G.E., Balaras, E. and Dimas, A.A., 2009. *Large-Eddy simulations of unidirectional water flow over dunes*. *J. Geoph. Res.*, 114: F02022.
- Grigoriadis D.G.E., Dimas, A.A. and Balaras, E. 2011. *Large-Eddy simulation of wave turbulent boundary layer over rippled bed*. *Coastal Eng.*, 60: 174-189.
- Nepf, H., 1999. *Drag, turbulence, and diffusion in flow through and diffusion in flow emergent vegetation*. *Water Res Research*, 35:479-482
- Nikora, V.I, Goring, D.G., McEwan, I.K. and Griffiths, G., 2001. *Spatially averaged open-channel flow over rough bed*. *J. Hydr Eng*, 127(2): 123-133
- Nikora, V., McEwan, I., Coleman, S. and Pokrajac D., 2007. *Double-averaged concepts for rough-bed open-channel and overlands flows*. *J. Hydr Eng*, 127(2): 123-133
- Raupach, M.R. and Thom, A., 1981. *Turbulence in and above plant canopies*. *Annu Rev Fluid Mech*, 13: 97-129.
- Stoesser, M., Kim, S.J. and Diplas P., 2010. *Turbulent flow through idealized emergent vegetation*. *J. Hydr Eng*, 136(12): 1003-1017.
- Tanino, Y. and Nepf, H.M., 2008. *Laboratory investigation of mean drag in a random array of rigid emergent cylinders*. *J Hydr Eng*, 134(1):34-41
- Tanino, Y. and Nepf, H.M., 2008. *Laboratory investigation of lateral dispersion within dense arrays of randomly distributed cylinders at transitional Reynolds number*. *Phys Fluids*, 21, 046603:1-10
- Yang, J.M. and Balaras, E., 2006. *An embedded-boundary formulation for large-eddy simulation of turbulent flows interacting with moving boundaries*. *J. Comput. Phys.*, 215: 12-40

ΠΗΓΕΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΚΑΙ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΝΕΡΟΥ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ ΛΑΣΠΙΑ

Γεώργιος Δ. Γκίκας^{1*}, Συμέλα Κουρτίδου, Βασίλειος Α. Τσιχριντζής²

Εργαστήριο Οικολογικής Μηχανικής και Τεχνολογίας, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνική Σχολή, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, 67100 Ξάνθη.

^{1*}Τηλ./Fax: +30-25410-79381, E-mail: ggkikas@env.duth.gr

²Τηλ./Fax: +30-25410-79393, E-mail: tsihrin@otenet.gr; tsihrin@env.duth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο ποταμός Λασπίας βρίσκεται στη Θράκη στο Νομό Ξάνθης, πηγάζει από την οροσειρά της Ροδόπης και εκβάλλει στο Θρακικό Πέλαγος. Το μήκος του είναι περίπου 30 km και η λεκάνη απορροής του περίπου 212 km². Στη λεκάνη απορροής του Λασπία υπάρχουν σημειακές και μη-σημειακές πηγές ρύπανσης που οφείλονται σε ανθρώπινες δραστηριότητες (π.χ., αγροτικές, κτηνοτροφικές, μικρή βιομηχανία, εκροή μονάδας επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, αστικό περιβάλλον). Η παρακολούθηση της ποιότητας των νερών του Λασπία είναι απαραίτητη για δύο κυρίως λόγους: α) τα νερά του χρησιμοποιούνται για άρδευση αγροτικών καλλιεργειών και β) είναι ενταγμένος στο δίκτυο «Natura 2000». Στην εργασία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων από την παρακολούθηση της ποσότητας και της ποιότητας των νερών του, τα οποία δείχνουν ότι υπάρχει επίδραση των σημειακών και μη σημειακών πηγών ρύπανσης στην ποιότητα των νερών του ποταμού.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Ποταμός Λασπίας, Μη-σημειακές πηγές ρύπανσης, Ευτροφισμός, Ποιότητα νερού, Θρεπτικά άλατα.

POLLUTION SOURCES AND WATER QUALITY ALONG LASPIAS RIVER

Georgios D. Gikas^{1*}, Kourtidou Symela, Vassilios A. Tsihrintzis²

Laboratory of Ecological Engineering and Technology, Department of Environmental Engineering, Democritus University of Thrace, 67100 Xanthi, Greece.

^{1*}Ph./Fax: +30-25410-79381, E-mail: ggkikas@env.duth.gr

² Ph./Fax: +30-25410-79393, E-mail: tsihrin@otenet.gr; tsihrin@env.duth.gr

ABSTRACT

Laspia River is located in Xanthi Prefecture, Thrace. It springs from Rhodope Mountains and discharges into the Thracian Sea, North Aegean. The river course is about 30 km long and the river basin is about 212 km² in surface area. There are point and non-point pollutant sources in Laspia watershed due to human activities (i.e., agriculture, light industry, effluent of wastewater treatment plant, urban development). Monitoring of Laspia River is essential for two reasons: first, its water is used for irrigation of agricultural fields, and second, it is included in the EU “Natura 2000” network. The study presents water quantity and quality monitoring results, which show that there is influence of point and non-point source pollution on the water quality of the river.

KEY WORDS: Laspia River, Non-point source pollution, Eutrophication, Water quality, Nutrient salts.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ποιότητα των επιφανειακών υδάτων (ποταμών, λιμνών, παράκτιων περιοχών) εξαρτάται από φυσικούς παράγοντες, όπως είναι το ύψος των βροχοπτώσεων, η διάβρωση των εδαφών, αλλά κυρίως εξαρτάται από ανθρωπογενείς παράγοντες όπως είναι η αστικοποίηση, οι βιομηχανικές και αγροτικές δραστηριότητες (Novotny and Olem, 1994, Singh et al., 2005). Τα ποτάμια εξ αιτίας του ρόλου τους, να είναι αποδέκτες βιομηχανικών και αστικών λυμάτων (επεξεργασμένων ή ανεπεξεργαστων) αλλά και αγροτικής απορροής, είναι μεταξύ των υδατικών συστημάτων τα πλέον ευάλωτα στη ρύπανση (Gikas et al., 2006a; Boskidis et al., 2010). Οι κύριοι ρύποι, που προέρχονται από τις αγροτικές δραστηριότητες, είναι τα θρεπτικά (άζωτο και φώσφορος), τα ιζήματα και τα φυτοφάρμακα. Σαν αποτέλεσμα αυτών των ρύπων είναι η δημιουργία ευτροφισμού σε λίμνες, λιμνοθάλασσες και παράκτιες περιοχές (Jarvie et al., 1998, Gikas et al., 2006b, 2009a, 2009b, Boskidis et al., 2011).

Συγχρόνως, τα ποτάμια αποτελούν τους κυριότερους υδατικούς πόρους για οικιακή, βιομηχανική και αρδευτική χρήση. Ο έλεγχος και η πρόληψη της ρύπανσης των ποταμών καθίσταται επιτακτική ανάγκη προκειμένου η ποιότητα των νερών να βρίσκεται σε αποδεκτά επίπεδα για τις διάφορες χρήσεις. Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θεσπίσει την οδηγία πλαίσιο 2000/60 για τα νερά (EC, 2000), με στόχο να αποτιμηθεί η ποιότητα των επιφανειακών νερών και να επιτευχθεί, μέσω διαχειριστικών προγραμμάτων, η «καλή οικολογική κατάσταση» σε όλα τα υδατικά συστήματα μέχρι το 2015. Για την αποτελεσματική διαχείριση και τον έλεγχο της ποιότητας του νερού των ποταμών είναι απαραίτητη η τακτική παρακολούθηση αυτών, δεδομένου ότι υπάρχει χωρική και χρονική διακύμανση των φυσικοχημικών παραμέτρων (Sanchez-Montoya et al., 2012).

Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του προγράμματος παρακολούθησης της ποιότητας των νερού του ποταμού Λασπία στο Νομό Ξάνθης. Αυτό έγινε για δύο κυρίως λόγους: α) τα νερά του Λασπία χρησιμοποιούνται για άρδευση και β) το κάτω μέρος της λεκάνης απορροής του και οι εκβολές του περιλαμβάνονται στο δίκτυο «Natura 2000».

2. ΜΕΘΟΔΟΣ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ

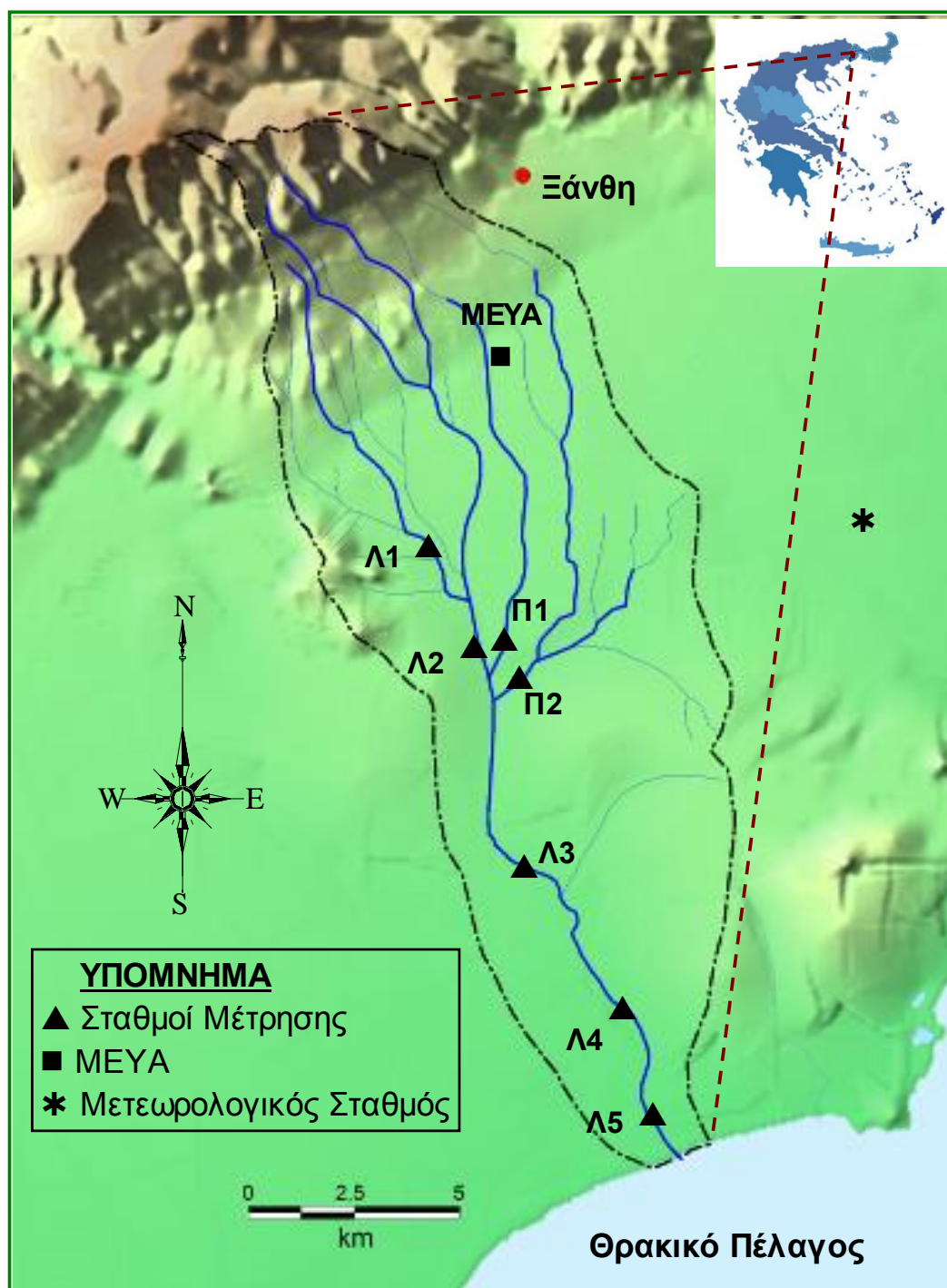
2.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η περιοχή μελέτης είναι η λεκάνη απορροής του ποταμού Λασπία που βρίσκεται στο Νομό Ξάνθης (24°53' Α και 40°59' Β, Σχήμα 1). Ο Λασπίας έχει μήκος περίπου 30 km και η περιοχή όπου εκβάλλει προστατεύεται από τη συνθήκη Ramsar. Η λεκάνη απορροής του ποταμού έχει έκταση περίπου 160 km² και είναι κυρίως αγροτική περιοχή. Πιο συγκεκριμένα, το 86% της έκτασης είναι λοφώδης και πεδινή περιοχή και το υπόλοιπο 14% είναι ορεινή περιοχή.

Η κυριότερη σημειακή πηγή ρύπανσης στην περιοχή μελέτης είναι η μονάδα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων (ΜΕΥΑ) η οποία επεξεργάζεται τα υγρά απόβλητα της Ξάνθης και η διάθεση των επεξεργασμένων αποβλήτων γίνεται στον ποταμό Λασπία. Η ημερήσια εκροή της ΜΕΥΑ είναι περίπου 9.000 m³/d. Επιπλέον, στην περιοχή υπάρχει εργοστάσιο χαρτοποιίας, το οποίο τον τελευταίο χρόνο λειτουργούσε περιστασιακά, ελαφριά βιομηχανία-βιοτεχνία (π.χ. επεξεργασία αλουμινίου, βαφείο υφασμάτων) και αρκετές μονάδες εκτροφής ζώων. Το ζωικό κεφάλαιο στην περιοχή μελέτης για το έτος 2011 ήταν: 3368 βοοειδή, 23500 αιγοπρόβατα και 6165 χοίροι.

Όσον αφορά τις μη σημειακές πηγές ρύπανσης η κυριότερη είναι η αγροτική απορροή. Προκειμένου να εκτιμηθεί ο βαθμός ρύπανσης από τις αγροτικές καλλιέργειες, προσδιορίστηκαν οι καλλιέργειες που εφαρμόζονται στην περιοχή καθώς και η έκταση που κάθε μία από αυτές καταλαμβάνει. Με βάση τις οδηγίες των γεωπόνων για την ποσότητα λιπασμάτων που εφαρμόζονται στις διάφορες καλλιέργειες, αλλά και τις συνήθειες των

αγροτών της περιοχής, όσον αφορά στη λίπανση των αγρών, εκτιμήθηκε η ποσότητα του αζώτου (N) και του φωσφόρου (P) που εφαρμόζεται με τη μορφή λιπασμάτων στους αγρούς (Gikas et al., 2006a, Boskidis et al., 2010). Οι κυριότερες καλλιέργειες στη λεκάνη απορροής του Λασπία και οι συνολικές ποσότητες των θρεπτικών (N, P) που εφαρμόζονται λόγω της αγροτικής δραστηριότητας παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Η συνολική ποσότητα των θρεπτικών είναι 1358,4 tn/y και 239,1 tn/y για το άζωτο και το φώσφορο, αντίστοιχα.



Σχήμα 1: Περιοχή Μελέτης.

Πίνακας 1. Έκταση καλλιεργειών, περίοδος εφαρμογής λιπασμάτων και ετήσια ποσότητα θρεπτικών που εισέρχεται στη λεκάνη απορροής του Λασπία.

Καλ/γεια	Έκταση (ha)	Ποσοστό καλ/νης έκτασης %	Περίοδος εφαρμογής λιπασμάτων	Άζωτο		Φώσφορος	
				Ποσότητα (kg/ha)	Σύνολο καλ/γειας (tn/crop)	Ποσότητα (kg/ha)	Σύνολο καλ/γειας (tn/crop)
Σιτηρά	3881,6	31,8	Τέλος φθιν/ρου και αρχές άνοιξης	130	504,6	20	77,6
Βαμβάκι	986,9	8,1	Άνοιξη	110	108,6	26	25,7
Τριφύλλι	622,6	5,1	Άνοιξη και καλοκαίρι	100	62,3	20	12,5
Καπνός	236,1	1,9	Άνοιξη	40	9,4	25	5,9
Κηπευτικά	458,8	3,8	Άνοιξη	220	100,9	35	16,1
Ηλίανθος	2165,2	17,7	Αρχές και τέλος άνοιξης	150	324,8	30	65,0
Καλαμπόκι	1008,9	8,3	Αρχές και τέλος άνοιξης	200	201,8	30	30,3
Άλλες καλ/γεις	306,8	2,5	Άνοιξη	150	46,0	20	6,1
Αγραν/ση	2543,5	20,8	-	0	0,0	0	0,0
ΣΥΝΟΛΟ	12210,4	100,0			1358,4		239,1

2.2 ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΠΟΣΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ

Για τη μέτρηση της ποσότητας και της ποιότητας του νερού του ποταμού Λασπία δημιουργήθηκε ένα δίκτυο σταθμών μέτρησης κατά μήκος του ποταμού, αποτελούμενο από πέντε σταθμούς (Λ1 – Λ5). Επιπλέον δύο σταθμοί μέτρησης (Π1, Π2) τοποθετήθηκαν στους κυριότερους παραπόταμους του Λασπία (Σχήμα 1). Οι σταθμοί Λ1 και Λ2 δίνουν πληροφορίες για την ποσότητα και την ποιότητα του νερού που προέρχεται από την ορεινή περιοχή και το επάνω τμήμα της αγροτικής περιοχής της λεκάνης απορροής. Ανάντη του σταθμού Λ1 υπάρχουν δύο χοιροστάσια (περίπου 6000 ζώα) και ένα βουστάσιο (περίπου 150 ζώα). Ο σταθμός Π1 βρίσκεται κατάντη της ΜΕΥΑ και δίνει πληροφορίες για την ποιότητα των εκροών της. Ο σταθμός Π2 βρίσκεται ανάντη της θέσης όπου ο κυριότερος παραπόταμος ενώνεται με τον Λασπία και δίνει πληροφορίες για την ποιότητα του νερού της λεκάνης απορροής του, στην οποία βρίσκονται μονάδες εκτροφής ζώων καθώς και βιοτεχνία βαφής υφασμάτων. Ο σταθμός Λ3 βρίσκεται στο μέσον της λεκάνης απορροής και κατάντη της θέσης όπου βρίσκεται η εκροή των λυμάτων χαρτοβιομηχανίας. Ο σταθμός Λ4 δίνει πληροφορίες για την ποιότητα του νερού στο κάτω μέρος της λεκάνης απορροής. Τέλος, ο σταθμός Λ5 βρίσκεται κοντά στις εκβολές του ποταμού και δίνει πληροφορίες για την ποσότητα και την ποιότητα του νερού που τελικά καταλήγει στη θάλασσα.

Οι μετρήσεις γινόταν περίπου κάθε 15 ημέρες σε όλους τους σταθμούς, για την χρονική περίοδο από τον Οκτώβριο 2011 μέχρι τον Μάιο 2012. Η μέτρηση της παροχής γινόταν στους σταθμούς Λ1, Λ3, Λ4, Λ5 και Π1 με ροόμετρο της Valeport model 801. Η μέτρηση της παροχής δεν γινόταν στους σταθμούς Λ2 και Π2 διότι το βάθος ροής ήταν πολύ χαμηλό για το όργανο μέτρησης. Η θερμοκρασία (T), το διαλυμένο οξυγόνο (DO), το pH και η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) μετρούνταν επί τόπου σε όλους τους σταθμούς χρησιμοποιώντας κατάλληλα όργανα της εταιρίας WTW σειρά 197. Επί πλέον, δείγματα νερού συλλέγονταν από όλους τους σταθμούς και μεταφέρονταν με φορητό ψυγείο, για καλύτερη συντήρηση, στο εργαστήριο όπου γινόταν οι χημικές αναλύσεις. Τα δείγματα νερού αναλύονταν για τον

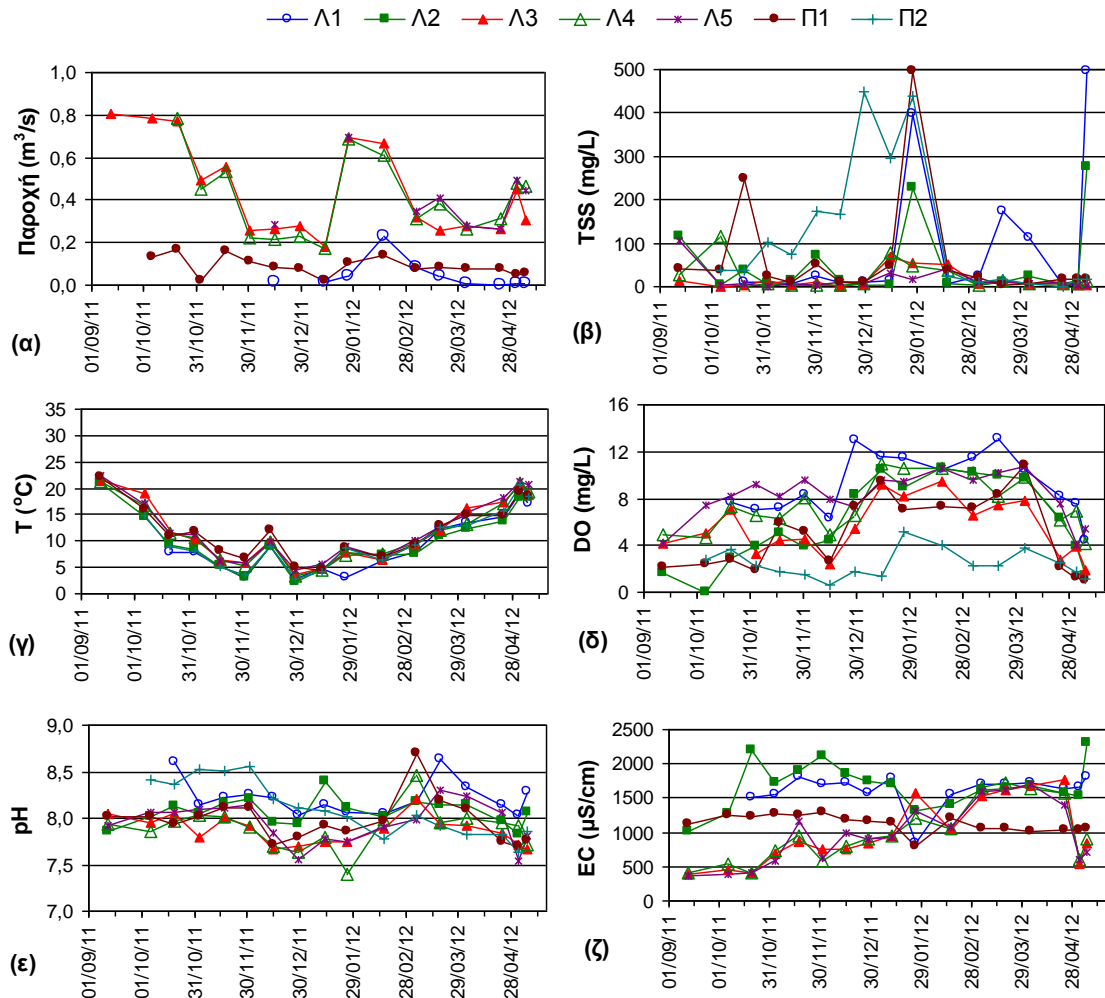
προσδιορισμό της συγκέντρωσης: BOD, COD, νιτρώδους ($\text{NO}_2\text{-N}$), νιτρικού ($\text{NO}_3\text{-N}$) και αμμωνιακού αζώτου ($\text{NH}_4\text{-N}$), ολικού αζώτου Kjeldahl (TKN), ολικού φωσφόρου (TP), ορθοφωσφορικών (OP), ολικών αιωρούμενων στερεών (TSS), αλκαλικότητας (ως CaCO_3), χλωριούχων και θειϊκών ανιόντων και των κυριότερων κατιόντων (Na^+ , K^+ , Mg^{+2} , Ca^{+2}). Για την δειγματοληψία και τη μεθοδολογία των αναλύσεων ακολουθήθηκαν οι οδηγίες του standard methods (APHA, 1998). Οι αναλύσεις των ανιόντων και των κατιόντων έγιναν με τη χρήση του ιοντικού χρωματογράφου (HPLC, Dionex ICS-3000 ion chromatograph).

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

3.1 ΧΩΡΟΧΡΟΝΙΚΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΩΝ ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ

Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται ο μέσος όρος, η τυπική απόκλιση και το εύρος διακύμανσης των φυσικοχημικών παραμέτρων που μετρήθηκαν στον ποταμό Λασπία. Η εποχιακή μεταβολή της παροχής του ποταμού Λασπία φαίνεται στο Σχήμα 2α. Η παροχή στο σταθμό Λ1 κυμάνθηκε από $0,0 \text{ m}^3/\text{s}$ έως $0,23 \text{ m}^3/\text{s}$ ενώ στο σταθμό Λ3 η παροχή κυμάνθηκε από $0,18 \text{ m}^3/\text{s}$ έως $0,80 \text{ m}^3/\text{s}$, κυρίως λόγω της συνεισφοράς των δύο παραποτάμων Π1 και Π2. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων έδειξαν ότι η μέση τιμή στο σταθμό Λ5 ($0,40 \text{ m}^3/\text{s}$, κοντά στις εκβολές) είναι μικρότερη από την μέση τιμή στο σταθμό Λ3 ($0,45 \text{ m}^3/\text{s}$), γεγονός που αποδίδεται στον εμπλουτισμό του υπόγειου υδροφόρου. Η παροχή στο σταθμό Π1 δεν παρουσιάζει μεγάλη εποχιακή μεταβολή (Σχήμα 2α) καθώς ο παραπόταμος αυτός μεταφέρει τα επεξεργασμένα υγρά απόβλητα από τη ΜΕΥΑ της Ξάνθης. Η μέση τιμή της συγκέντρωσης των αιωρούμενων στερεών στους περισσότερους σταθμούς βρίσκεται σε χαμηλά επίπεδα. Η μέση συγκέντρωση των TSS στο Λασπία κυμάνθηκε από $16,0 \text{ mg/L}$ στο σταθμό Λ5 έως $116,5 \text{ mg/L}$ στο σταθμό Π2 (Πίνακας 2, Σχήμα 2β). Στο σταθμό Λ1 (Σχήμα 2β) υπάρχει περιστασιακά αυξημένη συγκέντρωση αιωρούμενων στερεών η οποία το μήνα Ιανουάριο συμπίπτει με αυξημένη παροχή λόγω βροχοπτώσεων. Οι αυξημένες τιμές της συγκέντρωσης των αιωρούμενων στερεών που μετρήθηκαν στους σταθμούς Λ1, Π1 και Π2 (Πίνακας 2, Σχήμα 2β), συνδέονται με την ύπαρξη, πλησίον των σταθμών αυτών, μονάδων εκτροφής ζώων. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι παρά τις μεγάλες συγκεντρώσεις TSS, οι οποίες μετρήθηκαν στο σταθμό Π2, η επίδραση στην τελική συγκέντρωση των TSS στους σταθμούς Λ3, Λ4, Λ5 (βρίσκονται κατάντη του Π2) δεν είναι σημαντική λόγω της μικρής παροχής του Π2.

Η θερμοκρασία παρουσίασε την κανονική εποχιακή διακύμανση και ήταν παρόμοια σε όλους τους σταθμούς (Σχήμα 2γ, Πίνακας 2). Η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου παρουσίασε αντίθετη τάση από αυτή της θερμοκρασίας εμφανίζοντας τις μεγαλύτερες τιμές την χειμερινή περίοδο (Σχήμα 2δ). Η μικρότερη μέση τιμή της συγκέντρωσης του DO ($2,4 \text{ mg/L}$) βρέθηκε στο σταθμό Π2, γεγονός που αποδίδεται σε αυξημένη ρύπανση του νερού του παραποτάμου. Στον ίδιο σταθμό η διακύμανση της συγκέντρωσης του DO ήταν από $0,6 \text{ mg/L}$ έως $5,2 \text{ mg/L}$, μικρότερη από όλους τους άλλους σταθμούς (Σχήμα 2δ, Πίνακας 2). Η μέση τιμή του pH σε όλους τους σταθμούς ήταν στην αλκαλική περιοχή χωρίς αξιοσημείωτες διακυμάνσεις κατά την περίοδο των μετρήσεων (Σχήμα 2ε, Πίνακας 2). Μεγαλύτερες τιμές EC μετρήθηκαν στο σταθμό Π2 (μέση τιμή $6,3 \text{ mS/cm}$, Πίνακας 2) λόγω αγροτικών αλλά κυρίως λόγω βιομηχανικών δραστηριοτήτων (π.χ. εκροή από βαφείο υφασμάτων και κλωστών). Στους άλλους σταθμούς η μέση τιμή της EC κυμάνθηκε από $1,68 \text{ mS/cm}$ (στον Λ2) έως $0,96 \text{ mS/cm}$ (Λ5). Τη μικρότερη διακύμανση στην EC, για την περίοδο των μετρήσεων, παρουσίασε ο σταθμός Π1 ($0,80 \text{ mS/cm}$ έως $1,79 \text{ mS/cm}$), λόγω της εκροής της ΜΕΥΑ (Σχήμα 2ζ, Πίνακας 2). Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων είναι φανερό ότι ο παραπόταμος Π2 δεν επηρεάζει την τιμή της EC κατάντη (σταθμοί Λ3, Λ4, Λ5), λόγω της σχετικά μικρής του παροχής.



Σχήμα 2. Εποχιακή μεταβολή: (α) παροχής, (β) αιωρούμενων στερεών, (γ) T, (δ) DO, (ε) pH, (ζ) EC, κατά μήκος του ποταμού Λασπία και στους κυριότερους παραποτάμους του.

Το Σχήμα 3 παρουσιάζει την εποχιακή και χωρική διακύμανση των: BOD, COD, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_x\text{-N}$ ($\text{NO}_2\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N}$) και TP. Επιπλέον, παρουσιάζει και γραφήματα τύπου box-whisker για τις παραπάνω παραμέτρους. Οι γραμμές στο κάθε πλαίσιο ορίζουν την μέγιστη και ελάχιστη τιμή, το πλαίσιο ορίζεται από το κάτω και πάνω τεταρτημόριο και η γραμμή στο κέντρο του πλαισίου είναι η διάμεση τιμή.

Οι συγκεντρώσεις του BOD και του COD στα μη-ρυπασμένα επιφανειακά νερά, συνήθως είναι 2 mg/L και 20 mg/L, αντίστοιχα, ενώ το όριο που θέτει η ΕΕ για την αλιεία και την υδρόβια ζωή για το BOD είναι 3-6 mg/L (Charman, 1996). Η μέση συγκέντρωση του BOD είναι μεγαλύτερη από 2 mg/L σε όλους τους σταθμούς του Λασπία (Πίνακας 2, Σχήμα 3α). Ωστόσο, στους περισσότερους σταθμούς (π.χ. Λ2, Λ3, Λ4 και Λ5) μετρήθηκαν τιμές κάτω από το όριο των 2 mg/L με εξαίρεση τον σταθμό Π1, ο οποίος δέχεται την εκροή από την ΜΕΥΑ και τους σταθμούς Λ1 και Π2, οι οποίοι βρίσκονται πλησίον μονάδων εκτροφής ζώων. Το διάγραμμα box-whisker για το BOD, δείχνει ότι υπάρχει σημαντική διαφορά στη μέση τιμή της συγκέντρωσης BOD στο σταθμό Π1 σε σχέση με τους άλλους σταθμούς Λ1, Λ3, Λ4 και Λ5. Σε όλους τους σταθμούς, η μέση συγκέντρωση του COD ήταν μεγαλύτερη από το όριο των 20 mg/L (Πίνακας 2, Σχήμα 3β). Το αντίστοιχο διάγραμμα box-whisker δείχνει ότι δεν υπάρχει σημαντική διαφορά στη μέση τιμή της συγκέντρωσης του COD μεταξύ των σταθμών. Μεγαλύτερη μέση τιμή βρέθηκε στο σταθμό Π2 (128,8 mg/L) και μικρότερη στο σταθμό Λ3 (53,0 mg/L).

Πίνακας 2. Στατιστική επισκόπηση φυσικοχημικών παραμέτρων του νερού του Λασπία

	Σταθμοί μέτρησης						
	Λ1	Λ2	Λ3	Λ4	Λ5	Π1	Π2
<u>Παροχή (m³/s)</u>							
ΜΟ	0,04	-	0,45	0,41	0,40	0,09	-
ΤΑ	0,07	-	0,22	0,19	0,15	0,04	-
Ελαχ-Μεγ	0,00-0,23	-	0,18-0,80	0,17-0,78	0,27-0,70	0,02-0,16	-
<u>T (°C)</u>							
ΜΟ	8,9	10,2	11,9	11,6	12,3	11,9	10,1
ΤΑ	5,2	5,5	5,9	5,8	5,9	5,1	5,4
Ελαχ-Μεγ	2,7-19,1	2,1-21,1	3,6-21,5	3,4-21,4	4,4-22,4	4,6-22,1	2,9-20,7
<u>DO (mg/L)</u>							
ΜΟ	9,2	6,4	5,5	7,5	8,2	5,0	2,4
ΤΑ	2,6	3,3	2,4	2,3	2,1	3,1	1,2
Ελαχ-Μεγ	4,4-13,1	1,4-10,6	1,9-9,4	4,2-10,9	4,0-10,8	0,9 -10,8	0,6-5,2
<u>pH</u>							
ΜΟ	8,2	8,1	7,9	7,9	7,9	8,0	8,1
ΤΑ	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3
Ελαχ-Μεγ	8,0-8,6	7,8-8,4	7,7-8,2	7,4-8,5	7,5-8,3	7,7-8,7	7,6-8,6
<u>EC (mS/cm)</u>							
ΜΟ	1,62	1,68	0,98	0,98	0,96	1,13	6,30
ΤΑ	0,23	0,33	0,47	0,44	0,45	0,13	4,02
Ελαχ-Μεγ	0,85-1,82	1,01-2,31	0,39-1,76	0,40-1,73	0,37-1,70	0,80-1,29	1,71-12,42
<u>BOD (mg/L)</u>							
ΜΟ	10,9	17,9	11,2	8,3	9,9	39,9	97,6
ΤΑ	8,0	21,8	8,9	8,1	8,1	19,7	125,1
Ελαχ-Μεγ	3,2-24,3	1,1-71,2	1,7-26,0	2,0-28,3	1,7-23,7	14,7-80,0	5,1-382,3
<u>COD (mg/L)</u>							
ΜΟ	89,3	97,9	53,0	81,3	92,9	99,9	128,8
ΤΑ	70,1	79,1	44,0	80,0	85,9	66,7	127,0
Ελαχ-Μεγ	12,0-228,7	15,1-334,9	4,4-173,1	4,3-296,7	1,7-307,0	13,3-234,5	3,6-387,9
<u>NO_x-N (mg N/L)</u>							
ΜΟ	6,2	5,0	2,3	2,1	2,2	4,0	6,3
ΤΑ	3,6	2,2	1,2	1,1	1,3	4,9	6,1
Ελαχ-Μεγ	1,4-11,8	0,7-7,2	0,7-4,4	0,6-4,3	0,6-4,8	0,7-18,2	0,8-15,6
<u>NH₄-N (mg N/L)</u>							
ΜΟ	16,9	27,0	14,8	12,7	12,8	21,9	36,1
ΤΑ	20,5	24,5	8,8	5,9	7,4	14,1	30,4
Ελαχ-Μεγ	6,3-83,7	5,3-77,3	4,8-32,9	5,3-25,1	4,2-29,4	6,7-53,3	6,0-91,5
<u>TKN (mg N/L)</u>							
ΜΟ	31,6	29,1	22,5	16,6	18,3	28,4	46,9
ΤΑ	24,2	20,9	16,7	7,3	7,1	14,1	26,3
Ελαχ-Μεγ	8,1-85,0	8,1-70,1	3,4-67,4	8,7-32,6	8,4-33,2	8,6-53,7	13,0-92,4
<u>TP (mg P/L)</u>							
ΜΟ	0,4	0,3	0,3	0,3	0,2	0,4	0,4
ΤΑ	0,3	0,3	0,3	0,4	0,2	0,3	0,3
Ελαχ-Μεγ	0,1-1,2	0,1-1,0	0,02-1,1	0,04-1,2	0,05-0,8	0,04-0,8	0,04-1,2
<u>TSS (mg/L)</u>							
ΜΟ	86,7	49,2	16,0	22,4	16,0	64,5	116,5
ΤΑ	154,8	82,4	20,6	31,4	24,9	124,9	150,8
Ελαχ-Μεγ	3,2-495,3	2,2-276,4	1,0-68,4	1,0-115,4	0,5-104,0	3,4-497,0	0,7-449,0

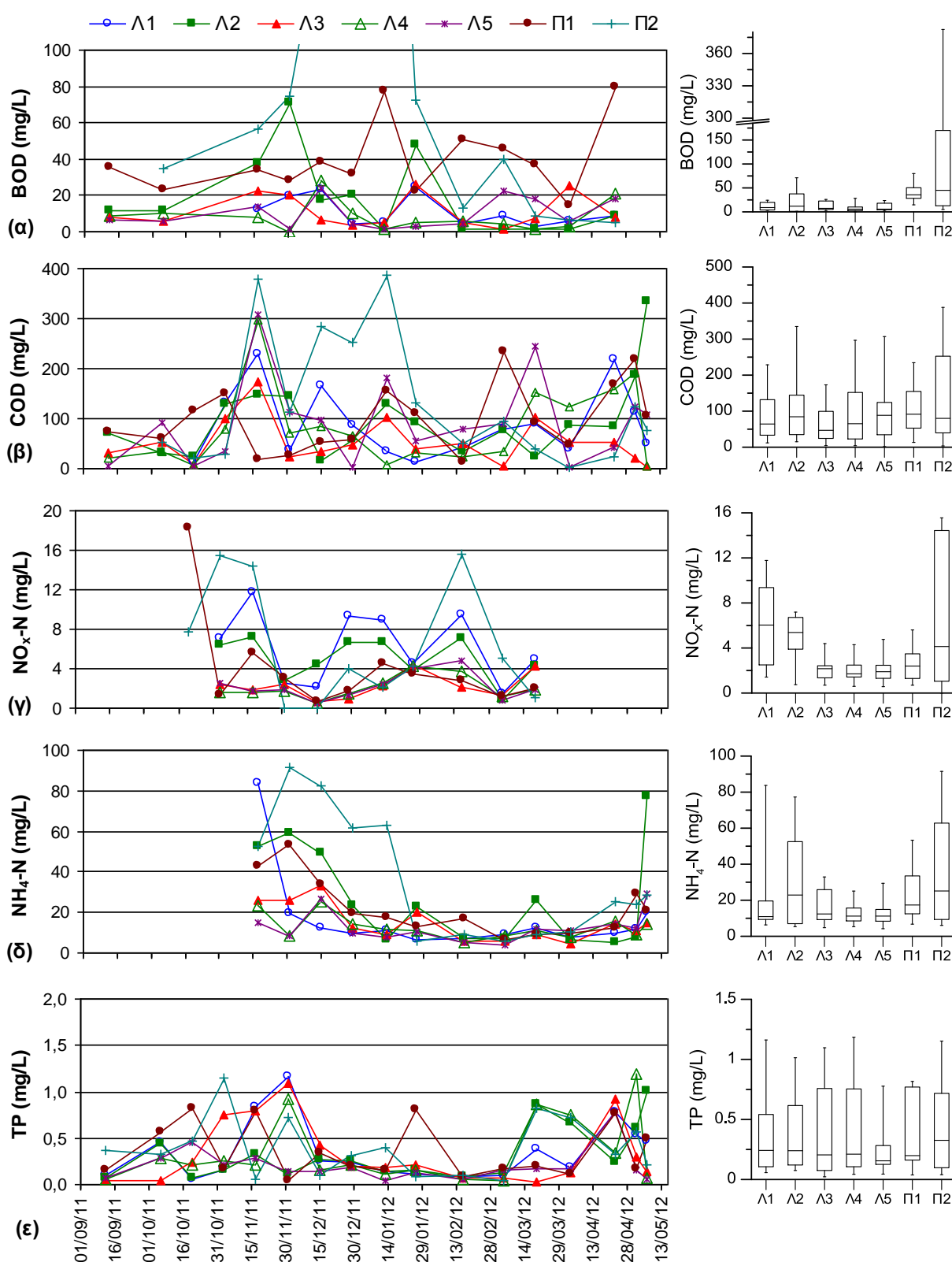
Πίνακας 2. (συνέχεια)

	Λ1	Λ2	Λ3	Λ4	Λ5	Π1	Π2
<u>Αλκαλικότητα (mg CaCO₃/L)</u>							
ΜΟ	125,7	125,4	98,5	77,7	79,8	135,3	88,1
ΤΑ	93,5	102,5	45,2	42,5	35,1	105,2	94,0
Ελαχ-Μεγ	33,0-340,0	19,0-347,0	31,0-150,0	28,0-153,0	18,0-130,0	33,0-342,0	10,0-295,0
<u>Cl⁻ (mg/L)</u>							
ΜΟ	166,3	203,3	141,3	121,0	122,5	134,5	676,6
ΤΑ	75,0	128,5	71,4	50,9	46,4	39,2	396,8
Ελαχ-Μεγ	63,1-249,9	30,9-520,6	64,6-262,5	59,4-232,5	48,5-195,6	58,8-184,9	125,4-1505,4
<u>SO₄⁻² (mg/L)</u>							
ΜΟ	143,4	115,1	49,8	49,4	53,5	93,4	242,3
ΤΑ	102,9	79,0	33,9	24,2	26,9	94,8	350,7
Ελαχ-Μεγ	21,9-361,6	12,7-294,9	26,4-119,9	26,1-89,8	25,3-87,5	22,6-356,1	19,7-1148,5
<u>Na⁺ (mg/L)</u>							
ΜΟ	110,9	133,4	104,7	92,7	94,6	117,3	511,1
ΤΑ	42,6	84,6	44,7	36,7	39,0	52,3	275,6
Ελαχ-Μεγ	23,5-151,6	25,7-349,4	59,9-173,8	50,3-185,2	42,6-172,8	46,0-246,4	89,4-964,2
<u>K⁺ (mg/L)</u>							
ΜΟ	18,7	33,9	12,1	10,1	11,3	40,0	65,0
ΤΑ	9,7	29,7	3,4	3,2	4,2	51,3	62,2
Ελαχ-Μεγ	6,1-35,8	4,7-97,0	8,9-20,2	5,5-15,7	4,6-15,6	6,8-167,9	8,5-190,1
<u>Mg⁺² (mg/L)</u>							
ΜΟ	34,4	44,1	18,1	17,3	18,0	27,4	51,2
ΤΑ	15,2	25,1	8,5	8,0	8,1	38,2	35,8
Ελαχ-Μεγ	8,1-52,3	6,4-99,8	10,0-31,2	9,3-34,9	8,8-32,7	8,7-141,7	13,2-106,4
<u>Ca⁺² (mg/L)</u>							
ΜΟ	112,8	146,4	78,5	74,0	73,8	142,1	182,2
ΤΑ	52,8	91,3	22,8	20,4	22,3	199,3	169,0
Ελαχ-Μεγ	34,5-163,4	43,9-378,8	55,4-117,7	49,3-118,6	38,8-112,4	45,1-706,0	32,3-475,1

ΜΟ: μέση τιμή, ΤΑ: τυπική απόκλιση, Ελαχ: ελάχιστη τιμή, Μεγ: μέγιστη τιμή

Η συγκέντρωση του νιτρώδους και νιτρικού αζώτου (NO_x-N) στον Λασπία κυμάνθηκε από 0,6 έως 18,2 mg/L (Πίνακας 2). Η μικρότερη μέση τιμή βρέθηκε στο σταθμό Λ4 (2,1 mg/L) και η μεγαλύτερη στο σταθμό Π2 (6,3 mg/L), καθώς και στο σταθμό Λ1 (6,2 mg/L). Οι αυξημένες τιμές στους σταθμούς Π2 και Λ1 αποδίδονται σε ανθρώπινες δραστηριότητες (π.χ. εκροή ανεπεξέργαστων λυμάτων από εγκαταστάσεις εκτροφής ζώων και αγροτικές δραστηριότητες). Το αντίστοιχο διάγραμμα box-whisker δείχνει ότι η μέση συγκέντρωση του NO_x-N στους σταθμούς Λ1 και Λ2 είναι σημαντικά μεγαλύτερη από αυτή στους σταθμούς Λ3, Λ4, Λ5. Οι υψηλές τιμές της συγκέντρωσης του NO_x-N στο σταθμό Π2 φαίνεται ότι δεν επηρεάζουν πολύ την συγκέντρωση αυτού στους σταθμούς Λ3, Λ4 και Λ5, οι οποίοι βρίσκονται κατάντη του Π2. Σε όλους τους σταθμούς η συγκέντρωση του νιτρώδους και νιτρικού αζώτου, είναι μεγαλύτερη από 100 μg/L, το οποίο θεωρείται όριο για μη ρυπασμένα νερά ποταμών (Charman, 1998).

Η μέση συγκέντρωση του αμμωνιακού αζώτου (NH₄-N) κυμάνθηκε από 12,7 mg/L στο σταθμό Λ4 έως 36,1 mg/L στο σταθμό Π2 (Πίνακας 2). Επιπλέον, όλες οι μετρήσεις της συγκέντρωσης του NH₄-N ήταν πάνω από το όριο (0,005-0,025 mg N/L) που θέτει η Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) για αλιεία και υδρόβια ζωή (Charman, 1996), δείχνοντας ότι τα νερά του Λασπία είναι ρυπασμένα σε μεγάλο βαθμό. Το Σχήμα 3δ δείχνει ότι η συγκέντρωση του NH₄-N είναι σημαντικά μεγαλύτερη στους σταθμούς Λ2, Π1 και Π2 σε σχέση με τους άλλους σταθμούς.



Σχήμα 3. Εποχιακή μεταβολή των συγκεντρώσεων και αντίστοιχα διαγράμματα τύπου box-whisker, των κυριότερων ρύπων: (α) BOD, (β) COD, (γ) $\text{NH}_4\text{-N}$, (δ) $\text{NO}_x\text{-N}$, (ε) TP, κατά μήκος του ποταμού Λασπία και στους κυριότερους παραποτάμους του.

Η αυξημένη συγκέντρωση στους σταθμούς Λ2 και Π2 αποδίδεται στην ύπαρξη μονάδων εκτροφής ζώων στην περιοχή αυτή, ενώ η συγκέντρωση στο σταθμό Π1 επηρεάζεται από την εκροή των επεξεργασμένων αστικών λυμάτων από την ΜΕΥΑ. Η μέση συγκέντρωση του ΤΚΝ κυμάνθηκε από 16,6 mg N/L στο σταθμό Λ4 μέχρι 46,9 mg N/L στο σταθμό Π2 (Πίνακας 2). Συγκρίνοντας τις μέσες τιμές των συγκεντρώσεων του $\text{NH}_4\text{-N}$ και του ΤΚΝ, στους σταθμούς του Λασπία προκύπτει ότι μεγαλύτερο ποσοστό του ΤΚΝ είναι αμμωνιακό άζωτο. Πιο συγκεκριμένα το ποσοστό του αμμωνιακού αζώτου στο συνολικό ΤΚΝ είναι 53,5%, 92,7%, 65,8%, 76,8%, 70,0%, 77,2% και 76,9% στους σταθμούς Λ1, Λ2, Λ3, Λ4, Π1 και Π2, αντίστοιχα.

Η συγκέντρωση του TP στο νερό του ποταμού Λασπία παρουσίασε εποχιακή διακύμανση (Σχήμα 3ε). Οι μεγαλύτερες τιμές μετρήθηκαν όταν η παροχή του ποταμού ήταν μεγάλη δείχνοντας έτσι και τη συνεισφορά των μη σημειακών πηγών στη διαμόρφωση της συγκέντρωσης του TP. Η μέση τιμή της συγκέντρωσης του TP κυμάνθηκε από 0,2 mg P/L στο σταθμό Λ5 έως 0,4 mg P/L στους σταθμούς Λ1, Π1 και Π2. Το διάγραμμα box-whisker (Σχήμα 3ε) δείχνει ότι δεν υπάρχει σημαντική διαφορά στις μέσες τιμές των συγκεντρώσεων του TP μεταξύ των σταθμών. Στα περισσότερα φυσικά επιφανειακά νερά ο φώσφορος κυμαίνεται από 0.005 έως 0,02 mg P/L (Chapman, 1996)

Οι μέσες συγκεντρώσεις των ανιόντων Cl^- και SO_4^{2-} στο σταθμό Π2 είναι πολλαπλάσιες από τις αντίστοιχες μέσες συγκεντρώσεις στους άλλους σταθμούς (Πίνακας 2). Οι υψηλές συγκεντρώσεις στον συγκεκριμένο σταθμό αποδίδονται στις εκροές ανεπεξέργαστων αποβλήτων από βιοτεχνία βαφής και λεύκανσης υφασμάτων. Οι μέσες τιμές των συγκεντρώσεων για τα ανιόντα Cl^- και SO_4^{2-} σε όλους τους σταθμούς πλην του Π2 (Πίνακας 2), είναι μικρότερες από το όριο για πόσιμο νερό (EC, 1998), το οποίο είναι 250 mg/L και για τα δύο ανιόντα. Μεγαλύτερες μέσες τιμές συγκεντρώσεων για τα κατιόντα Na^+ , K^+ , Mg^{+2} και Ca^{+2} μετρήθηκαν στο σταθμό Π2 (Πίνακας 2). Οι υψηλές συγκεντρώσεις των παραπάνω ιόντων που μετρήθηκαν στο σταθμό Π2, συμβάλλουν στην αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, της οποίας η μέση τιμή στον σταθμό αυτό ήταν 6,3 mS/cm. Μικρότερες τιμές των συγκεντρώσεων των παραπάνω κατιόντων μετρήθηκαν στους σταθμούς Λ4 και Λ5, οι οποίοι βρίσκονται κοντά στις εκβολές του ποταμού στη θάλασσα. Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων των ανιόντων και των κυριότερων κατιόντων φαίνεται ότι η ποιότητα του νερού στον παραπόταμο Π2 δεν είναι καλή. Επίσης, η ποιότητα των νερών του Λασπία στους σταθμούς Λ3, Λ4, Λ5 (βρίσκονται κατάντη του Π2) δεν επηρεάζεται από την ποιότητα του νερού στο σταθμό Π2, γεγονός που αποδίδεται στην χαμηλή παροχή του παραποτάμου αυτού.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα μελέτη παρουσιάστηκε η ποσότητα και η ποιότητα του νερού στον ποταμό Λασπία. Η μελέτη έγινε τη χρονική περίοδο από τον Οκτώβριο 2011 μέχρι τον Μάιο 2012 και περιλάμβανε επί τόπου μετρήσεις και δειγματοληψίες σε επτά (7) σταθμούς κατά μήκος του ποταμού και στους παραποτάμους του. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων έδειξαν ότι η ποιότητα του νερού του Λασπία επηρεάζεται από τις ανθρώπινες δραστηριότητες. Οι τιμές του pH ήταν στην αλκαλική περιοχή. Οι μέσες τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας κυμάνθηκαν από 0,96 mS/cm έως 6,3 mS/cm, δείχνοντας ότι η παρουσία των διαλυμένων αλάτων στο νερό του ποταμού είναι μεγάλη. Οι μέσες τιμές των συγκεντρώσεων για το BOD και το COD ήταν πάνω από τα όρια για μη ρυπασμένα νερά. Επιπλέον, η συγκέντρωση του αμμωνιακού αζώτου σε όλους τους σταθμούς ήταν πάνω από τα όρια που θέτει η ΕΕ για αλιεία και υδρόβια ζωή. Κυριότερες πηγές ρύπανσης αναδεικνύονται οι εκροές από την ΜΕΥΑ καθώς και οι εκροές από βαφεία υφασμάτων, ενώ σημαντική επίδραση έχουν και οι μονάδες εκτροφής ζώων που βρίσκονται στην περιοχή. Όλα τα παραπάνω δίνουν ένα μήνυμα για την ανάγκη λήψης μέτρων, για την προστασία του οικοσυστήματος αυτού.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- APHA, AWWA 1998. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20th Edition. Washington D.C., USA.
- Boskidis, I., Gikas, G.D., Sylaios, G. and Tsihrintzis, V.A. 2011. *Water quantity and quality assessment of lower Nestos river, Greece*. Journal of Environmental Science and Health-Part A, 46: 1050-1067.
- Boskidis I., G.D. Gikas, V., Pisinaras and V.A. Tsihrintzis 2010. *Spatial and temporal changes of water quality, and SWAT modeling of Vosvozis river basin, North Greece*. Journal of Environmental Science and Health-Part A, 45(11): 1421-1440.
- Chapman, D. 1996. *Water Quality Assessments, A Guide to the Use of Biota, Sediments and Water in Environmental Monitoring*, 2nd Edition. Chapman & Hall, Great Britain, University Press, Cambridge.
- EC. 2000. *Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of October 23 2000 establishing a framework for community action in the field of water policy*. Official Journal of the European Communities, L327/1-L327/72, 22-12-2000.
- EC, 1998. *Council-Directive-1998/83/EC. On the quality of water intended for human consumption*. Adopted by the Council, on 3 November 1998
- Gikas G.D., Yiannakopoulou, T. and Tsihrintzis, V.A. 2006a. *Modeling of non-point source pollution in a Mediterranean drainage basin*. Environmental Modeling and Assessment, 11: 219-233.
- Gikas, G.D., Yiannakopoulou, T. and Tsihrintzis, V.A. 2009a. *Hydrodynamic and nutrient modeling in a Mediterranean coastal lagoon*. Journal of Environmental Science and Health-Part A, 44(13): 1400-1423.
- Gikas, G.D., Yiannakopoulou, T. and Tsihrintzis, V.A. 2006b. *Water quality trends in a coastal lagoon impacted by non-point source pollution after implementation of protective measures*. Hydrobiologia, 563: 385-406.
- Gikas, G.D., Tsihrintzis, V.A., Akrotas, C.S. and Haralambidis, G. 2009b. *Water quality trends in Polyphytos reservoir, Aliakmon River, Greece*. Environmental Monitoring and Assessment, 149(1-4): 163-181.
- Jarvie, H.P., Whitton, B.A. and Neal, C. 1998. *Nitrogen and phosphorus in east coast British rivers: speciation, sources and biological significance*. Science of the Total Environment, 210(1-6): 79-109.
- Novotny, V. and Olem, H. 1994. *Water Quality: Prevention, Identification and Management of Diffuse Pollution*. Van Nostrand Reinhold, USA.
- Sanchez-Montoya, M.M., Arce, M.I., Vidal-Abarca, M.R, Suarez, M.L., Prat, N. and Gomez, R. 2012. *Establishing physico-chemical reference conditions in Mediterranean streams according to the European Water Framework Directive*. Water Research, 46: 2257-2269
- Singh, K.P., Malik, A. and Sinha, S. 2005. *Water quality assessment and apportionment of pollution sources of Gomti river (India) using multivariate statistical techniques— a case study*. Analytica Chimica Acta, 538: 355–374.

**ΔΙΕΡΕΥΝΩΝΤΑΣ ΤΗΝ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ
ΚΑΙΝΟΤΟΜΩΝ ΚΟΧΛΙΩΤΩΝ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ
Άλκηστη Στεργιοπούλου^{1*}, Ευφροσύνη Καλκάνη²**

¹Ε.Μ.Π. – Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Υποψήφια Διδάκτωρ Ε.Μ.Π.

²Ε.Μ.Π. – Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

*Διεύθυνση συγγραφέα επικοινωνίας: Ηρώων Πολυτεχνείου 9,
Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, 15780, Αθήνα, e-mail: alkisti_ster@yahoo.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το παρόν άρθρο πραγματεύεται την προκαταρκτική διερεύνηση της υδροδυναμικής συμπεριφοράς των κοχλιωτών υδροστροβίλων, κεκλιμένου και οριζοντίου άξονα για την αξιοποίηση της υδραυλικής ενέργειας θέσεων χαμηλού διαθέσιμου φορτίου, αλλά και της κινητικής ενέργειας, σε συνθήκες ελεύθερης ροής, φυσικών και τεχνητών υδατορευμάτων, όπως επίσης και των θαλασσίων και παλιρροιακών ρευμάτων. Υιοθετώντας την θεωρία ομοιότητας αναπτύχθηκαν εργαστηριακοί προσομοιωτές κοχλιωτών δρομέων υδροστροβιλικής λειτουργίας και έγιναν προσεγγίσεις για μια πλειάδα μικρών υδροηλεκτρικών έργων, με κοχλιωτούς υδροστροβίλους ακόμη και σε συνθήκες μηδενικού φορτίου συμπεριλαμβανομένων και των ιδιαιζόντων θαλασσίων και παλιρροιακών ρευμάτων της Κεφαλληνίας και του Ευρίπου.

**INVESTIGATING THE HYDRODYNAMIC BEHAVIOR OF
INNOVATIVE COCHLEAR HYDRO-TURBINES
Alkisti Stergiopoulou^{1*}, Effrosini Kalkani²**

¹N.T.U.A. – School of Civil Engineering, Ph.D. Candidate

²N.T.U.A. – School of Civil Engineering, Professor of Hydraulics

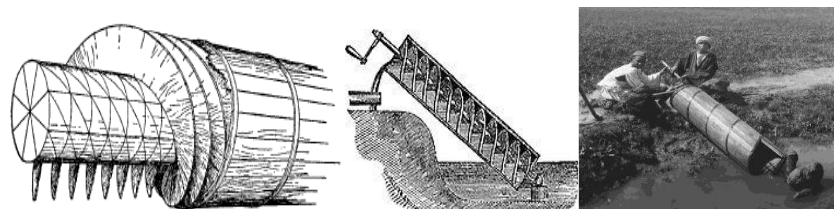
*Correspondence Address: 9 Iroon Polytechniou, Zographou 15780, Athens,
e-mail: alkisti_ster@yahoo.gr

ABSTRACT

The present paper presents the investigation of the hydrodynamic behavior of cochlear hydropower turbines, with inclined and horizontal axis, for the exploitation of the low-head hydraulic energy and the kinetic energy of natural and artificial watercourses, including coastal and tidal currents. By using the similarity theory, some experimental cochlear rotors have been developed and some approaches have been made for a series of cochlear small hydropower plants covering small heads, including conditions with zero heads for the particular cases of the coastal and tidal currents of Cephalonia and Euripus Strait.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Μια από τις παλαιότερες στροβιλομηχανές που παραμένουν όμως ακόμη και σήμερα σε λειτουργία είναι ο ατέρμων κοχλίας, ή υδρόβιδα, η αρχιμήδεια κοχλιωτή αντλία, μια διάταξη άντλησης νερού για αρδευτικούς και στραγγιστικούς σκοπούς, συνιστάμενη από μια σπειροειδή σωλήνωση, με κεκλιμένο άξονα, ικανή να αντλήσει αποτελεσματικά ικανοποιητικές ποσότητες νερού. Η ανακάλυψή της αποδίδεται στην μεγαλύτερη ίσως μηχανική και μαθηματική ευφυΐα της αρχαιότητας και όλων των εποχών, στον Αρχιμήδη τον Συρακούσιο κατά τον 3^ο π.χ. αιώνα. Πρόκειται για μια ευφύεστατη αντλητική διάταξη που λειτουργεί με απλό και κομψό τρόπο περιστρέφοντας ένα κεκλιμένο στροφέιο με ελικοειδή πτερύγωση εντός προσαγωγού κυλίνδρου, του οποίου το κάτω άκρο είναι βυθισμένο εντός των προς άντληση υδάτων. Μόλις ο κοχλίας περιστραφεί, το νερό κινούμενο ανοδικά ανάμεσα στα ελικοειδή πτερύγια και στα τοιχώματα του σωληνωτού προσαγωγού, μεταφέρεται στο άνω άκρο της κοχλιωτής διάταξης. Από την εποχή της συγγραφής από τον Βιτρούβιο του μνημειώδους έργου μηχανικής “De Architectura”, τον 1^ο π.Χ. αιώνα, και έκτοτε, η κλασική περιγραφή του Αρχιμήδειου κοχλία συνεχίζει να συμβάλει τα μέγιστα στο να καταστεί ο κοχλίας αυτός η πλέον διαχρονικά παγκοσμίως γνωστή υδραυλική διάταξη, που ακόμη και σήμερα που συνεχίζει να κυριαρχεί όχι μόνον στον χώρο των αντλητικών και αρδευτικών εφαρμογών, σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων αλλά σε μια ευρύτατη θεματολογία και άλλων θεματικών τεχνολογικών τομέων που σχετίζονται ακόμη και με στρατιωτικές ή διαστημικές εφαρμογές πρόωσης καθώς και με την ναυομηχανική ή την εμβιομηχανική. Μια άποψη του φημισμένου Βιτρούβιου οκταπτερυγιάκου αρχιμήδειου κοχλία, όπως περιγράφεται στο έργο “De Architectura”, μαζί με ένα τρίπτερο αρχιμήδειο κοχλία, καθώς και με αγρότες στην περιοχή του δέλτα του Νείλου της Αιγύπτου που χρησιμοποιούν έναν κλασικό χειροκίνητο αντλητικό κοχλία για άρδευση των καλλιεργούμενων εκτάσεων, παρίστανται στο σχήμα 1 (Stergiopoulou et al., 2009, 2010).

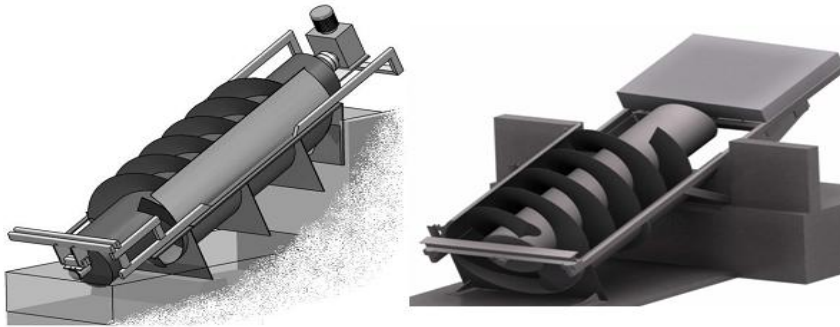


Σχήμα 1. Βιτρούβιες αρχιμήδειες κοχλιωτές αντλητικές εκφάνσεις

2. ΠΡΟΣ ΤΑ ΑΡΧΙΜΗΔΕΙΑ ΚΟΧΛΙΩΤΑ ΜΙΚΡΑ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΕΡΓΑ

Ως κοχλιωτούς υδροστροβίλους στην παρούσα εργασία ορίζονται εκείνες οι μη συμβατικές υδραυλικές στροβιλομηχανές, που βασίζονται στην αντιστροφή της αντλητικής αρχιμήδειας λειτουργίας, μετατρέποντας σε μηχανική ενέργεια, υπό συνθήκες συνεχούς ροής και σταθερής περιστροφικής κίνησης, με την βοήθεια των περιστρεφόμενων με γωνιακή ταχύτητα ω και κινητήρια ροπή M κοχλιωτών δρομέων, κεκλιμένου ή ακόμη και οριζοντίου άξονα, την διαθέσιμη υδραυλική ενέργεια θέσεων χαμηλού διαθέσιμου φορτίου μικρών ή μεγάλων φυσικών και τεχνητών υδατορευμάτων, αλλά και την κινητική υδραυλική ενέργεια, σε συνθήκες ελεύθερης ροής, των μικρών, μεγάλων ποταμών και ανοικτών αγωγών, αλλά και των θαλασσιών και παλιρροιακών ρευμάτων. Η παρούσα εργασία, τμήμα ερευνητικού έργου της δράσης ΑΡΧΙΜΗΔΗΣ ΙΙΙ, με θεματικό τίτλο «Επιστροφή του Αρχιμήδη: Συμβολή στην Μελέτη της Υδραυλικής Μηχανικής και Υδροδυναμικής Συμπεριφοράς των Αρχιμήδειων Κοχλιωτών Υδροτροχών για Ανάκτηση του Υδροδυναμικού Φυσικών και

Τεχνητών Υδατορευμάτων, Θαλασσιών Ρευμάτων και Παλιρροιών», αλλά συγχρόνως και τμήμα υπό εκπόνηση Διδακτορικής Διατριβής στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π., αποτελεί μια πρώτη προσπάθεια προσέγγισης της αντίστροφης αρχιμήδειας υδροδυναμικής συμπεριφοράς, μέσα από την τεχνολογική «επανανακάλυψη», του αντίστροφης λειτουργίας Αρχιμήδειου υδροστροβιλικού ενεργειακού κοχλία, ως σύγχρονο μικρό υδροηλεκτρικό σύστημα κεκλιμένου άξονα (σχήμα 2).



Σχήμα 2. Σχηματικές παραστάσεις κοχλιωτών υδροστροβίλων κεκλιμένου άξονα

Είναι γνωστό ότι η εξαναγκασμένη περιστροφή του δρομέα ενός κοχλιωτού υδροστροβίλου μπορεί να μετασχηματιστεί παραγωγικά με τη βοήθεια κατάλληλου συστήματος σε μηχανική ή ηλεκτρική ισχύ $N = M \cdot \omega$. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κοχλιωτού δρομέα αποτελούν ένα πολύ ενδιαφέρον αντικείμενο μελέτης, διαστασιολόγησης και βελτιστοποίησης, σε συνδυασμό πάντοτε με τα αντικείμενα υπολογιστικής προσομοίωσης του πεδίου ροής, της υδροδυναμικής συμπεριφοράς, της λειτουργίας και της επιτυχούς πρόλεξης των επιδόσεών του. Παρά το γεγονός ότι αρκετές υδραυλικές μηχανές, που έχουν κοινή προέλευση με τον υδραυλικό τροχό, εξελίχθηκαν σημαντικά στο παρελθόν και στη συνέχεια αποστασιοποιήθηκαν πλήρως από αυτόν, όπως ο στρόβιλος Lafond και ο στρόβιλος Banki, οι κοχλιωτοί υδροστροβίλοι, αποτελώντας μη συμβατικούς συνδυασμούς υδροστροβιλοτροχών και υδροστροβίλων, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως αποτελεσματικές υδρομηχανές ανάκτησης της δυναμικής ενέργειας των χαμηλού διαθέσιμου φορτίου φυσικών και τεχνητών υδατορευμάτων, αλλά και της κινητικής ενέργειας ποταμών, ανοικτών αγωγών και θαλασσιών ρευμάτων, παρουσιάζοντας αρκετά διαφοροποιημένα γεωμετρικά και υδροδυναμικά χαρακτηριστικά αλλά και ιδιαίζουσες συνθήκες πεδίου ροής. Οι μηχανές αυτές με κεκλιμένο ή οριζόντιο άξονα, φέρουν κοχλιωτές πτερυγώσεις, διαφοροποιούμενες πλήρως τόσο από τους υδροστροβίλους δράσης όσο και από τους υδροστροβίλους αντίδρασης. Στην περίπτωση των κεκλιμένου άξονα κοχλιωτών υδροστροβίλων ο δρομέας δέχεται την απευθείας διαβαρύτητας δράση του νερού μόνο στο κάτωθεν τμήμα του, ενώ στην περίπτωση των οριζοντίου άξονα κοχλιωτών υδροστροβίλων ο δρομέας καλείται να αξιοποιήσει την κινητική ενέργεια των ρευστών μαζών. Σε κάθε περίπτωση η εξαναγκασμένη περιστροφή του κάθε κοχλιωτού υδροστροβίλου μπορεί να μετασχηματιστεί παραγωγικά με τη βοήθεια κατάλληλου συστήματος σε ισχύ. Είναι γνωστό ότι, οι σύγχρονοι συμβατικοί υδροστροβίλοι διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, στους φέροντες «δρομείς ολικής προσβολής» ή αντιδράσεως και στους φέροντες «δρομείς μερικής προσβολής» ή δράσεως. Οι πρώτοι είναι ακτινικής ή και μικτής ροής τύπου Francis καθώς και αξονικής ροής τύπου Kaplan, σωληνωτούς, βολβοειδείς κ.λ.π., με διασφαλισμένη την αξονοσυμμετρική λειτουργία τους, αλλά και την ικανοποιητική μεταβολή της στατικής πίεσης του νερού. Οι δεύτεροι χαρακτηρίζονται και ως στρόβιλοι δράσεως και είναι

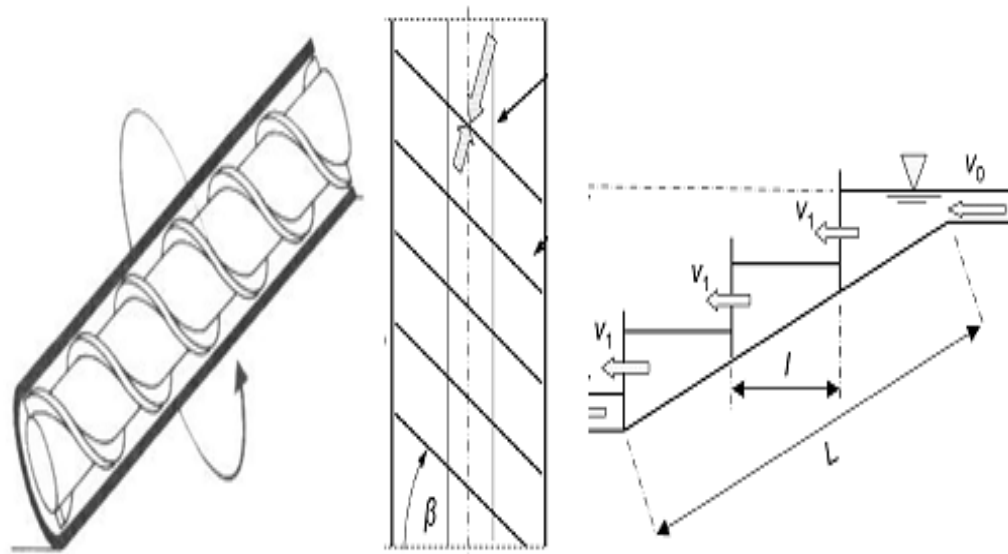
τύπου Pelton, Turgo, Cross-Flow ή Banki, Lafond κ.λ.π.. Σ' αυτούς μόνο ένα τμήμα τους τροφοδοτείται ροϊκά, συμβάλλοντας, υπό συνθήκες ομοιόμορφης στατικής πίεσης και μηδενικού βαθμού αντιδράσεως στον αποτελεσματικό μετασχηματισμό της ενέργειας (E.S.H.A, 1998). Σε αντίθεση με τους συμβατικούς υδροστροβίλους οι μη συμβατικοί κοχλιωτοί υδροστροβίλοι αποτελούν μια ενδιάμεση κατάσταση, τόσο των κλασικών υδροτροχών όσο και των συμβατικών υδροστροβίλων δράσης και αντίδρασης, έχοντας ένα τμήμα των κοχλιωτών πτερυγώσεων έξω από το νερό, στις περιπτώσεις με κεκλιμένο τον άξονά τους, ενώ σε άλλες περιπτώσεις, με οριζόντιο τον άξονα των κοχλιωτών υδροστροβίλων, ο δρομέας όντας πλήρως ή μερικώς βυθισμένος στο νερό, σε συνθήκες περίπλοκης ελεύθερης επιφάνειας, καλείται να αξιοποιήσει την κινητική ενέργεια των ρευστών μαζών.

3. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΚΟΧΛΙΩΤΩΝ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ

Παρά το γεγονός ότι οι απαρχές των κοχλιωτών/ελικοειδών δρομέων, που αποτελούν την καρδιά των κοχλιωτών υδροστροβίλων, χάνονται στα βάθη της κλασικής αρχαιότητας η βιβλιογραφική αναζήτηση κατέδειξε ότι δεν υπάρχει κάποια θεωρία σχεδιασμού, μελέτης της υδροδυναμικής συμπεριφοράς και πρόλεξης των επιδόσεων των κοχλιωτών υδροστροβίλων, ούτε κανένα θεωρητικό μονοδιάστατο, δυσδιάστατο ή τρισδιάστατο μοντέλο υπολογιστικής προσομοίωσης (Rorres, 2000). Σ' αυτό μπορεί να συνέβαλε και η συνήθως κρατούσα, αλλά πλήρως λανθασμένη, εντύπωση ότι, το χαμηλού ύψους διαθέσιμο φορτίο από 0m της ελεύθερης ροής έως 2.5m υδροηλεκτρικό δυναμικό των φυσικών ή τεχνητών υδατορρευμάτων είναι τεχνικά αναξιόπιστο, από τις συνήθεις εξελιγμένες τεχνολογίες υδροστροβίλων, ως τεχνικο-οικονομικά ασύμφορο, και ως οικολογικά εν δυνάμει ευαίσθητο. Κατά συνέπεια σχετικά λίγοι κοχλιωτοί υδροστροβίλοι έχουν κατασκευαστεί και εγκατασταθεί και λειτουργούν σε μικρά υδροηλεκτρικά έργα. Είναι «απορίας άξιον» ότι αυτοί οι ελάχιστοι εγκατεστημένοι κοχλιωτοί υδροστροβίλοι δεν σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν ως κοχλιωτοί υδροστροβίλοι αλλά ως φυσικές προεκτάσεις της λειτουργικής αντιστροφής των κλασικών κοχλιωτών αντλητικών μηχανισμών.

Ο περίπλοκος χαρακτήρας των συνεκτικών εσωτερικών ροών εντός των κοχλιωτών υδροστροβίλων, παρουσιάζει ένα έντονο διαχρονικό, επιστημονικό, τεχνολογικό και υπολογιστικό ενδιαφέρον. Είναι γνωστό ότι οι εσωτερικές ροές επηρεάζονται και από δευτερογενή φαινόμενα που έχουν την έδρα τους τόσο στα οριακά στρώματα της πλήμνης και της πτερυγώσης όσο και στις αλληλεπιδράσεις ροών και πτερυγώσεων. Συνήθως παρά τον κυρίαρχο ρόλο της τύρβης ο ρόλος του ιξώδους θεωρείται περιορισμένος κοντά στα τοιχώματα των κοχλιωτών υδροστροβίλων, κατά τα πρότυπα ενός υπολογιστικού σχήματος τριών ζωνών, με παράλληλη ζεύξη υπολογισμών συνεκτικής και μη συνεκτικής ροής, που θα μπορούσε να προσομοιώσει την ισοδύναμη κινηματική δράση των οριακών στρωμάτων μέσα από έναν «στραγγαλισμό» των εσωτερικών ροών, με κατάλληλες ολοκληρωματικές μεθόδους. Η προσέγγιση του περίπλοκου τρισδιάστατου χαρακτήρα της ροής των στροβιλομηχανών θα μπορούσε να επιτευχθεί με υπέρθεση/σύζευξη δυό επί μέρους διδιάστατων ροών, στη βάση κυρίως των υποθέσεων του Wu, των επιφανειών S_1 και S_2 , σχετικά με μια «μεσημβρινή» ροή και μιας ροής «πτερυγώσεων». Στα πλαίσια μιας απλής, μη συνεκτικής προσέγγισης, και υπολογισμού της βασικής ροής της ιδιάζουσας περίπτωσης του κοχλιωτού υδροστροβίλου, υιοθετήθηκαν μονοδιάστατες, και δυσδιάστατες τεχνικές υπολογισμοί στη μέση γραμμή ροής, κάνοντας προσεγγίσεις τύπου «δίσκου δράσης/ actuator disk», ή ακόμη και υιοθετώντας τεχνικές ζεύξης

δυσδιάστατων ροών, ανάλογη με την μέθοδο Wu τεχνική, με ανάλυση της ροής σε δύο επίπεδα ροής τύπου S1, S2, όπως στο επόμενο σχήμα.

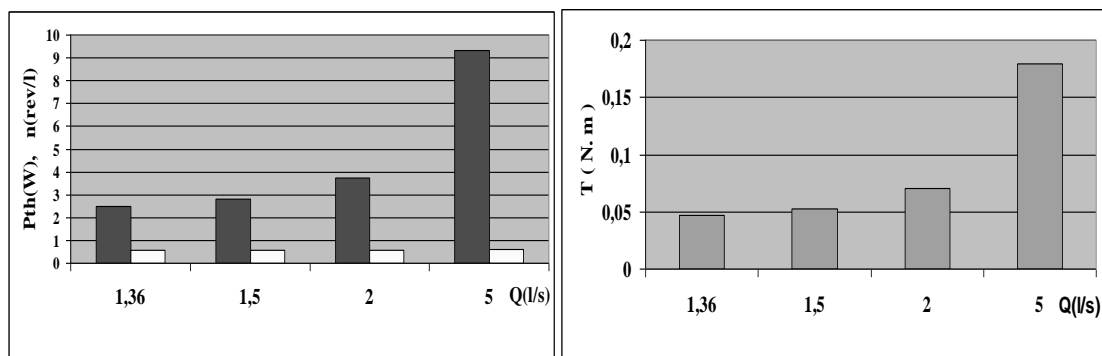


Σχήμα 3. Σχηματική υπολογιστική προσέγγιση κοχλιωτού υδροστροβίλου τύπου «δίσκου δράσης» ή τύπου Wu με ανάλυση της ροής σε δύο επίπεδα ροής.

4. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΤΕΣ ΚΟΧΛΙΩΤΩΝ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΩΝ

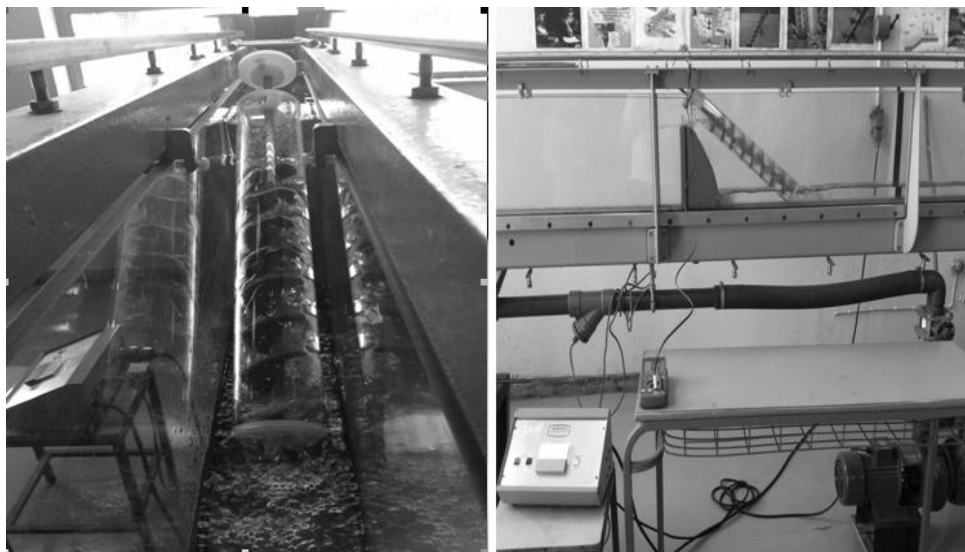
Η γεωμετρία του κοχλιωτού υδροστροβίλου, μήκος, κλίση, εξωτερική διάμετρος, εσωτερική διάμετρος, βήμα της πτερύγωσης, γωνία προσανατολισμού και πάχος της πτερύγωσης κ.λ.π. αποτελεί ένα πολύ ενδιαφέρον αντικείμενο μελέτης διαστασιολόγησης, σχεδιασμού και καθορισμού των ονομαστικών συνθηκών, σε συνάρτηση με το διαθέσιμο φορτίο, την παροχή και την ταχύτητα περιστροφής, με στόχο την βελτιστοποίηση των επιδόσεων της κοχλιωτής υδροστροβιλομηχανής, τόσο σε συνθήκες ονομαστικού σημείου όσο και σε μη ονομαστικές συνθήκες. Χρησιμοποιώντας την μεθοδολογία της θεωρίας ομοιότητας (Buckingham's π-theorem) αναπτύχθηκαν και κατασκευάστηκαν δύο πειραματικά εργαστηριακά πρότυπα-ομοιώματα κοχλιωτών υδροστροβίλων, με κοχλιωτούς δρομείς εντός διαφανών κυλινδρικών προσαγωγών, τα οποία θα μπορούσαν να λειτουργήσουν στις ελεγχόμενες συνθήκες ροής ενός μεγάλου εργαστηριακού ανοικτού καναλιού. Το πρώτο εκ των δύο προτύπων κοχλιωτών υδροστροβίλων κατασκευάστηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να έχει την διπλή ικανότητα να μπορεί να εργάζεται και ως αντλητικός κοχλίας, ενώ το δεύτερο ήταν αποκλειστικά και μόνον υδροστροβιλικό. Σύμφωνα με τον ορισμό των χαρακτηριστικών γεωμετρικών μεγεθών των κατασκευασθέντων προτύπων κοχλιωτών υδροστροβίλων το ενεργό μήκος της κάθε πτερύγωσης είναι 35cm. Το βήμα των κοχλιωτών πτερυγώσεων των δύο πειραματικών προτύπων επιλέχθηκε κοινό και ίσο με $s = 5$ cm, η εξωτερική διάμετρος των δύο καθοδηγητικών διαφανών κυλίνδρων ήταν $d = 7.2$ cm, ενώ η διάμετρος της ατράκτου ήταν $d_m = 1.4$ cm, για το πρώτο πρότυπο, και $d_m = 1.1$ cm για το δεύτερο πρότυπο. Ο αριθμός των βημάτων ήταν 7. Το διάκενο μεταξύ του άκρου της πτερύγωσης και του εξωτερικού κυλίνδρου ήταν 1cm. Κατασκευαστικά οι μέσες τιμές των χαρακτηριστικών αδιάστατων γεωμετρικών μεγεθών των δύο κατασκευασθέντων πειραματικών εργαστηριακών προτύπων-ομοιωμάτων των κοχλιωτών υδροστροβίλων ήταν $s/d = 0.7$ (1.4), $d_m/d = 0.2$ (0.15), $g/d = 0.035$.

Στις εργαστηριακές μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε ένα οπτικό στροφόμετρο, για την μέτρηση της περιστροφικής ταχύτητας n (rev/s), ένα κλισίμετρο, για την μέτρηση της κλίσης α του άξονα του στροφείου και ένας βερνιέρος για την εκτίμηση του βάθους ροής h ($h = L \cdot \sin \alpha$, με $L = 35$ cm, το μήκος του κοχλιωτού δρομέα). Η εσωτερική διάμετρος d_m του στροφείου ήταν $d_m = L/20 - L/25$, ενώ η εξωτερική διάμετρος του ήταν $d = 7.2$ cm. Η παροχή Q (m^3/s) μετρήθηκε με έναν κλασικό μιλίσκο. Ο βαθμός απόδοσης $\eta = P_{out}/P_{in}$, που είναι συνάρτηση της γεωμετρίας και της ταχύτητας περιστροφής n του κοχλία αλλά και της αξιοποιητέας παροχής Q , υπολογίστηκε προσδιορίζοντας την ισχύ εισόδου P_{in} και την ισχύ εξόδου P_{out} , με $P_{in}(W) = P_{th} = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H$ και $P_{out}(W) = T \cdot \omega = T \cdot 2 \cdot \pi \cdot n$, όπου ω είναι η γωνιακή ταχύτητα και T (N.m) η αναπτυσσόμενη στον άξονα περιστροφής ροπή. Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζονται τα πρώτα πειραματικά αποτελέσματα της θεωρητικής ισχύος P_{th} , της ταχύτητας περιστροφής n (rev/s) του κοχλία και της ασκούμενης ροπής T (N.m) στον άξονά του, σε συνάρτηση της παροχής Q (l/s) (Stergiopoulou et al., 2012).



Σχήμα 6. Μετρήσεις ισχύος, ταχύτητας περιστροφής και ροπής σε συνάρτηση της παροχής

Χαρακτηριστικές όψεις της πειραματικής λειτουργίας του πρώτου και του δεύτερου πειραματικού προτύπου κοχλιωτού υδροστροβίλου, ο οποίος φέρει και σφόνδυλο αδράνειας καθώς και σύστημα πολλαπλασιασμού στροφών, εντός του μεγάλου ανοικτού υδραυλικού καναλιού S3/TILTING FLUME της Armfield, παρουσιάζονται στις φωτογραφίες του επομένου σχήματος.



Σχήμα 7. Όψεις της λειτουργίας πειραματικών κοχλιωτών προσομοιωτών στο κανάλι S3/TILTING FLUME της Armfield

5. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΤΕΣ ΚΑΙ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΙ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΙ

Η διαπίστωση ότι οι κοχλιωτοί υδροστροβίλοι μπορούν κάλλιστα να αποτελέσουν την μοναδική δυνατότητα παραγωγικής ανάκτησης του υδροδυναμικού θέσεων πολύ χαμηλού φορτίου αλλά και να ανταγωνιστούν οικονομοτεχνικά με πολύ ικανοποιητικό τρόπο άλλους συμβατικούς σε θέσεις κάπως μεγαλύτερου χαμηλού ύψους, οδήγησε στην αξιοποίηση των πρώτων πειραματικών αποτελεσμάτων της συμπεριφοράς των πρώτων εργαστηριακών κοχλιωτών υδροστροβιλικών προσομοιωτών και στην υλοποίηση σειράς μελετητικών προσεγγίσεων «εν δυνάμει» πραγματικών μικρών υδροηλεκτρικών έργων με κοχλιωτούς υδροστροβίλους, ακολουθώντας την θεωρία της υδραυλικής ομοιότητας. Με βάση τα πρώτα πειραματικά αποτελέσματα από τα χρησιμοποιηθέντα σωληνοειδή πειραματικά πρότυπα κοχλιωτών υδροστροβίλων και την θεωρία ομοιότητας μπορούν να προκύψουν αρκετά ικανοποιητικές εκτιμήσεις σχετικά με τις υδροδυναμικές επιδόσεις των «εν δυνάμει» πραγματικών σωληνοειδών κοχλιωτών μικροϋδροηλεκτρικών σταθμών. Για μια ενδεικτική θέση χαμηλού ύψους $H = 1,0 \text{ m}$, με αξιοποιήσιμη παροχή $Q = 1,2 \text{ m}^3/\text{s}$, από ένα μικρό υδροηλεκτρικό έργο με σωληνοειδή κοχλιωτό υδροστρόβιλο διαμέτρου $d = 1,6 \text{ m}$, μήκους $L = 3,1 \text{ m}$, ο οποίος θα μπορούσε να είναι «όμοιος με τους χρησιμοποιηθέντες πειραματικούς προσομοιωτές», η προκύπτουσα ισχύς, με βάση τους νόμους ομοιότητας $Q_1/Q_2 = (N_1 D_1^3)/(N_2 D_2^3)$, $P_1/P_2 = (N_1^3 D_1^5)/(N_2^3 D_2^5)$ και την γενικευμένη σχέση του Moody $(1 - \eta_1) / (1 - \eta_2) = (D_2/D_1)^{0.25} (H_2/H_1)^{0.1}$, θεωρώντας ότι αυτοί μπορεί να εφαρμόζονται μεταξύ όμοιων υδροστροβίλων, με γνωστά τα λειτουργικά χαρακτηριστικά τους και υποθέτοντας ότι αυτά αντιστοιχούν στους δικούς μας γεωμετρικά όμοιων προσομοιωτών είναι $P = 8 \text{ KW}$. Η θεωρία ομοιότητας μπορεί να υιοθετηθεί για την εκτίμηση των επιδόσεων των αρχιμήδειων εγκαταστάσεων ανεξάρτητα εάν οι κοχλιωτοί υδροστρόβιλοι πραγματικών μικρών υδροηλεκτρικών έργων βρίσκονται εντός σωληνοειδών προσαγωγών (σχήμα 8).



Σχήμα 8. Σωληνοειδείς εφαρμογές κοχλιωτών υδροστροβίλων

Για το παράδειγμα μιας θέσης με χαμηλό φορτίο $H = 3,0 \text{ m}$, με αξιοποιήσιμη παροχή $Q = 4 \text{ m}^3/\text{s}$, η προκύπτουσα εγκατεστημένη ισχύς της κοχλιωτής υδροστροβιλικής μονάδας θα είναι $P = 85 \text{ KW}$. Σύμφωνα με τις μέχρι τώρα υπολογιστικές εκτιμήσεις οι χαμηλού φορτίου κοχλιωτοί υδροστρόβιλοι μπορούν να τοποθετηθούν τόσο σε σειρά όσο και παράλληλα καλύπτοντας σύνθετες απαιτήσεις θέσεων με φορτίο 1 έως 10m και παροχές από 0.1 έως $50 \text{ m}^3/\text{s}$. Οι εκτιμήσεις για μια πραγματική ενδεικτική περίπτωση με διαθέσιμο φορτίο 10m και παροχή 2680 l/sec , μια διβάθμια «εν σειρά» κοχλιωτού υδροστροβίλου μικροϋδροηλεκτρική διάταξη θα μπορούσαν να δώσουν μια εγκατεστημένη ισχύ 180 KW . Με την ίδια λογική της «ομοιότητας» ένα κοχλιωτού υδροστροβίλου μικρό υδροηλεκτρικό έργο,

εγκατεστημένης ισχύος περίπου 70 KW θα μπορούσε να παράγει ετησίως περίπου 260.000 KWh.

6. ΑΝΑΖΗΤΩΝΤΑΣ ΤΑ ΠΡΩΤΑ ΑΡΧΙΜΗΔΕΙΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι μέχρι τώρα εργαστηριακές μετρήσεις και υπολογισμοί, στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος ΑΡΧΙΜΗΔΗΣ ΙΙΙ, σχετικά με την προκαταρκτική διερεύνηση της υδροδυναμικής συμπεριφοράς καινοτόμων πειραματικών προσομοιωτών κοχλιωτών δρομέων υδροστροβλικής λειτουργίας, με κεκλιμένο άξονα, τείνουν να καταδείξουν ότι, οι κοχλιωτοί υδροστρόβιλοι μπορούν να αποτελέσουν την τεχνολογική βάση για την υλοποίηση πολυάριθμων φιλοπεριβαλλοντικών μικρών υδροηλεκτρικών έργων, σε μια πλειάδα θέσεων μικρών υδατοπτώσεων στα περισσότερα υδατικά διαμερίσματα της χώρας, που έχει ένα πολύ σημαντικό αναξιοποίητο υδροδυναμικό 30 TWh (Stergiopoulou et al., 2012). Η όλη ερευνητική προσπάθεια είναι σε εξέλιξη και συνεχίζεται, στα πλαίσια του προγράμματος ΑΡΧΙΜΗΔΗΣ ΙΙΙ, τόσο προς την κατεύθυνση της εμβάθυνσης στην περαιτέρω διερεύνηση της υδροδυναμικής συμπεριφοράς καινοτόμων κοχλιωτών υδροστροβίλων κεκλιμένου άξονα, όσο και προς την κατεύθυνση των καινοτόμων κοχλιωτών υδροστροβίλων οριζοντίου άξονα, σε συνθήκες μηδενικού φορτίου, με στόχο την ανάκτηση του δυναμικού της κινητικής ενέργειας αφενός των ποταμών και των ανοικτών αγωγών και αφετέρου των ιδιαιζόντων θαλασσίων και παλιρροιακών ρευμάτων του «παραδόξου» της Κεφαλληνίας» και των στενών του Ευρίπου. Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζονται δύο ενδεικτικές σχηματικές απεικονίσεις των προτεινόμενων, και υπό μελέτη, καινοτόμων επιπλευσών κοχλιωτών διατάξεων, μηδενικού φορτίου, για την ανάκτηση της κινητικής ενέργειας ενός φυσικού και ενός τεχνητού υδατορρέυματος.



Σχήμα 9. Επιπλεύουσες κοχλιωτές διατάξεις ανάκτησης της κινητικής ενέργειας φυσικού ή τεχνητού υδατορρέυματος

Θεωρείται άξιον μνείας το γεγονός ότι, τέτοιου είδους οριζόντιες καινοτομικές κοχλιωτές υδροστροβλικές διατάξεις προτείνονται διεθνώς για πρώτη φορά στο παρόν άρθρο. Δεδομένου ότι κάτι αντίστοιχο δεν υπάρχει μέχρι τώρα στην διεθνή υδρο-ενεργειακή ακαδημαϊκή και κατασκευαστική δραστηριότητα και βιβλιογραφία, η παρούσα απλή αναφορά στους Αρχιμήδειους κοχλιωτούς υδροτροχούς μηδενικού φορτίου αποτελεί μόνο ένα απλό πρώτο βήμα, σε μια σύνθετη «εν εξελίξει» ερευνητική προσπάθεια, που συμπεριλαμβάνει και την διεξοδική προσέγγιση των ιδιαιζόντων φαινομένων θαλάσσιας υδραυλικής, τόσο του «παραδόξου» της Κεφαλληνίας όσο και της παλίρροιας του Ευρίπου. Στο σχήμα που ακολουθεί παρατίθενται αναπαραστάσεις

των υπό μελέτη προτεινόμενων, μεμονωμένων αλλά και επάλληλων Αρχιμήδειων καινοτόμων κοχλιωτών υδροτροχών, τόσο για την ανάκτηση της κινητικής ενέργειας του «θαλασσίου ποταμού» που διασχίζει εγκάρσια την Κεφαλληνία, όσο και του παλιρροιακού ρεύματος των στενών του Ευρίπου (Stergiopoulou et al., 2010, 2011, 2012).



Σχήμα 10. Προτάσεις για κοχλιωτές διατάξεις ανάκτησης της κινητικής ενέργειας στην Κεφαλληνία και στον Εύριπο.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Εκφράζονται ευχαριστίες προς το Υπουργείο Παιδείας Δια Βίου Μάθησης και Θρησκευμάτων για τη στήριξη του εγκεκριμένου, στα πλαίσια του Προγράμματος ΑΡΧΙΜΗΔΗΣ III, ερευνητικού έργου με θεματικό αντικείμενο, «Rebirth of Archimedes: Contribution to the study of hydraulic mechanics and hydrodynamic behaviour of Archimedean cochlear waterwheels, for recovering the hydraulic potential of natural and technical watercourses, of maritime and tidal currents», μέρος του οποίου αποτελεί η παρούσα εργασία. Η εργασία αυτή αποτελεί ταυτοχρόνως και επί μέρους τμήμα υπό εκπόνηση Διδακτορικής Διατριβής στο Ε.Μ.Π. της πρώτης εκ των δυο συγγραφέων του παρόντος άρθρου υπό την επιστημονική καθοδήγηση της δεύτερης συγγραφέως.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- E.S.H.A.-European Small Hydropower Association, 1998. *A Layman's Guidebook on How to Develop a Small Hydro Site*.
- Rorres, C., 2000. The Turn of the Screw: Optimal Design of an Archimedes Screw, *Journal of Hydraulic Engineering*.
- Stergiopoulou, A. and Stergiopoulos, V., 2009. *From the old Archimedean Screw Pumps to the new Archimedean Screw Turbines for Hydropower Production in Greece*, Proceedings of the 2nd International Conference on Environmental Management, Engineering, Planning & Economics (CEMEPE 2009), Mykonos.
- Stergiopoulou, A., Stergiopoulos, V. and Kalkani, E., 2010. *A brief Archimedean history: from ancient spiral screws to modern Archimedean hydropower energy tools*, Proceedings of the eRA-5 International Conference, Athens.
- Stergiopoulou, A. and Stergiopoulos, V., 2010. *The paradox of coastal cross flow in Cephalonia island*, Proceedings of the 6th International Symposium on Environmental Hydraulics, Athens.

- Stergiopoulou, A., Stergiopoulos, V. and Kalkani, E., 2011. *Back to the Future: Rediscovering the Archimedean Screws as Modern Turbines for Harnessing Greek Small Hydropower Potential*, Proceedings of the “Third International Conference on Environmental Management, Engineering, Planning and Economics (CEMEPE 2011) & SECOTOX Conference”, Skiathos.
- Stergiopoulou, A. and Stergiopoulos, V., 2012. *Quo Vadis Archimedean Turbines Nowadays in Greece, in the Era of Transition?*, Journal of Environmental Science and Engineering, (accepted for publication).

**ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΠΟΙΟΤΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΟΥ
ΑΡΔΕΥΤΙΚΟΥ ΝΕΡΟΥ ΤΗΣ ΔΗΜΟΤΙΚΗΣ ΕΝΟΤΗΤΑΣ
ΑΜΒΡΑΚΙΚΟΥ ΤΟΥ ΔΗΜΟΥ ΑΡΤΑΙΩΝ
Μ. Θεοχάρης¹, Χ. Μυριούνης¹, Α. Σιάνου¹**

¹Τμήμα Φυτικής Παραγωγής, ΤΕΙ Ηπείρου, 47100, Άρτα
theoxar@teiep.gr, cmyriounis@teemail.gr, natasa_sianou@yahoo.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία αναλύονται τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των νερών των αρδευτικών γεωτρήσεων της περιοχής της Δημοτικής Ενότητας Αμβρακικού του Δήμου Άρταίων. Οι δειγματοληψίες πραγματοποιήθηκαν σε μηνιαία βάση κατά την περίοδο από τον Ιούνιο έως τον Οκτώβριο του 2009 από 52 επιλεγμένες γεωτρήσεις της περιοχής και τα δείγματα μεταφέρθηκαν στο εργαστήριο εδαφολογίας του ΤΕΙ Ηπείρου στην Άρτα. Στο εργαστήριο προσδιορίστηκαν, αναλύθηκαν και αξιολογήθηκαν οι συγκεντρώσεις των κύριων ιόντων καθώς επίσης και οι τιμές του pH και της ηλεκτρικής αγωγιμότητάς (E.C.). Με τη χρήση των υδροχημικών λόγων $[(Ca^{+2}+Mg^{+2})/(K^{+}+Na^{+})]$ και (Mg^{+2}/Ca^{+2}) αναλύθηκαν οι συνθήκες που διαμορφώνουν τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του αρδευτικού νερού. Από την ποιοτική ταξινόμηση με τη μέθοδο των Η.Π.Α. και με τη μέθοδο Wilcox προκύπτει ότι τα νερά των γεωτρήσεων είναι γενικώς καλής ποιότητας για την άρδευση των καλλιεργειών της περιοχής. Τέλος, από τα χημικά χαρακτηριστικά των νερών έγινε πρόβλεψη του κινδύνου έμφραξης των σταλακτήρων και διαπιστώθηκε ότι τα νερά είναι ακατάλληλα για εγκατάσταση συστημάτων άρδευσης με σταγόνες.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Άρδευση, ποιότητα νερού, υδροχημικοί δείκτες, ταξινόμηση αρδευτικού νερού.

**QUALITATIVE CLASSIFICATION OF THE DRILLING WELL
WATER IN THE AREA OF THE AMVRAKIKOS MUNICIPALITY
UNITY IN THE REGION OF ARTA GREECE
M. Theocharis¹, Ch. Myriounis¹, A. Sianou¹**

¹Department of Crop Production, Technological Institute of Epirus, 47100 Arta
theoxar@teiep.gr, cmyriounis@teemail.gr, natasa_sianou@yahoo.gr

ABSTRACT

In this paper, the quality characteristics of the irrigation drilling well water in the area of the Amvrakikos municipality unity in the region of Arta are examined. Each month during the period from June to October 2009 water samples from a number of 52 specialised drilling wells were taken and analysed in the Soil Laboratory of Department of Crop Production of TEI of Epirus. In the Laboratory the major ions, the pH, the electric conductivity E.C. and the temperature of irrigation water were calculated. Using the hydrochemical ratios $[(Ca^{+2}+Mg^{+2})/(K^{+}+Na^{+})]$ and (Mg^{+2}/Ca^{+2}) the conditions from which the irrigation water quality is depended were investigated. From the above analysis and according to the U.S.A. as well as the Wilcox methods, the irrigation water is classified of a high quality. Finally it was concluded that irrigation groundwater of study area is not suitable in drip irrigation.

KEY WORDS: Irrigation, water quality, hydrochemical ratios, classification of irrigation water.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μεγάλη αύξηση των αρδευομένων εκτάσεων ασκεί ισχυρότατη πίεση στους διαθέσιμους υπόγειους υδατικούς πόρους επειδή όλο και συχνότερα οι άνθρωποι καταφεύγουν στην απώληση νερού από τα υπόγεια αποθέματα με ρυθμούς εντονότερους από αυτούς της επαναπλήρωσης.

Είναι γνωστό ότι σε περιοχές όπου υπάρχει έντονη εκμετάλλευση των υπόγειων υδάτινων πόρων μπορούν να δημιουργηθούν φαινόμενα ποσοτικής και ποιοτικής υποβάθμισης αυτών (Γκέκας κ.α, 2000, Καραγιαννίδης κ.α., 2002).

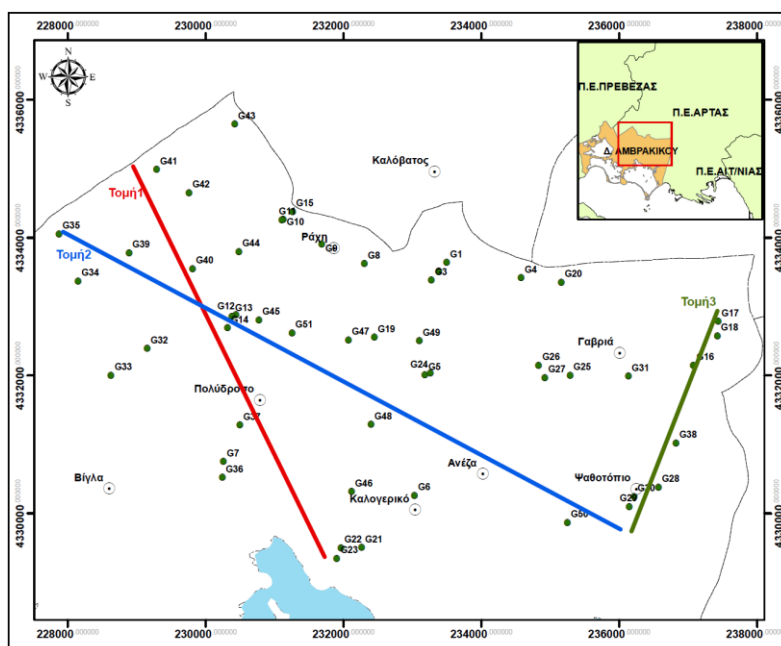
Αποτελέσματα της ποιοτικής υποβάθμισης των νερών είναι ο εμπλουτισμός αυτών και των εδαφών με άλατα, η διήθηση του νερού στο έδαφος λόγω υψηλής περιεκτικότητας νατρίου ή χαμηλής περιεκτικότητας ασβεστίου σε αυτό, καθώς επίσης και η πιθανή πρόκληση προβλημάτων τοξικών ιόντων (χλωριούχων και βορικών), αλλά και διαφόρων άλλων στοιχείων, όπως νιτρικών, σιδήρου, οργανικών και ανόργανων υπολειμμάτων από χρήση φυτοφαρμάκων, όπως επίσης και από πολύ υψηλό ή πολύ χαμηλό pH (Ayers and Westcot, 1985).

Επίσης ο υποβιβασμός της στάθμης των υπόγειων υδροφορέων οδηγεί στην αύξηση του κόστους του νερού αφού η άντλησή του γίνεται από όλο και μεγαλύτερο βάθος (Θεοχάρης, 2007).

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η εξέταση της χημικής σύστασης των υπόγειων νερών της περιοχής της Δημοτικής Ενότητας Αμβρακικού του Δήμου Αρταίων του Νομού Άρτας, επειδή λόγω της έντονης γεωργικής εκμετάλλευσης και της αυξημένης χρήσης λιπασμάτων και φυτοπροστατευτικών ουσιών υπάρχει κίνδυνος η ποιότητα του νερού των γεωτρήσεων αυτών να έχει υποβαθμισθεί. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων γνωστοποιήθηκαν στους ενδιαφερόμενους παραγωγούς.

2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η Δ.Ε. Αμβρακικού (Σχήμα 1) καταλαμβάνει το νότιο και δυτικό τμήμα του νομού Άρτας και περιλαμβάνει τα δημοτικά διαμερίσματα της Ανέζας, της Βίγλας, της Γαβριάς, του Καλογερικού, της Κορωνησίας, του Πολύδροσου, της Ράχης, της Στρογγυλής και το Ψαθοτόπι. Η έδρα του Δήμου απέχει από την πόλη της Άρτας 13km.



Σχήμα 1. Η περιοχή έρευνας με τις θέσεις των υδροσημείων δειγματοληψίας

Οι κύριοι άξονες απασχόλησης στον πρωτογενή τομέα, στην περιοχή μελέτης, είναι κατά κύριο λόγο η γεωργία, η κτηνοτροφία και στις παράκτιες περιοχές η αλιεία. Στη γεωργία οι κύριες καλλιέργειες είναι τα εσπεριδοειδή (κοινό πορτοκάλι και Merlin) και καλλιέργεια μηδικής. Η κτηνοτροφία ασκείται με βόσκηση κυρίως προβάτων, βοοειδών, χοίρων και πουλερικών. Η αλιευτική δραστηριότητα είναι οργανωμένη σε συνεταιρισμούς κυρίως στην περιοχή της Κορωνησίας.

3. ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕΡΩΝ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

Η περιοχή της δημοτικής ενότητας Αμβρακικού εντάσσεται γεωτεκτονικά στην Ιόνιο ζώνη στην οποία άλλωστε ανήκει και το μεγαλύτερο τμήμα της Ηπείρου. Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που συμμετέχουν στην περιοχή έρευνας είναι κυρίως τα τεταρτογενή ιζήματα (προσχώσεις και ελώδεις αποθέσεις, πλευρικά κορήματα, κώνοι κορημάτων, παλαιές χειμαρρώδεις αποθέσεις, κώνοι κορημάτων) τα οποία παρουσιάζουν αρκετό πάχος, καθώς επίσης και τα ασβεστολιθικά πετρώματα (ασβεστόλιθοι μικρολατυποπαγείς, ασβεστόλιθοι μικροκρυσταλλικοί στιφροί, ασβεστόλιθοι μικρολατυποπαγείς έως λατυποπαγείς με θραύσματα ρουδιαστών και παρεμβολές υπολιθογραφικών ασβεστολίθων, ασβεστόλιθοι Βίγλας) στο δυτικό τμήμα της περιοχής έρευνας (Πολύδροσο, Βίγλα) (Latreille, and Savoyat, 1963, Κοντολεμάκη, 2010). Η συνολική έκταση του δήμου Αμβρακικού είναι 159.000 στρέμματα από τα οποία η καλλιεργούμενη έκταση είναι 48.500 στρέμματα. Οι καλλιέργειες που υπάρχουν στην περιοχή είναι, εσπεριδοειδή, μηδική, ακτινίδια και βαμβάκι.

Στην περιοχή λειτουργεί από το 1950 αρδευτικό δίκτυο ανοικτών αγωγών τροφοδοτούμενο από το Λούρο ποταμό. Το δίκτυο αυτό είναι ημιτελές και εξ ολοκλήρου χωμάτινο. Για το λόγο αυτό οι καλλιεργητές καταφεύγουν στη χρήση νερού αρδευτικών γεωτρήσεων. Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται η κατανομή των αρδευτικών γεωτρήσεων ο εμπλουτισμός των οποίων πραγματοποιείται τόσο από τους παρακείμενους ανθρακικούς σχηματισμούς, όσο και από το Λούρο ποταμό.

4. ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΥΠΑΙΘΡΟΥ - ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΕΣ

Για τον προσδιορισμό των ποιοτικών χαρακτηριστικών των νερών των αρδευτικών γεωτρήσεων της Δ.Ε. Αμβρακικού του Δήμου Αρταίων του Νομού Άρτας, έγινε καταγραφή των γεωτρήσεων και επιλέχθηκαν 52 αντιπροσωπευτικές για περαιτέρω ανάλυση. Το βάθος των γεωτρήσεων αυτών κυμαίνεται από 40,00 m έως 50,00 m. Πραγματοποιήθηκαν μηνιαίες δειγματοληψίες κατά την περίοδο από τον Ιούνιο έως τον Οκτώβριο του έτους 2009. Προσδιορίστηκαν επιτόπου η Ε.Σ. με φορητό αγωγιμόμετρο της εταιρίας JENWAY, το pH με συσκευή της εταιρίας HANNA Instruments, και η θερμοκρασία. Κατόπιν στο εργαστήριο εδαφολογίας του Τμήματος Φυτικής Παραγωγής του ΤΕΙ Ηπείρου προσδιορίστηκαν οι συγκεντρώσεις των ιόντων Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^+ , Na^+ , Cl^- , NO_3^- , HCO_3^- . Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται τα στατιστικά χαρακτηριστικά των ποιοτικών χαρακτηριστικών των υπόγειων νερών της Δημοτικής Ενότητας Αμβρακικού.

5. ΠΟΙΟΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΝΕΡΩΝ ΤΗΣ Δ. Ε. ΑΜΒΡΑΚΙΚΟΥ

Στην παρούσα εργασία αξιολογήθηκαν οι τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, του pH, των συγκεντρώσεων των ιόντων Ca^{+2} , Mg^{+2} , HCO_3^- , των δεικτών S.A.R και E.S.P και των διαγραμμάτων S.A.R και Wilcox.

Πίνακας 1. Στατιστικά χαρακτηριστικά των ποιοτικών χαρακτηριστικών των νερών της Δημοτικής Ενότητας Αμβρακικού (περίοδος Ιούνιος – Οκτώβριος του έτους 2009)

Παράμετρος	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή
EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	489	1200
pH	7,65	8,05
T ($^{\circ}\text{C}$)	16,00	22,00
Ca^{+2} (mg/l)	48,30	114,40
Mg^{+2} (mg/l)	17,40	41,70
Na^{+} (mg/l)	8,60	89,90
K^{+} (mg/l)	0,50	2,10
HCO_3^{-} (mg/l)	176,90	366,70
NO_3^{-} (mg/l)	0,00	0,00
NH_4^{+} (mg/l)	0,00	0,00
Cl^{-} (mg/l)	26,60	308,40
S.A.R.	0,33	2,94
E.S.P.	7,14	33,62
$\text{Mg}^{+2}/\text{Ca}^{+2}$	0,30	0,77
$(\text{Ca}^{+2}+\text{Mg}^{+2})/(\text{Na}^{+}+\text{K}^{+})$	1,71	16,25
$\text{Na}^{+}/\text{K}^{+}$	12,27	73,10

Παράλληλα κατασκευάσθηκαν τρεις υδροχημικές τομές κατά μήκος, στο δυτικό τμήμα της περιοχής έρευνας με διεύθυνση Β-Ν (τομή 1) στο κεντρικό τμήμα της περιοχής με διεύθυνση Δ-Α (τομή 2) και στο ανατολικό τμήμα με διεύθυνση Β-Ν (τομή 3), καθώς και υδροχημικοί χάρτες με τη χρήση γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών και εφαρμογή της μεθόδου Kriging.

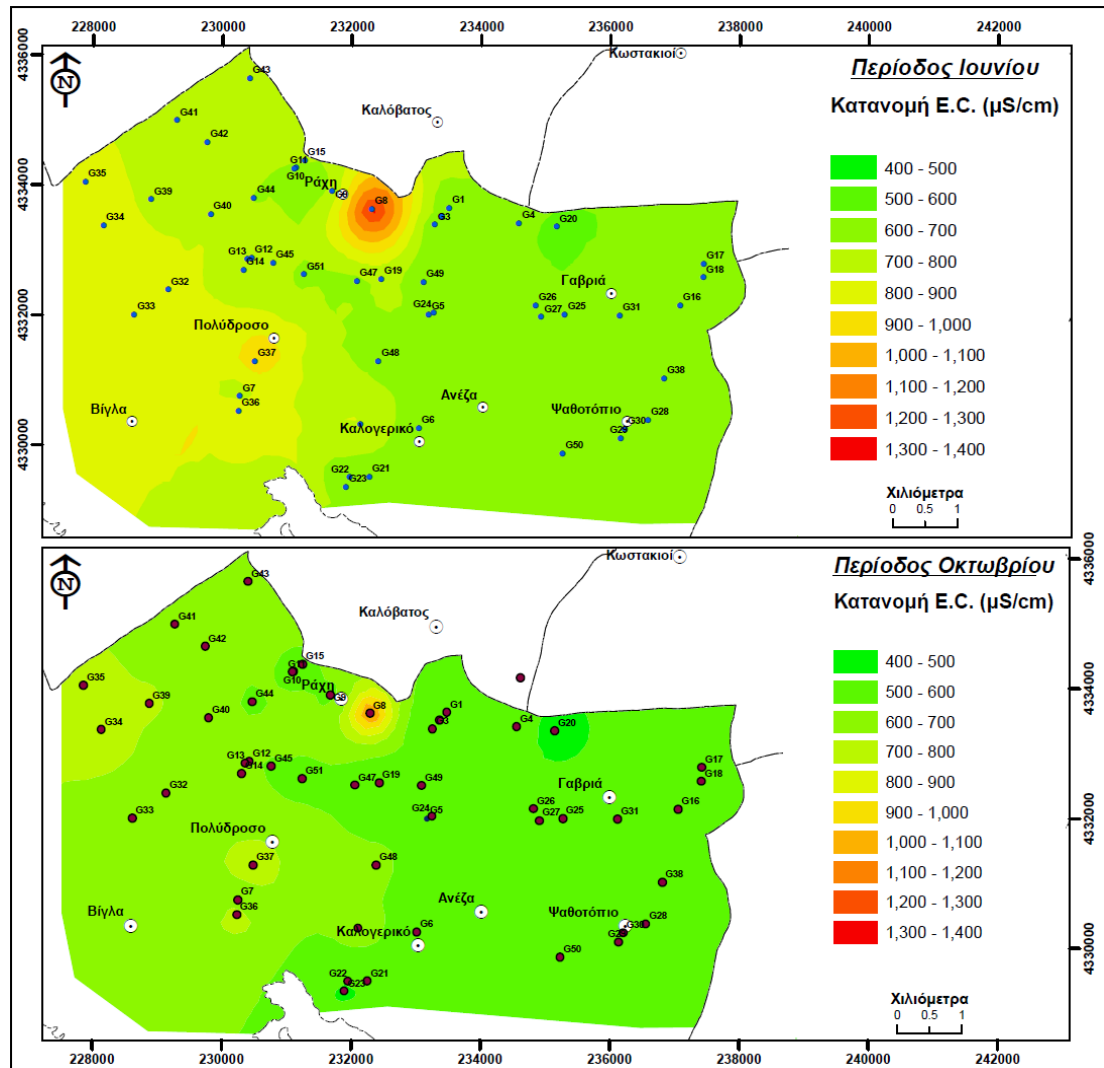
5.1 Η ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ - pH

Από τις τιμές του Πίνακα 1, διαπιστώνεται ότι οι τιμές της E.C. κυμαίνονται από 460 $\mu\text{S}/\text{cm}$ έως 760 $\mu\text{S}/\text{cm}$, με τις μεγαλύτερες τιμές να παρουσιάζονται στο κεντρικό (γεώτρηση G8) και το δυτικό τμήμα της περιοχής (Σχήμα 2) στους οικισμούς Πολύδροσο και Βίγλα. Επίσης τόσο από το Σχήμα 2 όσο και από το Διάγραμμα 1 διαπιστώνεται ότι η E.C. έχει αυξημένες τιμές στο δυτικό τμήμα της περιοχής σε σχέση με το ανατολικό, για όλες τις περιόδους μελέτης, όπως διαπιστώνεται από την υδροχημική τομή με διεύθυνση Δ-Α (τομή 2).

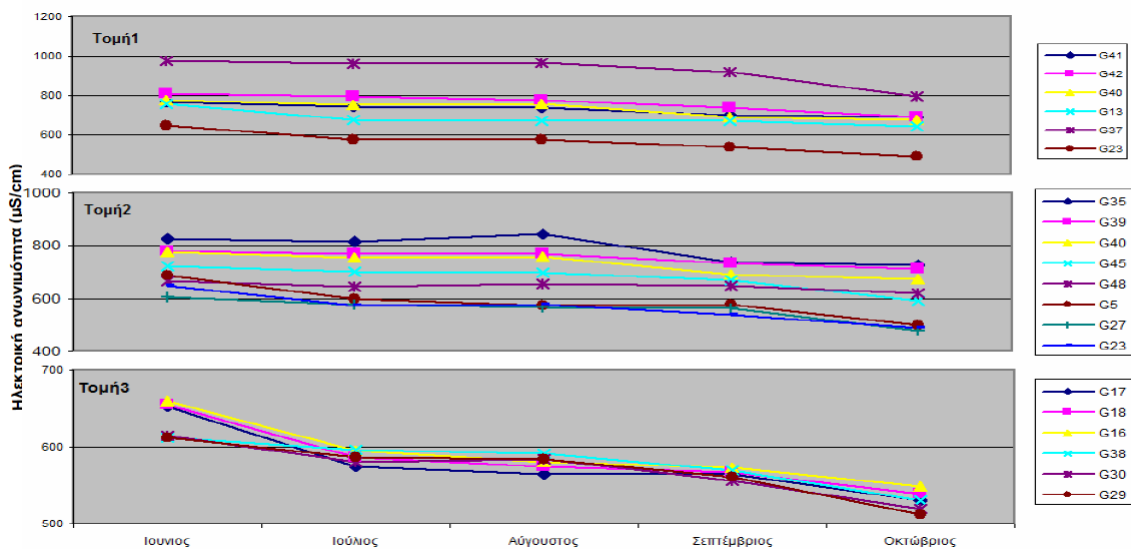
Στο δυτικό τμήμα οι τιμές της E.C. παρουσιάζουν ομαλή κατανομή, με ένα ύψωμα στην περιοχή του οικισμού Πολύδροσου. Το ύψωμα αυτό ενδεχομένως να οφείλεται στο σχετικά αυξημένο βάθος των συγκεκριμένων αρδευτικών γεωτρήσεων, με αποτέλεσμα τα υπόγεια νερά να επηρεάζονται από τους γύψους οι οποίοι αποτελούν και το υπόβαθρο της περιοχής μελέτης. Επίσης στο δυτικό τμήμα παρατηρείται μείωση των τιμών της E.C. κατά τη μετάβαση από τον Ιούνιο στον Οκτώβριο.

Παρόμοια κατανομή της E.C. παρουσιάζεται και για το ανατολικό τμήμα της περιοχής, χωρίς ωστόσο την ύπαρξη υψώματος.

Στο νοτιοανατολικό τμήμα της περιοχής οι τιμές της E.C. είναι μειωμένες γεγονός το οποίο αποδίδεται αφενός στις μειωμένες αντλήσεις των υπόγειων υδάτων της περιοχής, αφετέρου στη χρήση για άρδευση των υδάτων του ποταμού Λούρου. Και εδώ παρατηρείται μείωση των τιμών της E.C. από τον Ιούνιο στον Οκτώβριο.



Σχήμα 2. Κατανομή της Ε.Σ. των υπογείων νερών της Δ. Ε. Αμβρακικού Άρτας για την περίοδο του Ιουνίου και του Οκτωβρίου 2009.

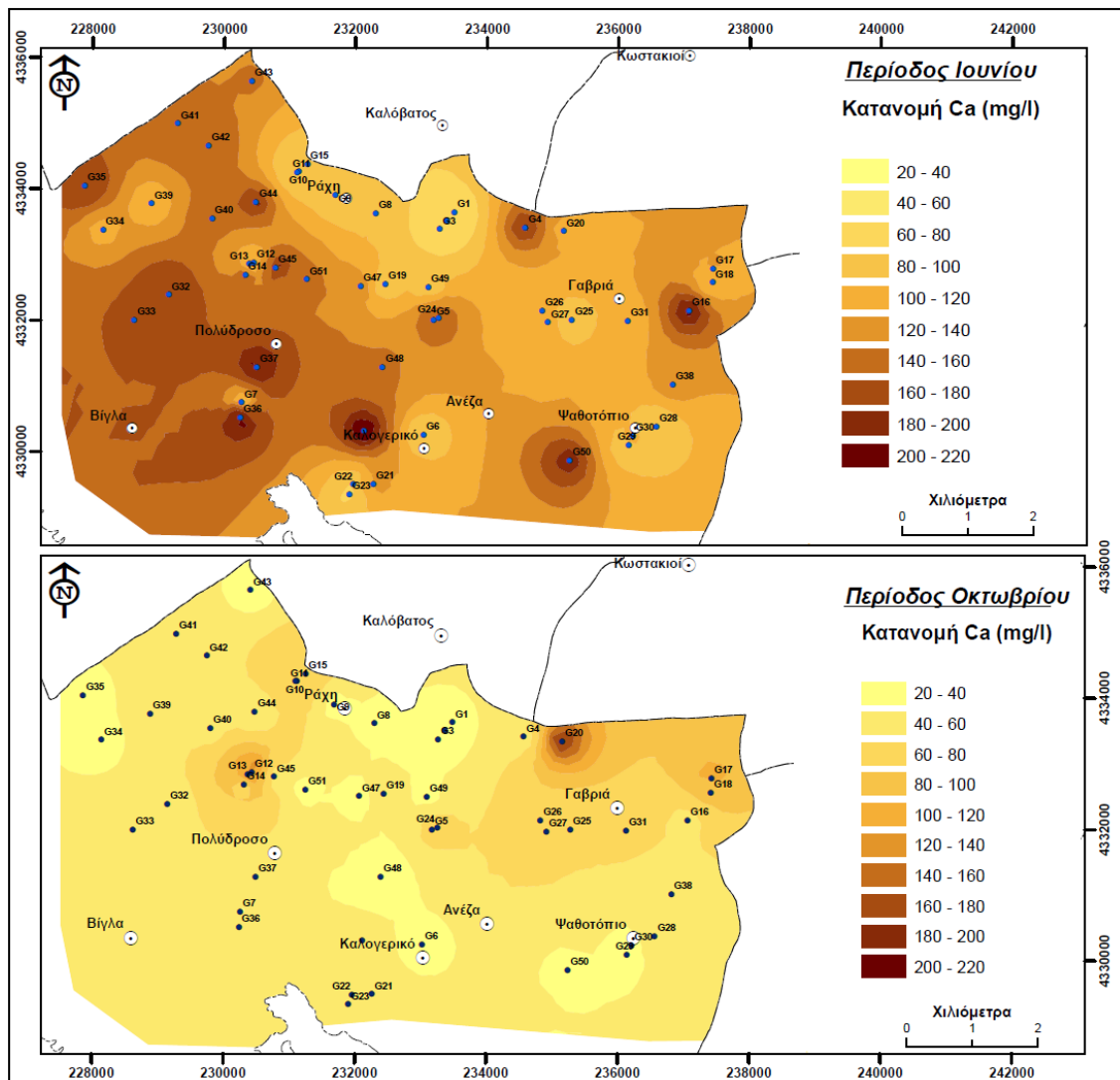


Διάγραμμα 1. Υδροχημικές κατά μήκος τομές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας για την περιοχή έρευνας

Οι μειωμένες τιμές της Ε.Σ. τον Οκτώβριο σε σχέση με τον Ιούνιο μπορούν να αποδοθούν στις ευνοϊκές συνθήκες τροφοδοσίας που παρουσιάζονται στην ευρύτερη περιοχή μελέτης, καθώς επίσης, στη χρήση επιφανειακού νερού (αρδευτικό δίκτυο Λούρου) για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών, κατά την περίοδο του θέρους. Γεγονός είναι ότι στο νοτιοανατολικό τμήμα η χρήση του νερού των γεωτρήσεων είναι μικρότερη από ό,τι στο υπόλοιπο τμήμα της περιοχής έρευνας.

5.2 Η ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΑΣΒΕΣΤΙΟΥ, ΜΑΓΝΗΣΙΟΥ ΚΑΙ ΑΝΘΡΑΚΙΚΩΝ

Οι τιμές των ιόντων Ca^{+2} και Mg^{+2} κυμαίνονται μεταξύ 48,26 mg/l και 114,43 mg/l και 17,42 mg/l και 41,74 mg/l αντίστοιχα. Στα Σχήματα 3 και 4 παρουσιάζεται η κατανομή των ιόντων Ca^{+2} και Mg^{+2} για τον Ιούνιο και τον Οκτώβριο του έτους 2009.



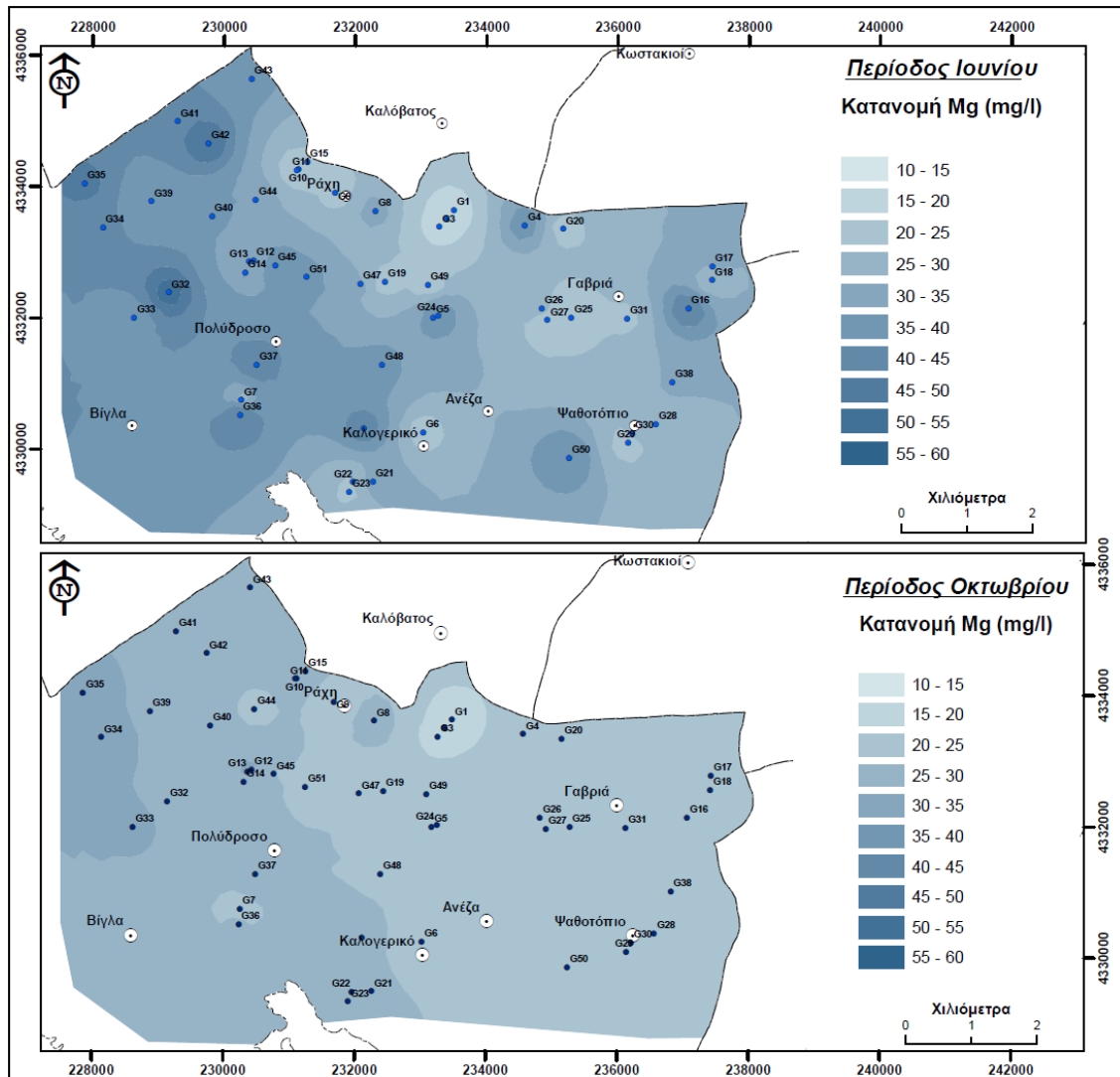
Σχήμα 3. Κατανομή των ιόντων Ca^{+2} των υπογείων νερών της δημοτικής ενότητας Αμβρακικού για την περίοδο του Ιουνίου και του Οκτωβρίου του έτους 2009

Οι τιμές των ιόντων Ca^{+2} είναι μεγαλύτερες στο δυτικό τμήμα της περιοχής, κυρίως λόγω της γειννίας και τροφοδοσίας της περιοχής από τους ανθρακικούς όγκους δυτικά του οικισμού Βίγλας. Επίσης οι τιμές των ιόντων Ca^{+2} είναι χαμηλότερες την περίοδο του Οκτωβρίου. Το γεγονός αυτό μπορεί να αποδοθεί στον εμπλουτισμό των υπόγειων υδροφόρων στρωμάτων, από τα υπερκείμενα ασβεστολιθικά πετρώματα

της περιοχής έρευνας, και στη μεταβολή των ποιοτικών χαρακτηριστικών τους κατά το τέλος του θέρους.

Οι τιμές των ιόντων Mg^{+2} , όπως προκύπτει από το Σχήμα 4 όπου παρουσιάζεται η κατανομή τους, είναι και αυτές μεγαλύτερες στο δυτικό τμήμα της περιοχής έρευνας, και σχετικά σταθερές στο χρόνο.

Οι τιμές των HCO_3^- ιόντων κυμαίνονται μεταξύ 176 mg/l και 366 mg/l με τις μεγαλύτερες τιμές να εμφανίζονται στα δυτικά τμήματα της περιοχής μελέτης, στην περιοχή των οικισμών Βίγλα και Πολύδροσο, όπου κυριαρχούν τα ασβεστολιθικά πετρώματα της περιοχής.



Σχήμα 4. Κατανομή των ιόντων Mg^{+2} των υπογείων νερών της Δ. Ε. Αμβρακικού Άρτας για την περίοδο του Ιουνίου και του Οκτωβρίου 2009.

Σημαντική παράμετρος η οποία θα πρέπει να αξιολογηθεί, είναι ο κίνδυνος έμφραξης των σταλακτήρων όταν εφαρμόζεται το σύστημα άρδευσης με σταγόνες. Ο κίνδυνος αυτός εξαρτάται από τις τιμές των Ca^{+2} , Mg^{+2} , CO_3^{+2} , HCO_3^- , του pH και της θερμοκρασίας (Θεοχάρης κ. ά., 1996). Ο κίνδυνος αυτός εκτιμάται με τον υπολογισμό της κρίσιμης θερμοκρασίας, T_{cr} , του νερού από τη σχέση: (Θεοχάρης κ.α., 2006):

$$T_{cr} = -97,08738 \ln(0,38668pH + 0,169174 \ln(X\Psi) - 2,4379) \quad (5.1)$$

όπου $X = Ca^{+2} + Mg^{+2}$ και $\Psi = CO_3^{-2} + HCO_3^{-}$ σε meq/l.

Η σχέση (1) δίνει την κρίσιμη τιμή της θερμοκρασίας του αρδευτικού νερού πάνω από την οποία υπάρχει πρόβλημα έμφραξης των σταλακτήρων. Αν προκύψει η κρίσιμη θερμοκρασία να είναι μικρότερη από τη θερμοκρασία της πηγής υδροδότησης T_{in} , τότε είναι βεβαία η ταχύτερη έμφραξη των σταλακτήρων και για το λόγο αυτό πρέπει να αποφεύγεται η εγκατάσταση συστήματος άρδευσης με σταγόνες. Με βάση τις τιμές της θερμοκρασίας των νερών της περιοχής, καθώς και τις τιμές των συγκεντρώσεων των ιόντων Ca^{+2} , Mg^{+2} , HCO_3^{-} και CO_3^{-2} προκύπτει ότι υπάρχει σοβαρός κίνδυνος έμφραξης των σταλακτήρων, γεγονός το οποίο θα πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά τις καλλιεργητικές πρακτικές.

5.3 ΟΙ ΥΔΡΟΧΗΜΙΚΟΙ ΛΟΓΟΙ Mg^{+2}/Ca^{+2} ΚΑΙ $(Ca^{+2} + Mg^{+2})/(Na^{+} + K^{+})$

Ο λόγος Mg^{+2}/Ca^{+2} (meq/l) δίνει πληροφορίες για την προέλευση του νερού (Appelo and Postma, 2007, Μυριούνης και Θεοχάρης, 2010) (0,5 – 0,7 ασβεστολιθικοί υδροφόροι, 0,7 – 0,9 δολομιτικοί υδροφόροι, > 0,9 υδροφόροι πυριτικών πετρωμάτων, > 1 υδροφόροι σε μαγματικά ή μεταμορφωμένα πετρώματα). Ο λόγος αυτός στα δυτικά τμήματα της περιοχής έρευνας παρουσιάζει τιμές μικρότερες του 0,7 επειδή ο εμπλουτισμός των υπόγειων νερών πραγματοποιείται από τα ασβεστολιθικά πετρώματα αυτής.

Επίσης ο λόγος $(Ca^{+2} + Mg^{+2})/(Na^{+} + K^{+})$ δίνει πληροφορίες για τις περιοχές όπου γίνεται εμπλουτισμός των υπόγειων νερών (Καλλέργης, 2001, Μυριούνης, 2008). Ο λόγος $(Ca^{+2} + Mg^{+2})/(Na^{+} + K^{+})$ παρουσιάζει τιμές υψηλότερες της μονάδας στις περιοχές εμπλουτισμού των υδροφόρων, ενώ στις περιοχές χαμηλού εμπλουτισμού η σχέση αυτή λαμβάνει τιμή μικρότερη της μονάδας. Ο δείκτης παρουσιάζει τιμές μεγαλύτερες της μονάδας σε όλη την περιοχή έρευνας, με τις μεγαλύτερες τιμές να παρουσιάζονται στα δυτικά τμήματα της περιοχής.

5.4. ΠΟΙΟΤΙΚΗ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΑΡΔΕΥΤΙΚΩΝ ΝΕΡΩΝ

Η ποιοτική ταξινόμηση των αρδευτικών νερών έγινε με δύο μεθόδους: (α) με τη μέθοδο που χρησιμοποιείται στις Η.Π.Α. (U.S. Salinity Laboratory, 1954) η οποία βασίζεται στην E.C. και το δείκτη S.A.R. και (β) τη μέθοδο Wilcox η οποία βασίζεται στην E.C. και το ποσοστό νατρίου (Na %)

Ο δείκτης S.A.R αφορά το λόγο προσρόφησης νατρίου (Sodium Absorption Ratio) και υπολογίζεται από τη σχέση:

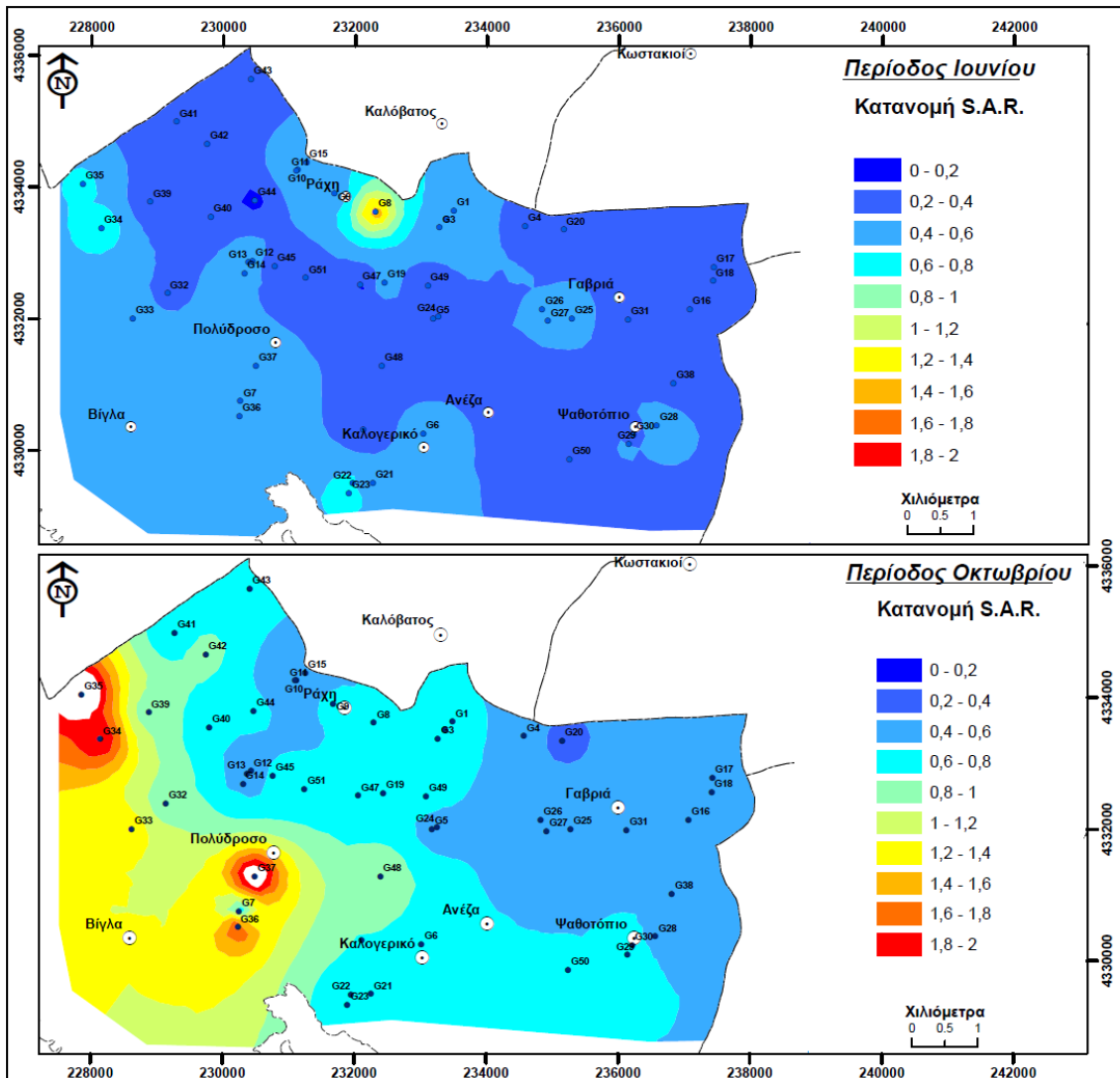
$$S.A.R. = \frac{Na^{+}}{\sqrt{\frac{Ca^{+2} + Mg^{+2}}{2}}} (meq/l)^{0,5} \quad (5.2)$$

Το ποσοστό (Na %) υπολογίζεται από τη σχέση :

$$Na^{+} \% = \frac{Na^{+} + K^{+}}{Ca^{+2} + Mg^{+2} + Na^{+} + K^{+}} \times 100 (\%) \quad (5.3)$$

Στις παραπάνω σχέσεις όλες οι συγκεντρώσεις εκφράζονται σε meq/l.

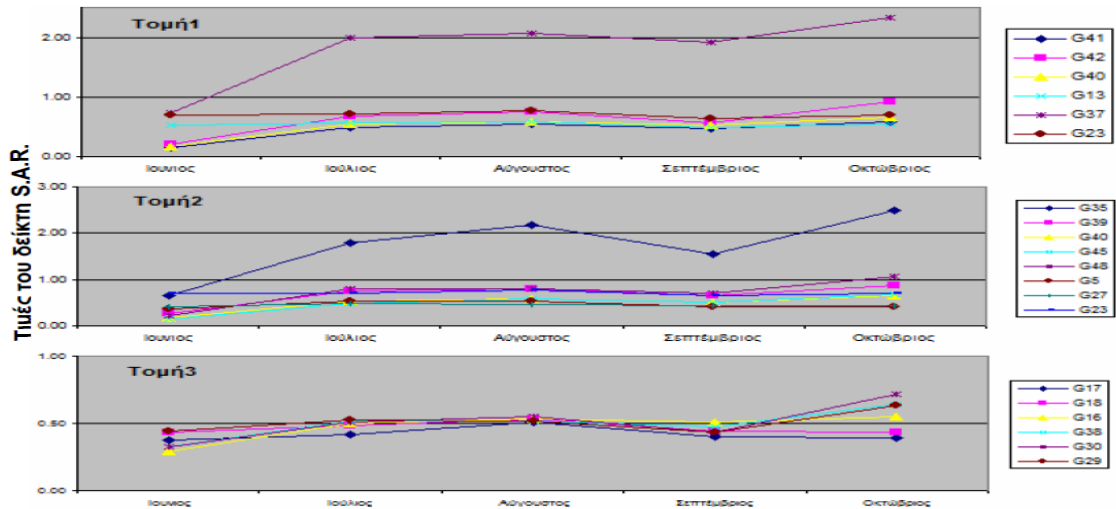
Η χωρική κατανομή του δείκτη S.A.R. και του ποσοστού Na^+ για τους μήνες Ιούνιο και Οκτώβριο του έτους 2009 παρουσιάζονται αντίστοιχα στα Σχήματα 5 και 6.



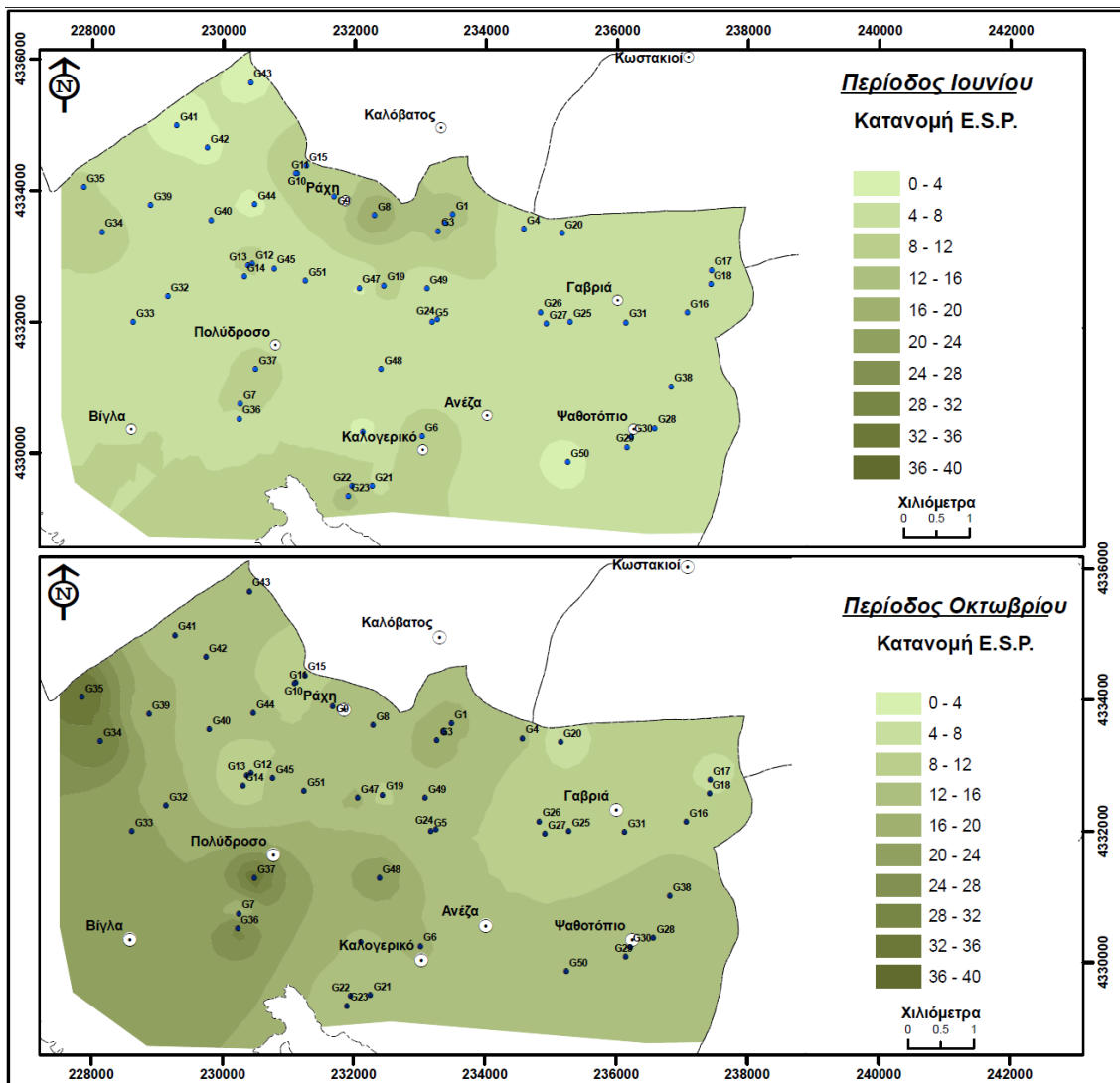
Σχήμα 5. Κατανομή του δείκτη S.A.R. των υπογείων νερών της Δ. Ε. Αμβρακικού Άρτας.

Από τους θεματικούς χάρτες διαπιστώνεται ότι οι μεγαλύτερες τιμές των δύο λόγων εμφανίζονται στο δυτικό και στο κεντρικό τμήμα της περιοχής. Οι μέγιστες τιμές εμφανίζονται στη γεώτρηση G8, η οποία βρίσκεται νοτιοανατολικά του χωριού Ράχη, και στη γεώτρηση G37, η οποία βρίσκεται νότια του χωριού Πολύδροσο και αποδίδονται ενδεχομένως στο μεγάλο βάθος των γεωτρήσεων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τον εμπλουτισμό των νερών των γεωτρήσεων με θειούχα ιόντα της γύψου, η οποία και αποτελεί το υπόβαθρο της περιοχής μελέτης. Σχετικά με τη χρονική μεταβολή του λόγου S.A.R. (Διάγραμμα 2) διαπιστώνεται ότι τον Οκτώβριο παρουσιάζονται οι υψηλότερες τιμές του, γεγονός που αποδίδεται στην επιβάρυνση των αρδευτικών νερών της περιοχής από τις αγροτικές δραστηριότητες της θερινής περιόδου. Η χρονική μεταβολή του ποσοστού Na^+ είναι παρόμοια με εκείνη του S.A.R.

Στο Σχήμα 7 παρουσιάζονται τα διάγραμμα ταξινόμησης του αρδευτικού νερού της περιοχής (α) με τη μέθοδο των Η.Π.Α. (U.S. Salinity Laboratory, 1954) και (β) με τη μέθοδο Wilcox (Wilcox, 1955) για το σύνολο των περιόδων δειγματοληψίας.



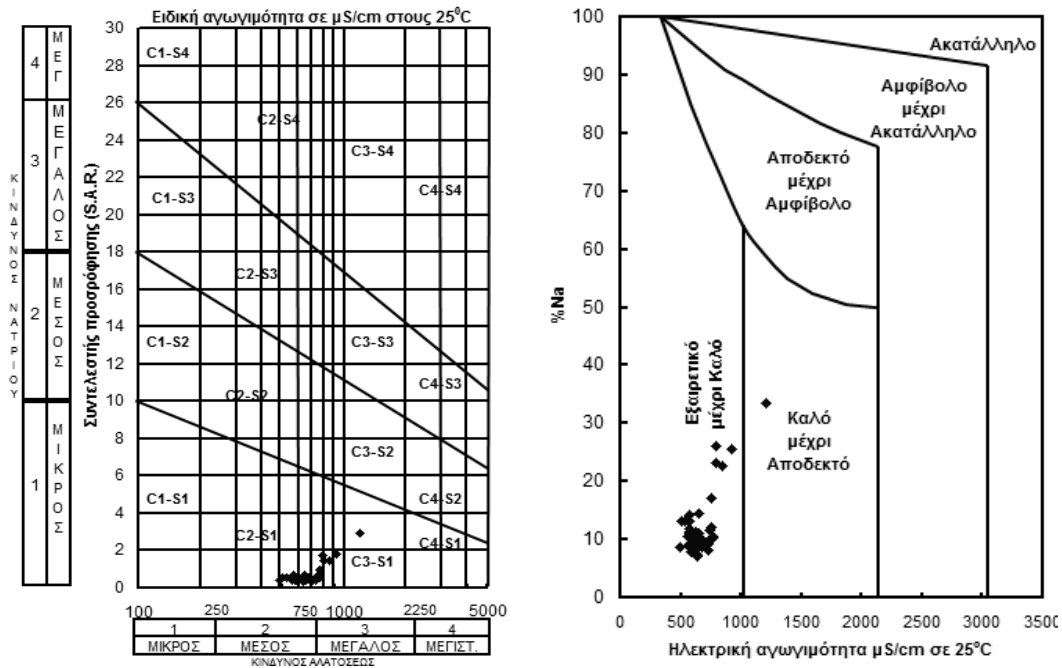
Διάγραμμα 2. Υδροχημικές κατά μήκος τομές του δείκτη S.A.R. για την περιοχή έρευνας



Σχήμα 6. Κατανομή ποσοστού Na⁺ των υπογείων νερών της Δ. Ε. Αμβρακικού Άρτας.

Από το διάγραμμα ταξινόμησης με τη μέθοδο των Η.Π.Α. διαπιστώνεται ότι τα νερά της περιοχής κατατάσσονται κυρίως στην κατηγορία C2-S1 και δευτερευόντως στην κατηγορία C3-S1. Από αυτό προκύπτει ότι τα νερά αυτά θα πρέπει να χρησιμοποιούνται με επιφύλαξη στην περίπτωση εδαφών που δεν στραγγίζουν καλά ή φυτών που είναι ευαίσθητα σε άλατα.

Από το διάγραμμα ταξινόμησης με τη μέθοδο Wilcox διαπιστώνεται ότι τα νερά της περιοχής χαρακτηρίζονται ποιοτικά ως εξαιρετικά έως καλά, με εξαίρεση τις γεωτρήσεις G8 και G37, τα νερά των οποίων χαρακτηρίζονται ποιοτικά ως καλά μέχρι αποδεκτά.



α. β.
Σχήμα 7. Διάγραμμα ταξινόμησης του νερού α. με τη μέθοδο των Η.Π.Α. και β. με τη μέθοδο Wilcox.

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία αξιολογήθηκε η ποιότητα των υπόγειων νερών στην περιοχή της Δημοτικής Ενότητας Αμβρακικού του Δήμου Αρταίων του Νομού Άρτας και διαπιστώθηκε ότι το νερό των αρδευτικών γεωτρήσεων είναι γενικά αρκετά καλής ποιότητας. Η επικράτηση των ιόντων ασβεστίου και όξινων ανθρακικών υποδηλώνει προέλευση του νερού από υδροφόρους που επικρατούν ασβεστολιθικά πετρώματα. Στο δυτικό τμήμα της περιοχής υπάρχουν ασβεστολιθικά πετρώματα τα οποία αποτελούν υδροπερατούς σχηματισμούς. Επίσης τα υπόγεια αρδευτικά νερά της περιοχής βάση των ιοντικών λόγων παρουσιάζουν συνεχή τροφοδοσία.

Γενικά η τιμή του S.A.R. στην περιοχή είναι σε χαμηλά επίπεδα, με πολύ μικρό κίνδυνο νατρίωσης του εδάφους. Επίσης οι τιμές του ποσοστού νατρίου (Na %) είναι μικρές. Με βάση τις τιμές της θερμοκρασίας του νερού και των συγκεντρώσεων των ιόντων Ca^{+2} , Mg^{+2} , HCO_3^- και CO_3^{-2} διαπιστώνεται πολύ μεγάλος κίνδυνος έμφραξης των σταλακτήρων από εναπόθεση αλάτων του Ca^{2+} και του Mg^{2+} σε περίπτωση άρδευσης με σταγόνες. Για το λόγο αυτό η εφαρμογή αυτού του συστήματος άρδευσης δεν ενδείκνυται.

Η ποιότητα των νερών των αρδευτικών γεωτρήσεων είναι γενικά αρκετά καλή για τις καλλιέργειες που εφαρμόζονται στην περιοχή όσο αφορά τον κίνδυνο συγκέντρωσης αλάτων στο έδαφος. Επειδή τα νερά κατατάσσονται στη κατηγορίες C2-S1, και C3-S1 πρέπει να χρησιμοποιούνται με επιφύλαξη στην περίπτωση εδαφών που δεν στραγγίζουν καλά και φυτών που είναι ευαίσθητα στα άλατα.

Από τη χωρική κατανομή των ποιοτικών χαρακτηριστικών των αρδευτικών νερών διαπιστώνεται ότι οι μεγαλύτερες τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας εντοπίζονται στο βόρειο και στο δυτικό τμήμα της περιοχής. Παρόμοια κατανομή παρουσιάζουν και το Ca^{2+} και το Mg^{2+} , όπως και τα HCO_3^- ιόντα. Οι περιοχές αυτές γειτνιάζουν με τα ασβεστολιθικά πετρώματα της περιοχής.

Τέλος, διαπιστώνεται ότι οι όλες οι αρδευτικές γεωτρήσεις παρουσιάζουν καλύτερα ποιοτικά χαρακτηριστικά κατά το τέλος της αρδευτικής περιόδου. Το γεγονός αυτό οφείλεται τόσο στη χρήση για άρδευση του νερού του ποταμού Λούρου, το οποίο εμπλουτίζει τον υπόγειο υδροφόρο, όσο και στον εμπλουτισμό των υπογείων νερών της περιοχής από τους παρακείμενους ασβεστολιθικούς σχηματισμούς.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Appelo, C. and Postma, D., 2007, *Geochemistry, Groundwater and Pollution*, 2nd edition, A.A. Balkema Publishers, Rotterdam, pp. 650.
- Γκέκας, Α., Δημητρακόπουλος, Δ. και Γρηγοράκου, Ε., 2000. *Εφαρμογή συστήματος αυτόματης συλλογής δεδομένων στην διαχείριση των υδατικών πόρων της λεκάνης Βεγορίτιδας*, Πρακτικά 8^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης, σελ. 43-50 Αθήνα, 19-21 Απριλίου 2000.
- Θεοχάρης Μ.Ε., Σιάνου Α. Δ., και Αθανασίου Ε.Η. 2006. *Πρόβλεψη του κινδύνου έμφραξης των σταλακτήρων στα συστήματα άρδευσης με σταγόνες*. Πρακτικά 11ου Πανελληνίου Εδαφολογικού Συνεδρίου της Ελληνικής Εδαφολογικής Εταιρείας, ISBN: 960-87593-8-2, σελ. 635- 645, 4 - 7 Οκτωβρίου 2006, Άρτα.
- Θεοχάρης, Μ. Ε., 2007, *Αρδεύσεις*, Έκδοση ΤΕΙ Ηπείρου, Άρτα, σελ. 270.
- Θεοχάρης, Μ. Ε., 2007, *Η άρδευση με σταγόνες*, Έκδοση ΤΕΙ Ηπείρου, Άρτα, σελ. 146.
- Καλλέργης, Γ., 2001. *Εφαρμοσμένη-Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία*, 2^η έκδοση, τόμοι Α, Β, Γ, Τ.Ε.Ε., Αθήνα
- Καραγιαννίδης, Ν., Μπλαδενοπούλου, Σ., και Ψωμά Π., 2002. *Ποιότητα νερών γεωτρήσεων περιοχής Μυγνονίας*, Πρακτικά 9^{ου} Πανελληνίου Εδαφολογικού Συνεδρίου της Ελληνικής Εδαφολογικής Εταιρείας, σελ. 382-393 Μουσείο Γουλανδρή Φυσικής Ιστορίας –Κηφισιά – Κέντρο Γαία Αθήνα, 23-24 Σεπτεμβρίου 2002.
- Κοντολεμάκη, Μ., 2010, *Η ποιότητα του αρδευτικού νερού του Δήμου Αμβρακικού Ν. Άρτας*, Πτυχιακή εργασία, Τμήμα Φυτικής Παραγωγής, ΤΕΙ Ηπείρου, σελ. 175.
- Latreille, M., Savoyat, E., 1963, Γεωλογικός χάρτης, φύλλο Άρτα, Έκδοση Ι.Γ.Μ.Ε.
- Μυριούνης, Χ. και Θεοχάρης, Μ., 2010, *Ρύπανση Υδάτινων Πόρων – Περιβαλλοντική Αξιολόγηση*, Τμήμα Φυτικής Παραγωγής, ΤΕΙ Ηπείρου, Άρτα, σελ. 333.
- Μυριούνης, Χ., 2008, *Υδρογεωλογική και υδροχημική διερεύνηση των υπογείων νερών της παράκτιας ζώνης της υδρολογικής λεκάνης Αλμυρού Μαγνησίας*, Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, σελ. 379.
- US Salinity Laboratory Staff, 1954, *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*, Agric Handbook, No 60.
- Wilcox, L.V., 1955. *Classification and use of irrigation waters*, U. S. Depart. Agric. Circ. 969, Washington, pp. 19.

**ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ, ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΩΝ
ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΑΡΔΕΥΤΙΚΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΕ ΝΗΣΙΩΤΙΚΕΣ
ΠΕΡΙΟΧΕΣ**

N. Μαλάμος¹, Γ. Παγανέλης²

¹ Τμήμα Μηχανολογίας & Υδάτινων Πόρων, ΤΕΙ Μεσολογγίου, Νέα Κτίρια,
30200, Μεσολόγγι

² Δ/νση Αγροτικής Οικονομίας & Κτηνιατρικής Κυκλάδων, Ερμούπολη, Σύρος

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η παρακολούθηση της μεταβλητότητας φυσικοχημικών παραμέτρων του αρδευτικού νερού, σε φρέατα (πηγάδια) νησιωτικών περιοχών. Η περιοχή μελέτης ήταν η πεδιάδα της Κώμης - Καλλονής στο νησί της Τήνου, που είναι παραθαλάσσια, καλλιεργούμενη κυρίως με οπωροκηπευτικά και εσπεριδοειδή και αρδευόμενη σχεδόν αποκλειστικά από πηγάδια. Εφαρμόστηκε μια μεθοδολογία συλλογής και αποτύπωσης, κατ' αρχήν, των πηγαδιών σε σύστημα γεωγραφικών πληροφοριών. Οι μετρήσεις έδειξαν την μεταβλητότητα των παραμέτρων και την αναγκαιότητα παρακολούθησής τους, τουλάχιστον δύο φορές τον χρόνο. Με αυτό τον τρόπο, μπορούν να συγκεντρωθούν τα απαραίτητα δεδομένα που απαιτούνται για την ορθή διαχείριση του αρδευτικού νερού ώστε να προστατευθεί η γεωργική γη από την υποβάθμιση.

**FIELD SURVEY OF IRRIGATION WATER
PHYSICOCHEMICAL PARAMETERS, IN ISLAND REGIONS**

N. Malamos¹, G. Paganelis²

¹ Department of Mechanical & Water Resources Engineering, Technological Educational Institute of Messolonghi, Nea Ktiria, 30200, Messolonghi, Greece

² Direction of Rural Economy and Veterinary Medicine of the Cyclades,
Hermoupolis, Syros

ABSTRACT

The purpose of this study was to monitor the variation of physicochemical parameters of the irrigation water of wells located in islands. The study area was the valley of Komi - Kalloni on the island of Tinos, which is located near the coastline, mainly cultivated with vegetables and citrus and almost exclusively irrigated from wells. A methodology for collecting and recording the wells' locations into a geographic information system was applied. The measurements showed the variability of parameters and the need to monitor them at least twice a year. In this way, the necessary data required for the proper management of irrigation water in order to protect agricultural land from degradation, can be acquired.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το νερό είναι ένας πεπερασμένος πόρος, που είναι απαραίτητος για τη γεωργία, τη βιομηχανία και την ανθρώπινη ύπαρξη. Σε συνθήκες έλλειψης επαρκών ποσοτήτων και υποβάθμισης της ποιότητάς του, η αειφόρος ανάπτυξη δεν μπορεί να είναι δυνατή. Η ρύπανση και η αλόγιστη χρήση των υδάτων απειλούν την ανάπτυξη και κάνουν απαραίτητη την εφαρμογή μέτρων και πολιτικών που αφορούν τόσο την ποιοτική διαχείριση αλλά και τη διαχείριση της ζήτησης.

Η ποιότητα του νερού έχει νόημα και πρακτικά σημασία μόνο όταν αυτή σχετίζεται με κάποια συγκεκριμένη χρήση. Ειδικότερα, η γεωργία μπορεί να προκαλέσει εκτεταμένη υποβάθμιση του συστήματος έδαφος - νερό καθώς και των υποκείμενων υδροφόρων οριζόντων, όταν δεν ακολουθούνται ορθές γεωργικές πρακτικές κυρίως για την χρήση - εφαρμογή των αγροχημικών. Τα κύρια προβλήματα που σχετίζονται με τη γεωργία είναι η αύξηση της συγκέντρωσης των αλάτων, των νιτρικών και η ρύπανση από φυτοφάρμακα. Η ποιότητα του αρδευτικού νερού αξιολογείται με βάση το βαθμό επίδρασής του επί του εδάφους των καλλιεργειών και επί των διαχειριστικών πρακτικών (Μαλάμος & Ναλμπάντης, 2005).

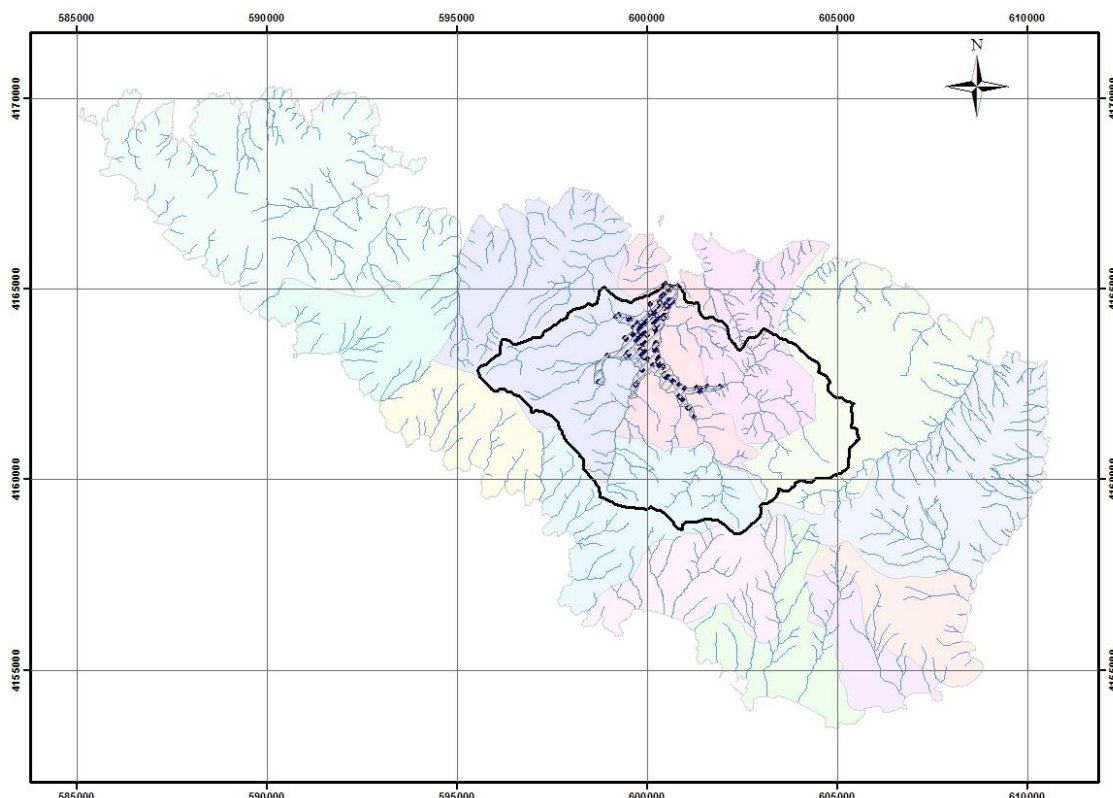
Εντός του ανωτέρω πλαισίου προκύπτει η ανάγκη για την εκτίμηση της ποιότητας των υδάτων, προκειμένου να υποστηριχθεί με επιστημονικό τρόπο η ανάγκη αντιμετώπισης των συνεπειών της υφιστάμενης αλλά και της μελλοντικής υποβάθμισης της ποιότητας των υδάτων και να αποτελέσει τη βάση για την ανάληψη δράσης σε όλα τα επίπεδα. Απαραίτητη βάση για αυτές τις εκτιμήσεις είναι τα αξιόπιστα δεδομένα ελέγχου των μεταβολών της ποιότητας των υδάτων.

Σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Προτύπων (International Organization for Standardization - ISO), η διαδικασία της παρακολούθησης (water quality monitoring) είναι η προγραμματισμένη διαδικασία της δειγματοληψίας, μέτρησης και η ακόλουθη καταγραφή ή σήμανση, ή και τα δύο, διάφορων χαρακτηριστικών του νερού, συχνά με σκοπό την αξιολόγηση της επίτευξης προκαθορισμένων στόχων (water quality assessment). Με βάση τον ανωτέρω γενικό ορισμό, μπορούμε να διακρίνουμε τις εργασίες παρακολούθησης σε μακροπρόθεσμες (monitoring), σε βραχυπρόθεσμες (surveys) και σε συνεχείς (surveillance) (Bartram & Ballance, 1996; Chapman, 1996).

Στην παρούσα εργασία επιχειρήθηκε η εφαρμογή μιας μεθοδολογίας βραχυπρόθεσμης παρακολούθησης της μεταβλητότητας φυσικοχημικών παραμέτρων του αρδευτικού νερού, όπως το διαλυμένο οξυγόνο, η ηλεκτρική αγωγιμότητα, η θερμοκρασία, το pH, το δυναμικό οξειδοαναγωγής και η θολότητα καθώς και η μεταβολή της στάθμης του νερού, σε φρέατα (πηγάδια) νησιωτικής περιοχής με χρήση ενός πολυ-παραμετρικού συστήματος μέτρησης σε συνδυασμό με Η/Υ χειρός. Στα πλαίσια αυτά, εφαρμόστηκε μια μεθοδολογία συλλογής και αποτύπωσης, κατ' αρχήν, των πηγαδιών σε σύστημα γεωγραφικών πληροφοριών, με συνδυασμό συνεντεύξεων και δεδομένων τηλεπισκόπησης.

2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η περιοχή μελέτης ήταν η πεδιάδα της Κώμης - Καλλονής στο νησί της Τήνου στις Κυκλάδες, που είναι παραθαλάσσια, καλλιεργούμενη κυρίως με οπωροκηπευτικά και εσπεριδοειδή και αρδευόμενη σχεδόν αποκλειστικά από πηγάδια. Τα εδάφη της, όπως στις περισσότερες νησιωτικές αγροτικές εκτάσεις, αντιμετωπίζουν προβλήματα αλατότητας, που οφείλονται στη γειννίαση με τη θάλασσα και στην υπεράντληση.



Σχήμα 1: Άποψη του υδρογραφικού δικτύου της Τήνου και της περιοχής μελέτης

Η πεδιάδα βρίσκεται βορειοανατολικά της πόλης της Τήνου εντός των διοικητικών ορίων των δημοτικών διαμερισμάτων Κώμης και Καλλονής του Δήμου Τήνου. Η έκταση της είναι περίπου 2752 στρέμματα και ανήκει στην μεγαλύτερη λεκάνη απορροής της Τήνου, η οποία έχει έκταση περίπου 38216 στρέμματα και συνολικό μήκος υδατορευμάτων περίπου 90 km. (Σχήμα 1). Το κύριο υδατόρεμα που διασχίζει την πεδιάδα ονομάζεται Μεγάλος Ποταμός.

Από εδαφολογική άποψη, η περιοχή μελέτης αποτελείται από αλλουβιακά εδάφη, πηλοαμμώδους κοκκομετρικής σύστασης (Loam Sand), χωρίς CaCO_3 , ουδέτερης αντίδρασης, ασθενώς έως μετρίως αλατούχα, με σχιστολιθικό υπόβαθρο (Shahabi & Αναγνωστόπουλος, 1973).

3. ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ

3.1 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Λόγω του γεγονότος ότι η άρδευση των καλλιεργειών στην περιοχή γίνεται κατά κύριο λόγο από πηγάδια, τίθεται το εύλογο ερώτημα της εκτίμησης της μεταβολής της ποιότητας του αρδευτικού νερού με το χρόνο. Καθορίστηκε ένα πρωτόκολλο με τα βήματα που θα πρέπει να ακολουθηθούν, ώστε να επιτύχουμε τη βέλτιστη περιγραφή της υφιστάμενης κατάστασης.

Το πρωτόκολλο αποτελείται από τα παρακάτω σημεία:

- Αρχικός εντοπισμός των θέσεων των υδροληψιών με χρήση συστήματος γεωγραφικών πληροφοριών (G.I.S.) και δεδομένων τηλεπισκόπησης σε συνδυασμό με συνεντεύξεις των αγροτών της περιοχής. Οι αγρότες καλούνται να αναγνωρίσουν τη θέση των πηγαδιών της περιοχής τους σε οθόνη ηλεκτρονικού υπολογιστή, με τη βοήθεια έγχρωμων δορυφορικών φωτογραφιών πολύ υψηλής ανάλυσης (μέγεθος κελιού 1 m × 1 m), και διάφορων

γεωχωρικών πληροφοριών όπως το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DTM), οι θέσεις των οικισμών, τοπωνύμια, εκκλησίες, υδατορέματα και αγροτικές οδοί. Επίσης, χρησιμοποιούνται οι διαφάνειες, που περιέχουν τις ενότητες και τα διαγράμματα των αγροτεμαχίων, του Συστήματος Γεωγραφικών Πληροφοριών στον Ελαιοκομικό τομέα και του Αμπελουργικού Μητρώου του Νομού Κυκλάδων, της Δ/σης Τοπογραφικής του ΥΠ.Α.Α.Τ. σε κλίμακα 1:5000, με ημερομηνία σύνταξης το Δεκέμβριο 2003, και οι διαφάνειες με τις ενότητες και τα διαγράμματα των υπολοίπων αγροτεμαχίων του Ο.Σ.Δ.Ε. του Νομού Κυκλάδων, της Δ/σης Τοπογραφικής του ΥΠ.Α.Α.Τ. σε κλίμακα 1:5000 με ημερομηνία σύνταξης τον Μάιο 2004. Με βάση όλες αυτές τις πληροφορίες, δημιουργείται θεματικός χάρτης.

- Επιτόπια επίσκεψη με τη συμμετοχή αγροτών-οδηγών για την πραγματοποίηση του πρώτου κύκλου μετρήσεων με ταυτόχρονη επαλήθευση της θέσης των υδροληψιών, με χρήση συστήματος εντοπισμού γεωγραφικής θέσης (G.P.S.).
- Εισαγωγή των πραγματικών θέσεων των υδροληψιών στο σύστημα γεωγραφικών πληροφοριών και επικαιροποίηση του θεματικού χάρτη όλες με τις απαραίτητες πληροφορίες για τον επόμενο κύκλο μετρήσεων.
- Πραγματοποίηση του δεύτερου κύκλου μετρήσεων, αυτόνομα χωρίς τους οδηγούς, με χρήση του συστήματος εντοπισμού γεωγραφικής θέσης, που περιέχει τις πραγματικές θέσεις των υδροληψιών.

3.2 ΠΟΛΥΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ TROLL 9000E

Για τη λήψη των μετρήσεων, χρησιμοποιήθηκε το πολυ-παραμετρικό σύστημα μέτρησης TROLL 9000E σε συνδυασμό με Η/Υ χειρός (PDA), το οποίο παραχωρήθηκε από την ερευνητική ομάδα ΙΠΙΑ του εργαστηρίου Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων, του Τομέα Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, ο οποίος ανήκει στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Το συγκεκριμένο όργανο είναι εφοδιασμένο με αισθητήρες μέτρησης Διαλυμένου Οξυγόνου (Dissolved Oxygen), Αγωγιμότητας (Conductivity), Θερμοκρασίας (Temperature), pH, Δυναμικού Οξειδοαναγωγής (ORP), Θολότητας (Turbidity). Η βαθμονόμηση όλων των αισθητήρων εκτός από αυτόν της θολότητας γίνεται με χρήση ενός διαλύματος (Quick Cal). Ο ανωτέρω συνδυασμός αισθητήρων είναι ικανός να δώσει μια βασική εκτίμηση της ποιότητας του νερού (Bartram & Ballance, 1996).

Το όργανο μέτρησης συνδέεται με καλώδιο μήκους 20 m με τον Η/Υ χειρός (PDA), στον οποίο είναι εγκατεστημένο το λογισμικό Pocket-Situ for PDA. Με τον Η/Υ χειρός, γίνεται η επεξεργασία και η αποθήκευση των μετρήσεων καθώς και η βαθμονόμηση του οργάνου. Αυτή η τεχνολογία επιτρέπει την λήψη μετρήσεων για τις ανωτέρω παραμέτρους περίπου κάθε 2 δευτερόλεπτα. Μετά τη λήψη μέτρησης, το όργανο ξεπλένεται με απιονισμένο νερό, με σκοπό την αποφυγή ύπαρξης ακαθαρσιών στους αισθητήρες κατά τη διάρκεια της επόμενης μέτρησης.

3.3 ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗΣ ΘΕΣΗΣ (G.P.S.)

Το σύστημα εντοπισμού γεωγραφικής θέσης αποτελούνταν από το όργανο G.P.S. eTrex[®] Legend Cx της εταιρίας GARMIN με ακρίβεια από 3 έως 15 μέτρα και χρόνο συντονισμού τουλάχιστον 45 δευτερόλεπτα και από λογισμικό με το οποίο είναι δυνατή η μεταφορά των δεδομένων του οργάνου στον υπολογιστή.



Σχήμα 2: Χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός

3.4 ΛΟΙΠΑ ΟΡΓΑΝΑ

Για την μέτρηση του βάθους του πυθμένα των πηγαδιών, της διαμέτρου τους και της στάθμης του νερού, χρησιμοποιείται μετροταινία, ενώ πραγματοποιείται λήψη φωτογραφιών με ψηφιακή φωτογραφική μηχανή. Επίσης, η χρήση φακού είναι απαραίτητη στην περίπτωση ύπαρξης βοηθητικού φρεατίου (παραπήγαδο) για να φτάσουμε με ασφάλεια στην υδροληψία. Απαραίτητα πρέπει να έχουμε μαζί μπαταρίες, αδιάβροχα υποδήματα, δελτίο δειγματοληψίας και πλαστικό δοχείο με σχοινί για λήψη νερού από πηγές (Σχήμα 2).

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

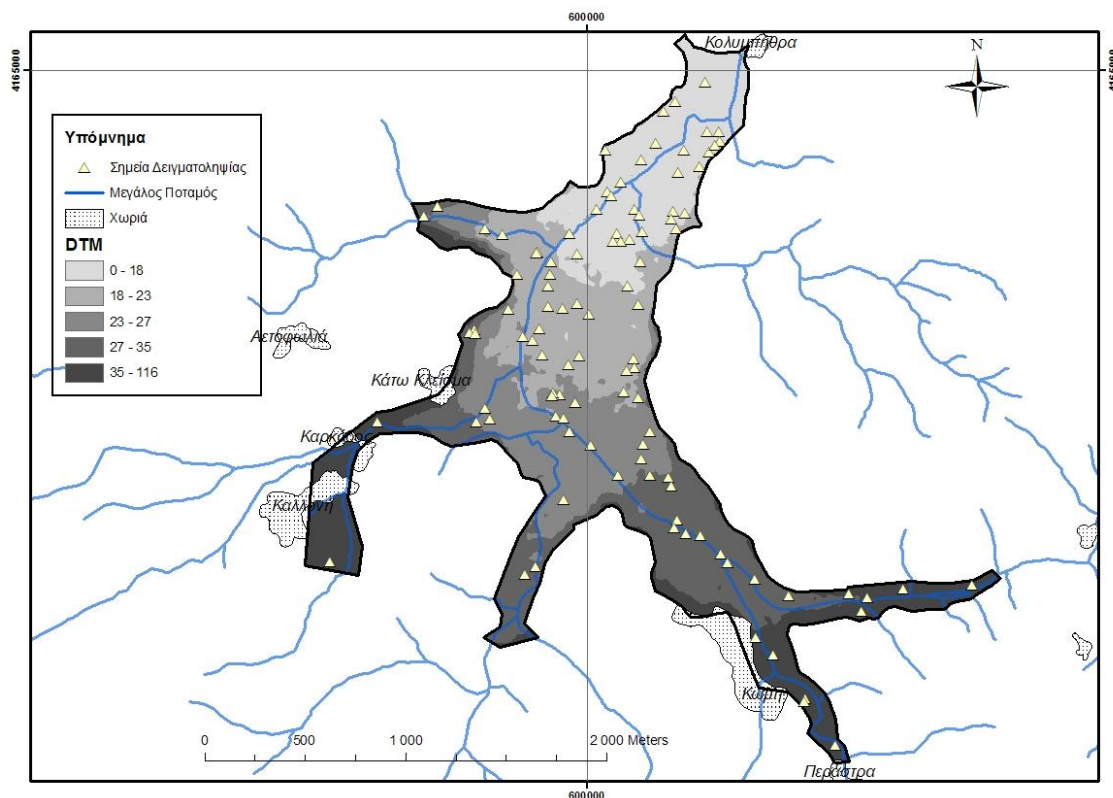
Εφαρμόζοντας το πρωτόκολλο που αναφέρθηκε ανωτέρω, εντοπίστηκαν 104 πηγάδια στην περιοχή μελέτης, με αποτέλεσμα να αντιστοιχεί κατά μέσο όρο μια μέτρηση σε κάθε 26.5 στρέμματα. Πρακτικά όμως, οι γεωργικές εκτάσεις που βρίσκονται σε υψόμετρο μέχρι 35 m είχαν μεγαλύτερη πυκνότητα, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.

Πραγματοποιήθηκαν δύο κύκλοι μετρήσεων, ο πρώτος κάλυψε την ξηρή περίοδο του υδρολογικού έτους και είχε διάρκεια από τις 28 - 8 - 2007 έως τις 21 - 9 - 2007, ενώ ο δεύτερος ακολούθησε την υγρή περίοδο του υδρολογικού έτους και είχε διάρκεια από τις 14 - 3 - 2008 έως τις 30 - 3 - 2008. Όλες οι μετρήσεις έγιναν σύμφωνα με τις οδηγίες που αναφέρονταν στο εγχειρίδιο χρήσης του συστήματος μέτρησης TROLL 9000E (In-Situ Inc., 2005). Επίσης, πραγματοποιήθηκαν δύο βαθμονομήσεις κατά τη διάρκεια κάθε κύκλου μετρήσεων, μία στην αρχή και μία στο μέσο του καθενός, με χρήση του πρότυπου διαλύματος Quick Cal.

Με γνώμονα τη διασφάλιση της συστηματικότητας των μετρήσεων αλλά και την δυνατότητα πρακτικής εφαρμογής, επιλέξαμε να πραγματοποιούμε τις μετρήσεις μόλις το κυρίως σώμα του οργάνου βυθιζόταν πλήρως εντός του νερού. Αυτή η επιλογή οδήγησε στη λήψη των μετρήσεων σε βάθος 60 εκατοστών από την επιφάνεια της στάθμης του νερού εντός των πηγαδιών. Η διάρκεια των μετρήσεων καθορίστηκε από το χρόνο που απαιτούνταν για τη σταθεροποίηση των τιμών των αισθητήρων, όπως αυτές εμφανίζονταν στον υπολογιστή χειρός και κυμάνθηκε από 70 δευτερόλεπτα ως 19.5 λεπτά, με μέση διάρκεια τα 7.6 λεπτά. Ο λόγος του πολύ μεγάλου εύρους διάρκειας μέτρησης οφείλονταν στον αισθητήρα διαλυμένου οξυγόνου που σε ορισμένες περιπτώσεις απαιτήσε μεγάλο χρονικό διάστημα για να σταθεροποιηθεί.

Ως στάθμη του νερού των πηγαδιών ορίσαμε την απόσταση της επιφάνειας του νερού από την επιφάνεια του εδάφους, όπως αυτή μετρήθηκε με την μετροταινία.

Ο πρώτος κύκλος μετρήσεων χρειάστηκε δεκαέξι μέρες για να ολοκληρωθεί ενώ ο δεύτερος χρειάστηκε μόνο δώδεκα μέρες μετρήσεων. Η μεγαλύτερη διάρκεια του πρώτου κύκλου οφείλεται στο γεγονός ότι αρχικά δεν ήταν διαθέσιμες οι πραγματικές θέσεις των υδροληψιών και επίσης δεν είχαν αποτυπωθεί τα δρομολόγια που έπρεπε να ακολουθηθούν ώστε να φτάσουμε στις υδροληψίες. Κατά την διάρκεια του δεύτερου κύκλου, ήταν διαθέσιμα όλα τα απαραίτητα δεδομένα κίνησης μέσα στην πεδιάδα, γεγονός που συνετέλεσε στην μείωση του χρόνου μετακίνησης και αύξηση τον αριθμό μετρήσεων που λαμβάνονταν ανά ημέρα.



Σχήμα 3: Σημεία δειγματοληψίας στην πεδιάδα Κώμης - Καλλονής

Στους πίνακες 1 και 2 παρουσιάζεται η σύνοψη των αποτελεσμάτων των δύο κύκλων μετρήσεων, με τις μέγιστες, τις ελάχιστες και τις μέσες τιμές των παραμέτρων που μετρήθηκαν. Επίσης, παρουσιάζεται και ο αριθμός των μετρήσεων, ως ποσοστό, που οι τιμές των παραμέτρων υπερέβησαν τις αντίστοιχες μέσες τιμές. Οι τιμές των

παραμέτρων κυμαίνονται εντός των ορίων που τίθενται από την βιβλιογραφία (In-Situ Inc., 2005).

Πίνακας 1: Συνοπτικά αποτελέσματα μετρήσεων ξηρής περιόδου

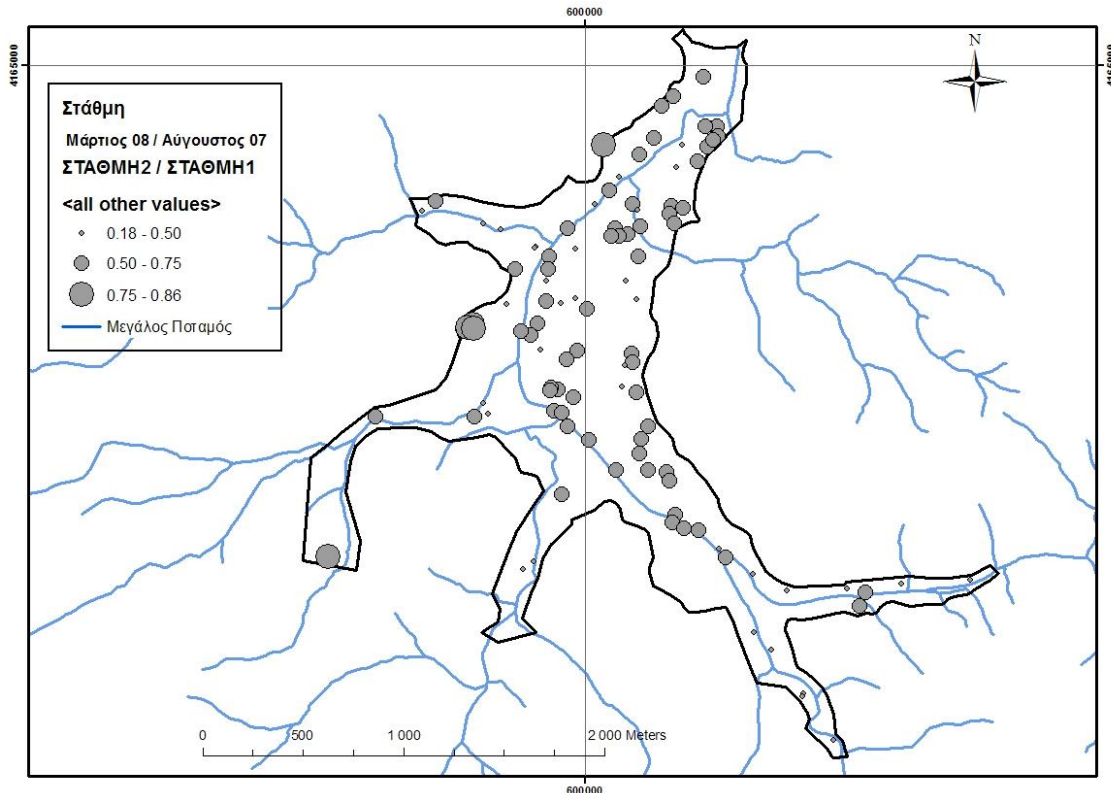
	Αύγουστος 2007			
	Μέγιστη τιμή	Ελάχιστη τιμή	Μέση Τιμή	Ποσοστό μετρήσεων που υπερβαίνουν την μέση τιμή
Στάθμη (m)	13.8	0.7	5.1	38.5%
Ειδική Ηλεκτρική Αγωγιμότητα, 25 °C (μS/cm)	4769.5	1159.3	1757	36.5%
Θερμοκρασία (°C)	22.83	15.19	18.19	47.1%
Θολότητα (NTU)	16.6	0.4	1.0	21.2%
Δυναμικό Οξειδοαναγωγής (mV)	193	-274	70.1	62.5%
pH	8.22	6.78	7.56	63.5%
Διαλυμένο Οξυγόνο (μg/L)	9676	608	3756	48.1%

Πίνακας 2: Συνοπτικά αποτελέσματα μετρήσεων υγρής περιόδου

	Μάρτιος 2008			
	Μέγιστη τιμή	Ελάχιστη τιμή	Μέση Τιμή	Ποσοστό μετρήσεων που υπερβαίνουν την μέση τιμή
Στάθμη (m)	6.9	0.6	2.7	37.5%
Ειδική Ηλεκτρική Αγωγιμότητα, 25 °C (μS/cm)	7205	851.6	1684.6	32.7%
Θερμοκρασία (°C)	19.19	12.21	15.6	53.8%
Θολότητα (NTU)	2.9	0	0.4	35.6%
Δυναμικό Οξειδοαναγωγής (mV)	228	-159	93.7	57.7%
pH	8.65	5.81	7.45	43.3%
Διαλυμένο Οξυγόνο (μg/L)	10398	569	4296.6	46.2%

Με στόχο την ευκολότερη κατανόηση της μεταβλητότητας των ανωτέρω παραμέτρων, στο Σχήμα 4 παρουσιάζεται η μεταβολή στάθμης του νερού των πηγαδιών, μεταξύ των δύο περιόδων μετρήσεων μαζί με τα υδατορέματα της περιοχής. Τα μεγέθη προέκυψαν από τη διαίρεση των τιμών στάθμης της υγρής περιόδου, για κάθε πηγάδι χωριστά, με τις αντίστοιχες τιμές της ξηρής περιόδου.

Είναι προφανές ότι υπάρχει σημαντική μεταβλητότητα των τιμών στάθμης μεταξύ των δύο περιόδων, ειδικά κατά μήκος του υδατορέματος. Γενικά, όσο αυξάνεται η απόσταση από το κύριο υδατόρεμα, τόσο μειώνεται και η μεταβολή της στάθμης. Παρόλα αυτά σε όλες τις περιπτώσεις η στάθμη του νερού ανέβηκε σε σχέση με την ξηρή περίοδο, με μέση τιμή μόλις 2.7 m χαμηλότερα από την επιφάνεια του εδάφους.



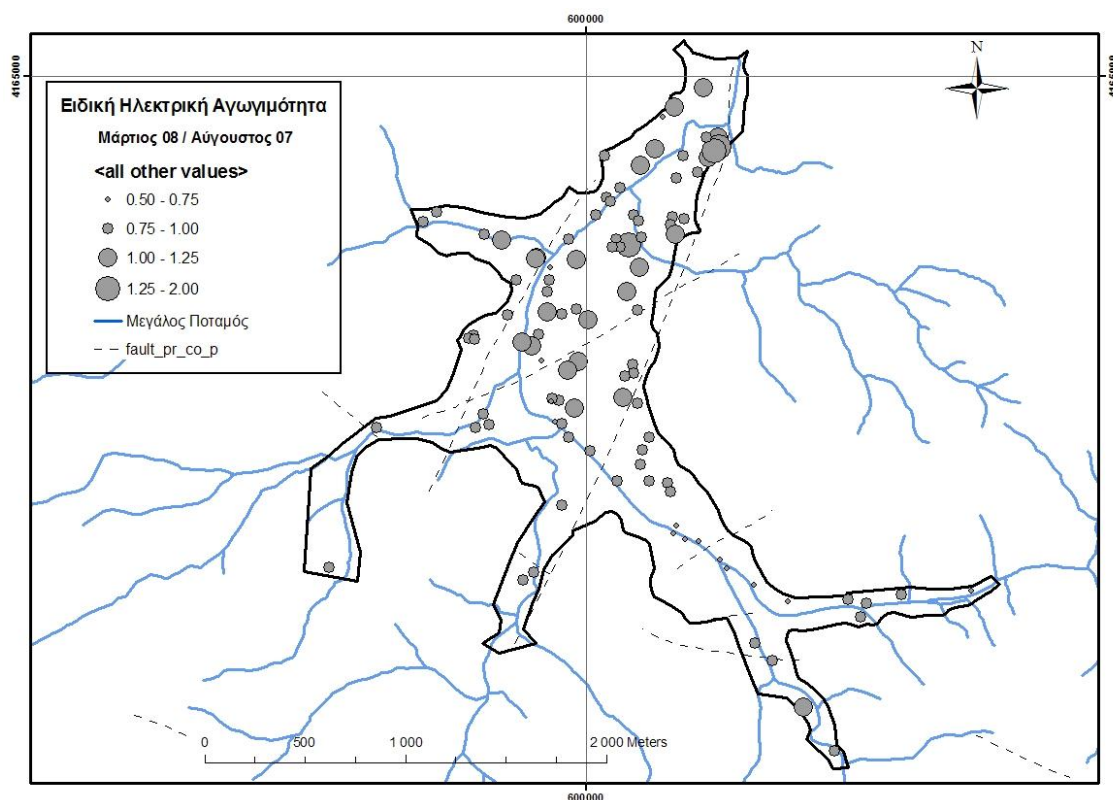
Σχήμα 4: Χάρτης μεταβολής της στάθμης του νερού, μεταξύ των δύο περιόδων μετρήσεων

Στο Σχήμα 5 παρουσιάζεται η μεταβολή της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας του νερού των πηγαδιών, μεταξύ των δύο περιόδων μετρήσεων, μαζί με τα υδατορέματα και τα γεωλογικά ρήγματα της περιοχής. Τα μεγέθη προέκυψαν από τη διαίρεση των τιμών της υγρής περιόδου, για κάθε πηγάδι χωριστά, με τις αντίστοιχες τιμές της ξηρής περιόδου. Πρέπει να σημειώσουμε ότι έγινε αναγωγή των τιμών μέτρησης ηλεκτρικής αγωγιμότητας (Actual Conductivity - AC) στην ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα στους 25°C (Specific Conductivity - SC), με χρήση της (4.1) (In-Situ Inc., 2005):

$$SC = AC / [1 + 0.0191 \times (Temp - 25.0)] \quad (4.1)$$

όπου Temp είναι η θερμοκρασία σε °C.

Και στην περίπτωση αυτή, είναι προφανές ότι υπάρχει σημαντική μεταβλητότητα των τιμών μεταξύ των δύο περιόδων, ειδικά κατά μήκος του υδατορέματος. Στα σημεία όπου παρουσιάστηκε ιδιαίτερη αύξηση της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας και μείωση του pH κατά την υγρή περίοδο, έγινε επιτόπιος έλεγχος όπου διαπιστώθηκε ότι είχαμε εφαρμογή οργανικής λίπανσης (κοπριάς), από τους αγρότες. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι πολύ υψηλές τιμές της αγωγιμότητας (π.χ. 7205 μS/cm) κατά μήκος των γεωλογικών ρηγμάτων κοντά στη θάλασσα (IGME, 2003), δηλαδή μέχρι την απόσταση των 500 m, μπορούν να εξηγηθούν με την εισροή θαλασσινού νερού.



Σχήμα 5: Χάρτης μεταβολής της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας του νερού, μεταξύ των δύο περιόδων μετρήσεων

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας εφαρμόστηκε μια μεθοδολογία εκτίμησης της μεταβολής στο χρόνο φυσικοχημικών παραμέτρων της ποιότητας του νερού άρδευσης, σε μια νησιωτική αγροτική περιοχή μελέτης. Ο αρχικός εντοπισμός των θέσεων των πηγαδιών με χρήση θεματικών χαρτών που προέκυψαν από το συνδυασμό συστήματος γεωγραφικών πληροφοριών (G.I.S.) και δεδομένων τηλεπισκόπησης σε συνδυασμό με συνεντεύξεις των αγροτών της περιοχής και η επικαιροποίησή τους με τις πραγματικές θέσεις, οδήγησαν στη βέλτιστη κατανομή χρόνου και πόρων και άρα σε μείωση του απαιτούμενου χρόνου για την κάλυψη της περιοχής μελέτης.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων έδειξαν ότι η συνολική εικόνα της ποιότητας του νερού είναι καλύτερη στο τέλος της υγρής περιόδου, παρόλο που η μεταβλητότητα των παραμέτρων είναι αρκετά υψηλή.

Ειδικότερα, οι τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας είναι υψηλές και στις δύο περιόδους, αλλά το γεγονός ότι τα εδάφη της συγκεκριμένης περιοχής είναι ελαφρά, πηλοαμμώδους κοκκομετρικής σύστασης σε συνδυασμό με την γεωργική πρακτική της εφαρμογής κλάσματος έκπλυσης άνω του 20% κατά τη διάρκεια των αρδεύσεων, οδηγεί στον περιορισμό των προβλημάτων αλατότητας και υποβάθμισης της δομής του εδάφους (Saskatchewan Water Corporation, 1987).

Τα ανωτέρω οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η παρακολούθηση των φυσικοχημικών παραμέτρων του νερού των πηγαδιών, τουλάχιστον δύο φορές τον χρόνο, μία κατά την ξηρή περίοδο (Αύγουστος - Σεπτέμβριος) και μία κατά την υγρή περίοδο πριν την έναρξη της αρδευτικής περιόδου (Μάρτιος - Απρίλιος), είναι αναγκαία. Με αυτό τον τρόπο, μπορούν να συγκεντρωθούν τα απαραίτητα δεδομένα που απαιτούνται για την

ορθή διαχείριση του αρδευτικού νερού και την εφαρμογή του κλάσματος έκπλυσης, ώστε να προστατευθεί η γεωργική γη από την υποβάθμιση.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα μελέτη δεν θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί χωρίς την παραχώρηση του συστήματος μέτρησης TROLL 9000E από τον συντονιστή της ερευνητικής ομάδας ΙΤΙΑ, Καθηγητή ΕΜΠ Δημήτρη Κουτσογιάννη. Επίσης, καθοριστική ήταν η συμβολή των αγροτών από τα Κάτω Μέρη της Τήνου: Κώμη, Καλλονή και Κάτω Κλείσμα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Bartram, J., Ballance, R., 1996. *Water Quality Monitoring; A Practical Guide to the Design and Implementation of Fresh Water Quality Studies and Monitoring Programmes*. UNEP/WHO
- Chapman, D., 1996. *Water Quality Assessments. A Guide to the Use of Biota, Sediments and Water in Environmental Monitoring*. 2nd edition, UNESCO/WHO/UNEP.
- In-Situ Inc., 2005. *Multi-Parameter TROLL 9000, Operator's Manual*. Ft. Collins, USA, 74 pp
- Saskatchewan Water Corporation, 1987. *Irrigation Water Quality - Soil Compatibility: Guidelines for Irrigation in Saskatchewan*. Saskatchewan Water Corporation, 60 pp.
- Shahabi, S., Αναγνωστόπουλος, Κ., 1973. *Εδαφολογικός χάρτης Τήνου*. Ινστιτούτο Χημείας και Γεωργίας "Ν. Κανελλόπουλος"
- ΙΓΜΕ, 2003. *Γεωλογικός Χάρτης Φύλλο Τήνος*, 1:50.000
- Μαλάμος Ν., Ναλμπάντης Ι., 2005. *Ανάλυση των πρακτικών διαχείρισης της ζήτησης νερού, Ολοκληρωμένη διαχείριση Υδατικών Συστημάτων σε Σύζευξη με Εξελεγμένο Υπολογιστικό Σύστημα (ΟΔΥΣΣΕΥΣ)*. Τεύχος 15, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα

**ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΑΠΟΣΤΡΩΜΑΤΩΣΗΣ ΜΕ ΔΙΑΧΥΣΗ ΑΕΡΑ ΤΟΥ
ΥΔΡΟΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ ΔΙΠΟΤΑΜΟΥ – ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥΠΟΛΗΣ**
**Μ. Μήτρακας¹, Χ. Κακαλής⁴, Σ. Στυλιανού², Ε. Καπράρα¹, Π. Σαμαράς³,
Α.Ι. Ζουμπούλης²**

¹Τμήμα Χημικών Μηχανικών, ΑΠΘ, 54124 Θεσσαλονίκη,
email: manasis@eng.auth.gr

²Εργαστήριο Γενικής και Ανόργανης Χημικής Τεχνολογίας, Τμήμα Χημείας, ΑΠΘ,
54124 Θεσσαλονίκη

³Τμήμα Τεχνολογίας Τροφίμων, ΑΤΕΙ Θεσσαλονίκης, 57400 Θεσσαλονίκη,

⁴Δημοτική Επιχείρηση Ύδρευσης – Αποχέτευσης Αλεξανδρούπολης,

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της εργασίας αυτής ήταν ο σχεδιασμός η εφαρμογή και η αξιολόγηση της διεργασίας αποστρωμάτωσης του υδροταμιευτήρα Διποτάμου με διάχυση αέρα. Ο υδροταμιευτήρας του Διποτάμου βρίσκεται στην Αλεξανδρούπολη και με την πλήρωσή του εμφάνισε θερμοκρασιακή στρωμάτωση κατά τους θερινούς μήνες. Ο σχεδιασμός του εξοπλισμού έγινε με βάση το μοντέλο του J. M. Davis και την πτώση πίεσης στους αγωγούς τροφοδοσίας αέρα από πολυαιθυλένιο. Οι μετρήσεις έδειξαν ότι η τεχνητή ανάδευση με αέρα είναι μια δόκιμη μέθοδος για ολική αποστρωμάτωση του υδροταμιευτήρα, που επιτυγχάνεται ακόμη και σε μεγάλη απόσταση από το τελικό σημείο τροφοδοσίας του αέρα, με ελάχιστη δαπάνη ενέργειας που εκτιμήθηκε περίπου στα 55 Wh/10³m³/d. Επίσης, η ποιότητα του νερού βελτιώθηκε σημαντικά και σύντομα.

**AIR DIFFUSION DESTRATIFICATION STUDY ON DIPOTAMO-
ALEXANDROUPOLIS RESERVOIR**
**M.Mitrakas¹, X.Kakalis⁴, S. Stulianou², E. Kaprara¹, P. Samaras³,
A.I. Zouboulis²**

¹Department of Chemical Engineering, AUTH, 54124 Thessaloniki, Greece
email: manasis@eng.auth.gr

²Laboratory of General and Inorganic Chemical Technology, Department of
Chemistry, AUTH, 54124 Thessaloniki, Greece

³Department of Food Technology, Alexander Technological Institute of Thessaloniki,
57400 Thessaloniki, Greece

⁴Municipal Enterprise of Water Supply – Sewerage of Alexandroupoli

ABSTRACT

The aim of this study was the design and evaluation of the destratification of Dipotamos reservoir, by the application of air injection through perforated pipes. Dipotamos reservoir is located near Alexandroupoli in Northern Greece, and it was found to present thermal stratification problems during the summer months. The selection of the appropriate technical parameters of the injection system equipment was based on the J.M. Davis model, and the corresponding pressure drop calculations in the installed polyethylene pipes. The obtained data showed that artificial mixing represents an adequate method for the complete destratification of a reservoir, achieved even in rather long distances from the application point, with energy consumption around 55 Wh/10³m³/d. In addition, the quality of water was improved in a relatively short time of application.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αστική ανάπτυξη αλλά και η γεωργική και βιομηχανική παραγωγή έχουν αυξήσει τις απαιτήσεις σε νερό υψηλής ποιότητας για διάφορες χρήσεις, όπως είναι για παράδειγμα οι αστικές δραστηριότητες, οι βιομηχανικές διεργασίες και η άρδευση. Η μείωση των αποθεμάτων των υπόγειων υδροφορέων οδήγησε στην αυξημένη χρήση των επιφανειακών νερών, με την κατασκευή φραγμάτων για την εξασφάλιση της απαιτούμενης ποσότητας νερού. Ωστόσο, η υποβάθμιση της ποιότητας των επιφανειακών υδάτων, ως συνέπεια της αποθήκευσής τους σε συνθήκες εξωτερικού περιβάλλοντος και της ανθρώπινης δραστηριότητας στη λεκάνη απορροής, οδηγεί σε αύξηση του κόστους επεξεργασίας του νερού. Η υποβάθμιση της ποιότητας των επιφανειακών νερών σχετίζεται συνήθως με φαινόμενα ευτροφισμού, καθώς η παρουσία φωτός, θρεπτικών ουσιών και οργανικής ύλης συμβάλλουν σε σημαντική ανάπτυξη των αλγών.

Τα άλγη έχουν ιδιαίτερη σημασία για τους υγροτόπους και τα θαλάσσια οικοσυστήματα και τα περισσότερα είδη τους δεν είναι επιβλαβή (Moustaka-Gouni et al., 2000). Ωστόσο, μπορεί να εμφανιστεί έξαρση πολλαπλασιασμού των επιβλαβών αλγών (harmful algal bloom-HAB), όταν αναπτυχθούν συγκεκριμένοι τύποι μικροσκοπικών αλγών τα οποία παράγουν ουσίες που προσδίδουν οσμή και γεύση στο νερό, ενώ επιπλέον εκλύουν τοξίνες (Chorus and Bartman, 1999). Η γεύση και η οσμή στις λίμνες και τους υδροταμιευτήρες προκαλούνται από μικροοργανισμούς που ελευθερώνουν διάφορες οργανικές ουσίες, όπως είναι η μεθυλο-ισοβορνεόλη (MIB) και η γεωσμίνη. Η παρουσία ενώσεων που προσδίδουν γεύση και οσμή μπορεί να αποτελέσει σοβαρό πρόβλημα, καθώς το όριο συγκέντρωσης που ανιχνεύεται από τον άνθρωπο είναι σχεδόν μικρότερο από 1μg/L. Δύο βασικοί οργανισμοί που έχουν συνδεθεί με τέτοιους μεταβολίτες είναι τα κυανοβακτήρια και οι ακτινομύκητες. Οι φωτοσυνθετικοί αυτοί μικροοργανισμοί θεωρούνται υπεύθυνοι για την παραγωγή πολύ ισχυρών τοξινών σε υδατικά οικοσυστήματα, όπως είναι οι νευροτοξίνες, ηπατοτοξίνες και δερματοτοξίνες (Westric, 2003, Karner et al., 2001, Gilroy et al., 2001, Yoo, 1994, Bell and Codd, 1994).

Η υποβάθμιση της ποιότητας των επιφανειακών νερών συνδέεται άμεσα με τη στρωμάτωση του νερού εξαιτίας της επίδρασης της θερμοκρασίας στην πυκνότητα του νερού. Το καλοκαίρι, το θερμότερο νερό καθώς και σημαντική ποσότητα του διαλυμένου οξυγόνου συγκεντρώνονται στην επιφάνεια ή κοντά σε αυτήν (επιλίμνιο). Ένα ευκρινές θερμοκλινές στρώμα νερού (μεταλίμνιο) διαχωρίζει το θερμότερο οξυγονωμένο επιφανειακό νερό, που ευνοεί το φαινόμενο HAB, από το βαθύτερο, ψυχρότερο και ανοξικό στρώμα νερού (υπολίμνιο). Υπό αυτές τις ανοξικές συνθήκες υποβαθμίζεται η ποιότητα του νερού καθώς ευνοείται η ανάπτυξη μικροοργανισμών που οδηγούν στη διαλυτοποίηση σιδήρου και μαγγανίου, την παραγωγή αμμωνίας και θειούχων και την απελευθέρωση θρεπτικών για τα άλγη συστατικών, όπως ο φώσφορος και το πυρίτιο (Albanakis et al., 2001, Chorus and Bartram, 1999). Προς το τέλος φθινοπώρου και τις αρχές του χειμώνα το εισερχόμενο κρύο νερό δημιουργεί ομοιόμορφη θερμοκρασία, καθώς επίσης και συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου στη στήλη νερού. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως θερμοκρασιακή ομογενοποίηση και αποτελεί τη φυσική διαδικασία ανάμιξης θρεπτικών ουσιών και οξυγόνου στα βαθύτερα στρώματα του νερού. Με τον ερχομό της άνοιξης ο ήλιος θερμαίνει το επιφανειακό στρώμα νερού (επιλίμνιο) οπότε ως τις αρχές του καλοκαιριού επανεμφανίζεται η στρωμάτωση. Ως εκ τούτου, σε περιοχές όπως η Ελλάδα με έντονη ηλιοφάνεια κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού και του φθινοπώρου παρατηρείται θερμική στρωμάτωση του νερού των υδροταμιευτήρων, η οποία ευθύνεται για τα σοβαρά αισθητικά και τοξικολογικά προβλήματα του νερού, όπως παρατηρήθηκε και στον υδροταμιευτήρα Διποτάμου της Αλεξανδρούπολης αμέσως μετά την πλήρωσή του.

Σήμερα, οι εταιρίες ύδρευσης δείχνουν αυξημένο ενδιαφέρον στη διαχείριση της εκτεταμένης ανάπτυξης μικροαλγών εξαιτίας των προβλημάτων που δημιουργούν τόσο

στον άνθρωπο, όσο και στο περιβάλλον. Όπως προαναφέρθηκε, τα μικροάλγη προσδίδουν γεύση και οσμή στο πόσιμο νερό, καθώς επίσης ειδικά τα κυανοβακτηρία παράγουν τοξίνες [Yoo et al., 1995]. Ωστόσο, σημαντικά είναι και τα προβλήματα από την ανάπτυξη των μικροαλγών στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας του πόσιμου νερού, όπως είναι η μείωση της απόδοσης των φίλτρων άμμου, η μεταβολή της τιμής pH, της αλκαλικότητας, της σκληρότητας, του χρώματος και της θολότητας του νερού. Η στρατηγική διαχείρισης των επιφανειακών πηγών υδροληψίας περιλαμβάνει διάφορα μέτρα, όπως είναι η πρόληψη της στρωμάτωσης (Miller and Macay, 2003, Wawkins and Griffiths, 1993), προσθήκη θεικού χαλκού για την καταστολή της ανάπτυξης των μικροαλγών (Hanson and Heinz, 1984, Prepas and Murphy, 1988) και μεθόδους απομάκρυνσης τοξινών και αλγών κατά την τελική επεξεργασία του νερού (Casting et al., 2010, Westrick et al., 2010, Drikas et al., 2001, Rositano et al., 1998, Donati et al., 1994). Είναι προφανές ότι η προτιμότερη ενέργεια για τον έλεγχο των μικροαλγών είναι η πρόληψη της έξαρσης HAB. Τα προληπτικά μέτρα στοχεύουν στον έλεγχο των παραγόντων που ευνοούν την ανάπτυξή τους, είτε με τεχνητή αποστρωμάτωση του υδροταμιευτήρα (Pastorak et al., 1982, Davis, 1980, Lorenz and Fast, 1977), είτε με έλεγχο της ανάπτυξης των αλγών με εφαρμογή υπερήχων (Wu et al., 2010).

Ο νέος υδροταμιευτήρας που κατασκευάστηκε στην περιοχή του Διποτάμου κοντά στην Αλεξανδρούπολη στη Βόρεια Ελλάδα, πληρώθηκε στις αρχές του 2005 (Σχήμα 1). Κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού του 2005 παρατηρήθηκε μια δυσάρεστη οσμή στο επιλίμνιο που αποδόθηκε στην υψηλή συγκέντρωση MIB, γεωσμίνης, καθώς επίσης και στις υψηλές συγκεντρώσεις σιδήρου, μαγγανίου, υδροθείου και αμμωνίας στο υπολίμνιο. Μετρήσεις πεδίου επαλήθευσαν τη στρωμάτωση του νερού στον υδροταμιευτήρα επιβάλλοντας την αντιμετώπιση του σοβαρού αυτού προβλήματος. Στην παρούσα μελέτη παρουσιάζονται τα προβλήματα από τη στρωμάτωση του νερού, οι παράμετροι σχεδιασμού και κατασκευής του συστήματος αερισμού, καθώς επίσης και τα αποτελέσματα από τα τρία χρόνια λειτουργίας της επεξεργασίας αποστρωμάτωσης με διάχυση αέρα.

2. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΟΥ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ ΚΑΙ ΟΡΙΟΘΕΤΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

2.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ

Η κατασκευή του υδροταμιευτήρα Διποτάμου χρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση με σκοπό την παροχή περίπου 20×10^3 m³/d πόσιμο νερό στο Δήμο της Αλεξανδρούπολης. Το χωμάτινο φράγμα κατασκευάστηκε σε μια στενή και βαθιά κοιλάδα, κατάντη και αμέσως μετά τη συμβολή δύο κλάδων του χειμάρρου Βαθύ Ρέμα, οι οποίοι ρέουν σχηματίζοντας μαϊάνδρους στη θέση Διπόταμος. Το Βαθύ Ρέμα αποτελεί κλάδο του χειμάρρου που διέρχεται από τα Λουτρά Τραϊανούπολης και εκβάλλει αυτόνομα στις δυτικές παρυφές του Δέλτα του ποταμού Έβρου. Η έκταση της επιφάνειας του ταμιευτήρα σε κανονική στάθμη λειτουργίας είναι 1 km², η έκταση της λεκάνης απορροής 10² km², ο όγκος του εκτιμάται σε 13,5 x 10⁶ m³, το μέγιστο βάθος νερού είναι 30 m και υπάρχει δυνατότητα επιλεκτικής καθ' ύψος υδροληψίας από τη στάθμη υπερχειλίσσης μέχρι σε βάθος 20m. Τα τυπικά φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του νερού δίνονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Τυπικά φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του νερού του υδροταμιευτήρα Διποτάμου.

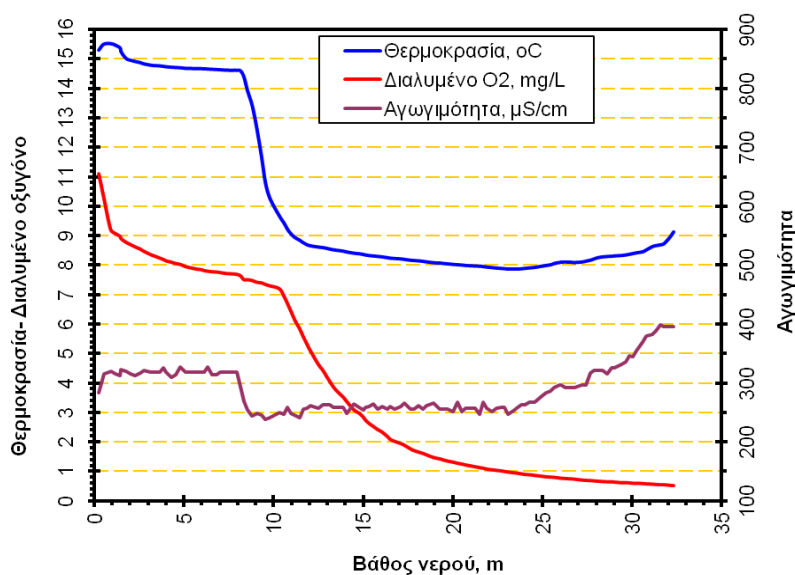
Φυσικοχημικοί Παράμετροι	Κατιόντα	mg/L	Ανιόντα	mg/L	Ιχνοστοιχεία, μg/L				
pH	7,6	Na ⁺	11	Cl ⁻	15	As	2	Hg	<0,02
Αγωγιμότητα, μS/cm	375	K ⁺	1,5	HCO ₃ ⁻	135	Ba	<50	Ni	<1
TDS, g/L	0,22	Ca ²⁺	40	SO ₄ ²⁻	26	Cd	<0.1	Pb	<1
Αιωρούμενα, mg/L	1,1	Mg ²⁺	9	NO ₃ ⁻	3	Co	<1	Sb	<2
TOC, mg/L	3,5	Str ²⁺	0,1	NO ₂ ⁻	<0,01	Cr(t)	<1	Se	<2
B, mg/L	0,3	SiO ₂	6	PO ₄ ³⁻	0,02	Cu	<20	Zn	10



Σχήμα 1. Θέση του υδροταμιευτήρα του Διποτάμου, διάτρητοι αγωγοί (A,B,C) και διαμόρφωση σημείων ελέγχου (1-5). Το σημείο ελέγχου 1 αντιστοιχεί στο σημείο υδροληψίας του νερού.

2.2 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΗΣ ΣΤΡΩΜΑΤΩΣΗΣ

Όπως προαναφέρθηκε ο υδροταμιευτήρας του Διποτάμου γέμισε με νερό στις αρχές του 2005 και η επίδραση της στρωμάτωσης στην ποιότητα του νερού έγινε αντιληπτή από την αρχή του καλοκαιριού. Κατά τη διάρκεια των ξηρών και θερμών θερινών μηνών, εξαιτίας της στρωμάτωσης, το νερό εμφάνισε οσμή και γεύση, υψηλές συγκεντρώσεις σιδήρου, μαγγανίου, υδροθείου και αμμωνίας, καθώς επίσης και οργανικών συστατικών που ευνοούν το σχηματισμό παραπροϊόντων απολύμανσης κατά τη χλωρίωση του νερού. Συγκεκριμένα, με βάση τις μετρήσεις θερμοκρασίας, αγωγιμότητας και διαλυμένου οξυγόνου που πραγματοποιήθηκαν (Σχήμα 2) προέκυψε ότι κατά τους θερινούς μήνες το επιλίμνιο καταλάμβανε τα πρώτα δέκα περίπου μέτρα από την επιφάνεια, το μεταλίμνιο ή θερμοκλινές τα επόμενα πέντε μέτρα και το υπολίμνιο εκτεινόταν από τα δεκαπέντε μέτρα ως τον πυθμένα του υδροταμιευτήρα.



Σχήμα 2. Θερμοκρασία, pH και συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου ως συνάρτηση του βάθους στο σημείο υδροληψίας (21-10-2005).

Επιπλέον, από τα δεδομένα του Πίνακα 2 γίνεται εμφανής η επίδραση που είχε η στρωμάτωση σε ορισμένες βασικές παραμέτρους ποιότητας του νερού. Ο υπερκορεσμός του διαλυμένου οξυγόνου και το φως στο επιφανειακό στρώμα νερού ευνόησαν τον πολλαπλασιασμό των μικροαλγών με αποτέλεσμα σημαντική παραγωγή γεωσμίνης. Καθώς μειωνόταν το διαλυμένο οξυγόνο στη στήλη του νερού μειωνόταν και η συγκέντρωση της γεωσμίνης και αυξανόταν η συγκέντρωση του σιδήρου, του μαγγανίου, του υδρόθειου και της αμμωνίας. Η υπάρχουσα εγκατάσταση επεξεργασίας νερού αδυνατούσε να αντιμετωπίσει το πρόβλημα καθώς πρόκειται για μια τυπική εγκατάσταση απομάκρυνσης αιωρούμενων σωματιδίων που περιλαμβάνει μέτρηση παροχής, εσχάρωση, κροκίδωση - συσσωμάτωση με χλωριούχο πολύ-αργίλιο, καθίζηση, φίλτρα άμμου και απολύμανση με υποχλωριώδες νάτριο.

Πίνακας 2. Συγκέντρωση κρίσιμων παραμέτρων νερού στο σημείο υδροληψίας (21-10-2005).

Παράμετρος	Βάθος στήλης νερού από την επιφάνεια		
	0 m	12 m	35 m
Fe ²⁺ , mg/L	<0,05	0,34	1,1
Mn ²⁺ , mg/L	0,075	0,62	3,9
NH ₄ ⁺ , mg/L	<0,05	0,2	1,15
HS ⁻ , mg/L	<0,1	0,2	0,5
Σωματίδια/mL	11x10 ³	7,8 x10 ³	10,5 x10 ³
MIB, µg/L	0,09	<0,005	<0,005
Γεωσμίνη, µg/L	0,08	<0,005	<0,005

3. ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ

Ο έλεγχος των επιπτώσεων στην ανθρώπινη υγεία από την επιβάρυνση του υδροταμιευτήρα με οσμή, γεύση και τοξίνες μπορεί να επιτευχθεί μέσα από μια σειρά στρατηγικών αντιμετώπισης του κινδύνου. Οι στρατηγικές αυτές αφορούν είτε την κατασκευή μιας κατάλληλης μονάδας επεξεργασίας νερού για την αντιμετώπιση όλων των παραπάνω προβλημάτων, είτε τον έλεγχο της ανάπτυξης των μικροαλγών. Μια ανάλυση κόστους - οφέλους έδειξε ότι ο περιορισμός της ανάπτυξης των μικροαλγών είναι πολύ καλύτερη μέθοδος από την τροποποίηση μιας εγκατάστασης επεξεργασίας του νερού.

Ο θειικός χαλκός και άλλα αλγοκτόνα χρησιμοποιούνται ευρέως για τον έλεγχο του πολλαπλασιασμού των αλγών. Ωστόσο, τα αλγοκτόνα πρέπει να εφαρμόζονται στα πρώτα στάδια ανάπτυξης των μικροαλγών, όταν ο αριθμός των κυττάρων των αλγών είναι μικρός, καθώς αυτά διαρρηγνύουν τα υγιή κύτταρα αλγών. Έτσι, αν η συγκέντρωσή τους είναι μεγάλη, με το θάνατό τους ελευθερώνονται τοξίνες και ενώσεις που προσδίδουν γεύση και οσμή, οι οποίες ρυπαίνουν στη συνέχεια όλο τον όγκο του νερού.

Μια πιο οικολογική προσέγγιση είναι η αποστρωμάτωση του νερού ή η επιλεκτική καθ' ύψος υδροληψία. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, το νερό που αντλήθηκε από το μεταλίμνιο, με εφαρμογή επιλεκτικής καθ' ύψος υδροληψίας κατά τη διάρκεια των ετών 2007 και 2008 ικανοποιούσε οριακά τις απαιτήσεις της νομοθεσίας για το πόσιμο νερό (EC, 98/83), αν και συχνά τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά του δεν ήταν αποδεκτά. Μετά τη μερική επιτυχία της επιλεκτικής καθ' ύψος υδροληψίας αποφασίσθηκε η αποστρωμάτωση με διάχυση αέρα για τη βελτίωση και σταθεροποίηση της ποιότητας του νερού στον υδροταμιευτήρα Διποτάμου.

Η τεχνητή αποστρωμάτωση αποτελεί αποτελεσματικό εργαλείο ελέγχου των προβλημάτων που σχετίζονται με την εποχιακή θερμοκρασιακή στρωμάτωση. Περιλαμβάνει τη διοχέτευση ενέργειας διαμέσου της διάχυσης αέρα στη μάζα του νερού, δημιουργώντας

με τον τρόπο αυτό ρεύματα κυκλοφορίας του νερού, τα οποία προκαλούν την πλήρη ανάμιξή του και επιτυγχάνουν τη διάχυση του οξυγόνου σε όλο τον όγκο του. Η επίτευξη ικανοποιητικής ανάμιξης κατά την αποστρωμάτωση είναι συνάρτηση της ισχύος που προσδίδεται και του βάθους του ταμιευτήρα. Τα συστήματα διάχυσης αέρα αποτελούν την πιο κοινή μέθοδο αποστρωμάτωσης γιατί παρουσιάζουν το χαμηλότερο πάγιο και λειτουργικό κόστος, καθώς επίσης και εξαιρετικά απλή λειτουργία. Τα συστήματα αυτά περιλαμβάνουν ένα συμπιεστή αέρα τοποθετημένο στη ξηρά, ο οποίος παρέχει αέρα σε ένα ή περισσότερους διάτρητους αγωγούς που τοποθετούνται πλησίον του πυθμένα, τυπικά στο πλέον βαθύ τμήμα του υδροταμιευτήρα (Lorenz and Fast, 1977, Miller and Macay, 2003).

4. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ ΑΠΟΣΤΡΩΜΑΤΩΣΗΣ

Για την αποστρωμάτωση του υδροταμιευτήρα του Διποτάμου επιλέχθηκε το σύστημα διάχυσης πεπιεσμένου αέρα μέσω διάτρητων αγωγών. Ο σχεδιασμός του συστήματος βασίστηκε στο μοντέλο του J. M. Davis (Davis, 1980), με εφαρμογή των τιμών του Πίνακα 3 για τις κρίσιμες παραμέτρους σχεδιασμού. Δεδομένου ότι ο όγκος του νερού που αντλείται μηνιαίως δε ξεπερνά τα $0,6 \times 10^6 \text{ m}^3$ και λαμβάνοντας υπόψη το μαιανδρικό σχήμα του υδροταμιευτήρα (Σχήμα 2) αποφασίστηκε η αποστρωμάτωση να περιλαμβάνει όγκο νερού ισοδύναμο της εξαμηνιαίας κατανάλωσης, ο οποίος περιλαμβάνεται σε μια απόσταση 250 m γύρω από το σημείο υδροληψίας. Θεωρώντας επίσης ότι η διεργασία της αποστρωμάτωσης ξεκινά συνήθως στα τέλη της άνοιξης, η θεωρητικά απαιτούμενη ενέργεια για την αποστρωμάτωση, η παροχή του αέρα και κατά συνέπεια το μήκος και το μέγεθος των διάτρητων αγωγών υπολογίστηκαν για θερμοκρασία μεταξύ 18 και 22 °C για το epilimnio και 5-20 °C για το υπολίμνιο αντίστοιχα.

Πίνακας 3. Τιμές των κρίσιμων παραμέτρων σχεδιασμού της διεργασίας αποστρωμάτωσης.

Παράμετρος	Τιμή
Έκταση επιφάνειας	$2 \times 10^4 \text{ m}^2$
Βάθος διάχυσης αέρα	28 m
Συνολικός όγκος νερού	$3,210^6 \text{ m}^3$
Όγκος νερού epilimnio	$1,1 \times 10^6 \text{ m}^3$
Όγκος νερού μεταλίμνιου	$0,9 \times 10^6 \text{ m}^3$
Όγκος νερού υπολίμνιου	$1,55 \times 10^6 \text{ m}^3$
Εύρος θερμοκρασίας πυθμένα - επιφάνειας	4 °C

4.1 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Ο σχεδιασμός του συστήματος βασίζεται στον υπολογισμό της ολικής θεωρητικά ενέργειας (E) που απαιτείται για την αποστρωμάτωση του υδροταμιευτήρα. Αρχικά, υπολογίστηκαν η δυναμική ενέργεια του στρωματωμένου συστήματος (PES) και η δυναμική ενέργεια του ομογενοποιημένου συστήματος (PEM) από τις εξισώσεις (4.1) και (4.2) αντίστοιχα με εφαρμογή των τιμών των κρίσιμων παραμέτρων του Πίνακα 3.

$$PES = g \sum \rho_{is} V_i h_i \text{ (joules)} \quad (4.1)$$

$$PEM = g \sum \rho_{im} V_i h_i \text{ (joules)} \quad (4.2)$$

όπου ρ_{is} και ρ_{im} οι πυκνότητες του νερού κάθε στρώματος (kg/m^3), V_i ο όγκος κάθε στρώματος (m^3), h_i το ύψος του κέντρου μάζας κάθε στρώματος πάνω από τον πυθμένα

του υδροταμιευτήρα (m) και g η επιτάχυνση της βαρύτητας (9.81 m/s^2). Ο συντελεστής σταθερότητας (S) υπολογίζεται από την εξίσωση (4.3):

$$S = PEM - PES \text{ (joules)} \quad (4.3)$$

Στη συνέχεια, υπολογίζεται η ολική θεωρητική ενέργεια (E) που απαιτείται για την αποστρωμάτωση από την εξίσωση (4.4):

$$E = S + R - W \quad (4.4)$$

όπου R η θερμική ενέργεια που προστίθεται στη στήλη νερού ως αποτέλεσμα της ηλιακής ακτινοβολίας (περίπου 5 J/m^2 ανά ημέρα για την επίτευξη αποστρωμάτωσης) και W η κινητική ενέργεια που σχετίζεται με την ανάμιξη που προκαλεί ο άνεμος και λαμβάνεται συνήθως ίση με μηδέν (συντηρητική προσέγγιση).

Η απαιτούμενη παροχή αέρα του συμπιεστή (Q) σε L/s υπολογίστηκε από την εξίσωση (4.5):

$$Q = \frac{0.196E}{T \ln \left(1 + \frac{D}{10.4} \right)} \quad (4.5)$$

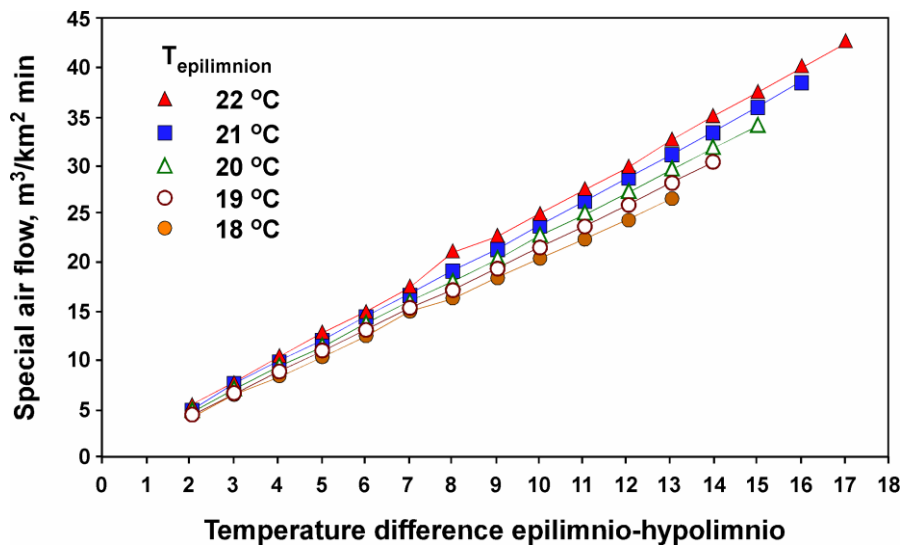
όπου T ο χρόνος που απαιτείται για αποστρωμάτωση (s) και D το βάθος στο οποίο θα βρίσκεται ο διάτρητος αγωγός (m). Τέλος, γνωρίζοντας τον όγκο του προς αποστρωμάτωση νερού (V, m^3) και την απαιτούμενη παροχή αέρα (L/s), υπολογίστηκε το μήκος (m) του διάτρητου αγωγού από την εξίσωση (6).

$$L = 3.73 \left[\frac{V^3 \left(1 + \frac{D}{10.4} \right)}{T^3 Q \left(\ln \left(1 + \frac{D}{10.4} \right) \right)^3} \right]^{1/2} \quad (4.6)$$

Στον Πίνακα 4 δίνονται τα αποτελέσματα που υπολογιστήκαν από την παραπάνω διαδικασία για θερμοκρασία επιλίμνιου του υδροταμιευτήρα του Διποτάμου 22°C . Είναι φανερό - και αυταπόδεικτο - ότι όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά θερμοκρασίας επιλίμνιου - υπολίμνιου τόσο περισσότερη ενέργεια απαιτείται για την αποστρωμάτωση και κατά συνέπεια τόσο μεγαλύτερη είναι η απαιτούμενη παροχή αέρα του συμπιεστή. Η ειδική παροχή αέρα για αποστρωμάτωση συνδέεται γραμμικά με τη διαφορά θερμοκρασίας επιλίμνιου - υπολίμνιου (Σχήμα 3). Επίσης, για συγκεκριμένη διαφορά, όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία επιλίμνιου τόσο μεγαλύτερη είναι η απαιτούμενη παροχή αέρα για αποστρωμάτωση, αν και αυτή η παράμετρος δεν κρίθηκε σημαντική, ειδικά για τη θερμοκρασιακή διαφορά - στόχο των 4°C . Όπως προκύπτει από το Σχήμα 3, για να αναμιχθεί πλήρως το επιλεγμένο τμήμα του ταμιευτήρα απαιτείται ειδική παροχή αέρα περίπου $40 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{min}$, στο δυσμενέστερο σενάριο, όταν δηλαδή η διαφορά θερμοκρασίας επιλίμνιου - υπολίμνιου είναι 17°C . Αντίθετα, απαιτούνται μόνο $5 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{min}$ όταν η διαφορά θερμοκρασίας είναι στη συνθήκη ισορροπίας των 2°C . Υπογραμμίζεται επίσης ότι για διαφορά θερμοκρασίας 4°C , η απαιτούμενη ειδική παροχή αέρα υπολογίστηκε στα $9,9 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{min}$ (Πίνακας 4), κοντά στο κριτήριο $9,2 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{min}$ των Lorenz και Fast (1977).

Πίνακας 4. Τιμές κρίσιμων παραμέτρων αποστρωμάτωσης για θερμοκρασία επιλίμνιου 22 °C.

Θερμοκρασία Υπολίμνιου °C	Ενέργεια (E) MJ	Παροχή αέρα (Q) L/s	Μήκος αγωγού (L) m	Ειδική παροχή αέρα m ³ /km ² min
5	437	138,8	7,6	42,8
6	410	130,4	7,9	40,2
7	384	122,0	8,1	37,6
8	358	113,7	8,4	35,1
9	332	105,4	8,8	32,5
10	306	97,2	9,1	30,0
11	281	89,1	9,5	27,5
12	256	81,2	10,0	25,0
13	230	73,1	10,5	22,5
14	216	68,6	10,8	21,2
15	180	57,2	11,9	17,6
16	155	49,1	12,8	15,1
17	130	41,1	13,9	12,8
18	105	33,3	15,5	9,9
19	80	25,4	17,8	7,8
20	55	17,5	21,5	5,4

**Σχήμα 3.** Ειδική παροχή αέρα απαιτούμενη για την αποστρωμάτωση του ταμιευτήρα του Διπόταμου ως συνάρτηση της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ επιλίμνιου-υπολίμνιου για διάφορες θερμοκρασίες επιλίμνιου.

Επομένως, η απαιτούμενη παροχή αέρα για την αποστρωμάτωση του υδροταμιευτήρα, με διατήρηση της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ επιλίμνιου υπολίμνιου στους 4 °C, υπολογίστηκε:

$$Q = 9,9 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{min} \times 0,2 \text{ km}^2 = 1,98 \text{ m}^3/\text{min} \text{ ίση με } 33 \text{ L/s} \quad (4.7)$$

Έτσι, επιλέχθηκε η εγκατάσταση ενός αεροσυμπιεστή παροχής από 20 έως 50 L/s, με ισχύ 15 kW, ο οποίος επιτυγχάνει ειδική παροχή αέρα μεταξύ 6 και 15 m³/km²/min. Ο πεπιεσμένος αέρας ψύχεται σε θερμοκρασία κάτω των 40 °C ως προληπτικό μέτρο ασφάλειας για τους διάτρητους αγωγούς πολυαιθυλενίου (PE). Το σύστημα απομάκρυνσης

ελαίου περιλαμβάνει ένα προ-φίλτρο για τη συγκράτηση σωματιδίων μεγαλύτερων από 0,01 mm και ένα φίλτρο ενεργού άνθρακα για την πλήρη συγκράτηση των ελαίων.

Σημαντικό μειονέκτημα του μοντέλου είναι ο υπολογισμός του μήκους του αγωγού διάχυσης του αέρα (Πίνακας 4). Η πρόταση για εγκατάσταση αγωγού μήκους 10 έως 20 μέτρα για την ανάδευση ενός υδροταμιευτήρα επιφάνειας 0,2 km² σε μαιανδρικό σχήμα και μήκους μεγαλύτερου από 500 m είναι από μηχανικής άποψη προφανώς λανθασμένη. Έτσι, εφαρμόστηκαν τα κριτήρια Davis (1980) για πτώση πίεσης περίπου 1 m στήλης νερού (mwc) για κάθε 100 m αγωγού και τοποθέτηση των οπών ανά 0,1 m x (m βάθους) από την επιφάνεια διάχυσης του αέρα. Έτσι, τοποθετήθηκαν τρεις (3) διάτρητοι αγωγοί συνολικού μήκους 800 m, με οπές διαμέτρου 1mm τοποθετημένες σε απόσταση 1m (Σχήμα 2). Επιλέχθηκαν αγωγοί πολυαιθυλενίου τόσο εξαιτίας του χαμηλού κόστους, όσο και επειδή είναι απόλυτα ανθεκτικοί στη διάβρωση.



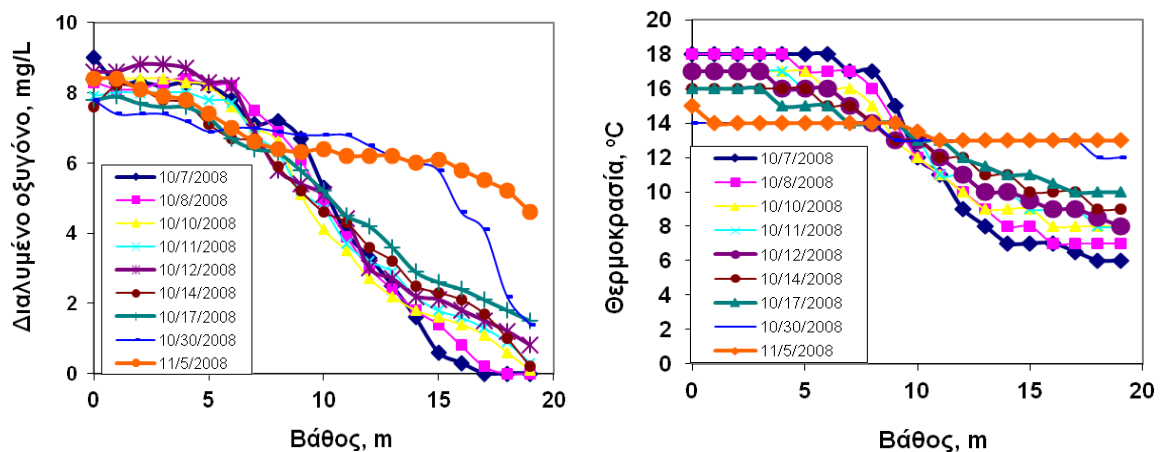
Σχήμα 4. Ίχθος ανάδευσης εξαιτίας της διάχυσης αέρα από τους αγωγούς Β και C.

Για τους αγωγούς Α και Β επιλέχθηκε αγωγός διαμέτρου Φ50 mm (10 atm) μέγιστης παροχής $Q_{\max} = 20$ L/s, ενώ για τον C επιλέχθηκε αγωγός διαμέτρου Φ40 mm μέγιστης παροχής $Q_{\max} = 10$ L/s. Μετρήσεις πεδίου έδειξαν ότι η πτώση πίεσης υπό μέγιστη παροχή σε όλους τους αγωγούς δεν υπερέβαινε τα 5 mwc, επαληθεύοντας την ακρίβεια των θεωρητικών υπολογισμών. Τέλος, θα πρέπει να τονιστεί ότι για τη συγκράτηση των αγωγών διάχυσης του αέρα προτιμήθηκε η λύση της πόντισης κύβων από τσιμέντο, που συνδέονται μεταξύ τους με ισχυρά τεντωμένο ανοξειδωτο συρματόσχοινο πάχους 8 mm.

4.2 ΕΚΚΙΝΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΑΠΟΣΤΡΩΜΑΤΩΣΗΣ

Η εγκατάσταση διάχυσης του αέρα τέθηκε σε λειτουργία στις 7 Οκτωβρίου 2008, όταν οι τιμές των κρίσιμων παραμέτρων ποιότητας ήταν κοντά σε αυτές του Πίνακα 4, με την οσμή της γεωσμίνης κοντά στον ταμιευτήρα να είναι εξαιρετικά δυσάρεστη. Η διεργασία διάχυσης αέρα με ειδική παροχή αέρα 15 m³/km²/min, έφτασε στο σημείο ισορροπίας σε περίπου 1 ώρα από την εκκίνηση του συμπιεστή. Στο Σχήμα 4 φαίνεται η ήπια επιφανειακή ανακίνηση του νερού εξαιτίας της διάχυσης του αέρα από τους αγωγούς Β και C. Η οσμή της γεωσμίνης μειώθηκε βαθμιαία και περίπου μια βδομάδα αργότερα το

νερό δεν παρουσίαζε ανιχνεύσιμα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά. Η μεταβολή της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου ήταν αρκετά ενδιαφέρουσα. Η σχεδόν μηδενική συγκέντρωση στο σημείο υδροληψίας του νερού σε μέγιστο βάθος (20 m) αυξήθηκε σταδιακά σε 1,2, 1,8 και 4,8 mg/L κατά την πρώτη, δεύτερη και τέταρτη βδομάδα αντίστοιχα (Σχήμα 5). Αντίθετα, η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου στην επιφάνεια μειώθηκε από $8,3\pm 0,2$ mg/L ($18\text{ }^{\circ}\text{C}$) σε $7,7\pm 0,2$ mg/L ($14\text{ }^{\circ}\text{C}$), διαφορά που αναδεικνύεται καλύτερα με μετασχηματισμό των συγκεντρώσεων ως ποσοστό της στάθμης κορεσμού καθώς το οξυγόνο μειώθηκε από $89\pm 3\%$ (στους $18\text{ }^{\circ}\text{C}$) σε $76\pm 3\%$ (στους $14\text{ }^{\circ}\text{C}$). Αυτό σημαίνει ότι ο ρυθμός διάχυσης του οξυγόνου στο επιφανειακό νερό, μαζί με το οξυγόνο που παρέχει η διάχυση του αέρα, ήταν μικρότερος από το ρυθμό κατανάλωσης του οξυγόνου στις διάφορες χημικές και βιοχημικές δραστηριότητες οξείδωσης του Fe^{2+} , του Mn^{2+} , του NH_4^+ , του HS^- και της οργανικής ύλης σε όλο τον όγκο του νερού. Εν τούτοις, στο τέλος της δεύτερης εβδομάδας η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ επιλίμνιου και υπολίμνιου ήταν περίπου $4\text{ }^{\circ}\text{C}$, ενώ στο τέλος της τέταρτης εβδομάδας η θερμοκρασία του νερού έφτασε σε ισορροπία χωρίς στρωμάτωση, όπως φαίνεται και από το Σχήμα 5 (δεξιά). Παρόμοια αποτελέσματα παρατηρήθηκαν σε όλα τα σημεία ελέγχου, ακόμα και στο σημείο 5, το οποίο απέχει 300 m από το πέρας του αγωγού διάχυσης του αέρα του κλάδου Α. Από τα αποτελέσματα αυτά συνάγεται το συμπέρασμα ότι ο όγκος ανάμιξης ξεπέρασε τα $5 \times 10^6 \text{ m}^3$ και αποτελεσματική αποστρωμάτωση επιτεύχθηκε με κατανάλωση ενέργειας περίπου $55 \text{ Wh}/10^3 \text{ m}^3/\text{d}$.



Σχήμα 5. Μεταβολή του διαλυμένου οξυγόνου (αριστερά) και της θερμοκρασίας (δεξιά) στο σημείο υδροληψίας εξαιτίας της διεργασίας διάχυσης αέρα.

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΡΙΕΤΟΥΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ (2009-2011)

Η διάχυση του αέρα ξεκινούσε τις πρώτες μέρες του Μαΐου κάθε χρόνου, με τη διαπίστωση διαφοράς θερμοκρασίας $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ μεταξύ επιλίμνιου και υπολίμνιου και σταματούσε στις αρχές Νοεμβρίου. Η θερμοκρασιακή διαφορά μειωνόταν σε λιγότερο από $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ μέσα σε δύο βδομάδες και παρέμενε σχεδόν σταθερή όλο το καλοκαίρι και το φθινόπωρο. Όλες οι παράμετροι ποιότητας του νερού παρέμεναν οι ίδιες σε όλο τον όγκο του νερού και οι παράμετροι που επηρεάζονται από τη στρωμάτωση, όπως είναι η συγκέντρωση σε Fe^{2+} , Mn^{2+} , NH_4^+ , HS^- , η οσμή και η γεύση ικανοποιούσαν τα αντίστοιχα όρια για το πόσιμο νερό (EC directive 98/83). Πιο συγκεκριμένα, η συγκέντρωση σε Fe^{2+} , Mn^{2+} , NH_4^+ και HS^- ήταν πάντα κάτω από το όριο ανίχνευσης της μεθόδου, το οποίο προσδιορίστηκε ίσο με 0,05, 0,02, 0,05 και 0,05 mg/L, αντίστοιχα, καθώς επίσης και τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά του νερού ήταν αποδεκτά. Η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου κυμαινόταν στο $\pm 20\%$ της

στάθμης κορεσμού, με αποτέλεσμα τη σημαντικά αυξημένη συγκέντρωση ψαριών, γεγονός που επιβεβαιώνει την καθαρότητα του νερού του υδροταμιευτήρα. Όλες οι άλλες παράμετροι ποιότητας ήταν κοντά στις τιμές του Πίνακα 1. Πρέπει να τονιστεί επίσης ότι το νερό πληρούσε τα όρια ποσιμότητας για φυτοφάρμακα, πολυκυκλικούς αρωματικούς υδρογονάνθρακες, πολυχλωριωμένα διφαινύλια και ζιζανιοκτόνα, γεγονός που αποδίδεται στην ασφαλή περιβαλλοντικά περιοχή της λεκάνης απορροής. Η μικροβιολογική ποιότητα του νερού στην είσοδο της εγκατάστασης επεξεργασίας ήταν αρκετά καλή και σταθερή με τα ολικά κολοβακτηρίδια ανά 100 mL και τα ολικά κύτταρα ανά mL στους 22°C να μην υπερβαίνουν τα 10 και 100, αντίστοιχα. Ωστόσο, υψηλές βροχοπτώσεις στην περιοχή της λεκάνης απορροής υποβάθμιζαν για λίγες μέρες τα μικροβιολογικά χαρακτηριστικά και αύξαναν τη θολότητα του νερού στον υδροταμιευτήρα, χωρίς όμως να επηρεάζουν την ποιότητα του επεξεργασμένου νερού.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Μετρήσεις θερμοκρασίας, αγωγιμότητας και διαλυμένου οξυγόνου επιβεβαίωσαν τη θερμοκρασιακή στρωμάτωση του νερού στον υδροταμιευτήρα Διποτάμιου αμέσως μετά την πλήρωσή του στις αρχές του 2005. Κατά τους θερινούς μήνες το επιλίμνιο καταλάμβανε τα πρώτα δέκα περίπου μέτρα από την επιφάνεια, το μεταλίμνιο ή θερμοκλινές τα επόμενα πέντε μέτρα και το υπολίμνιο εκτεινόταν από τα δεκαπέντε μέτρα ως τον πυθμένα του υδροταμιευτήρα. Το φως και η υψηλή θερμοκρασία του επιλίμνιο βοήθησαν στην επικράτηση μικροαλγών που παράγουν γεωσμίνη και ΜΙΒ με αποτέλεσμα την εξαιρετικά σημαντική υποβάθμιση της ποιότητας του νερού. Η απουσία φωτός, η χαμηλή θερμοκρασία και οι ανοξικές συνθήκες του υπολίμνιο βοήθησαν στην επικράτηση αναερόβιων μικροοργανισμών που ευνοούν τη διαλυτοποίηση του Fe^{2+} , του Mn^{2+} , του NH_4^+ και του H_2S , καθιστώντας το νερό μη πόσιμο. Η επιλογή επιλεκτικής καθ' ύψος υδροληψίας – κυρίως από το μεταλίμνιο – κατά το χρονικό διάστημα 2007 – 2008 βοήθησε στη λήψη νερού που πληρούσε οριακά τις απαιτήσεις ποσιμότητας με σημαντικές όμως αστοχίες για αρκετά χρονικά διαστήματα. Ο σχεδιασμός στη συνέχεια και η εγκατάσταση ενός συστήματος τεχνητής αποστρωμάτωσης του ταμιευτήρα με διάχυση αέρα βοήθησε στην οριστική αντιμετώπιση του προβλήματος. Κατά τα έτη 2009, 2010 και 2011 η εγκατάσταση λειτουργούσε από τις αρχές Μαΐου έως το τέλος Οκτωβρίου. Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων έγινε φανερό ότι ο υδροταμιευτήρας φτάνει σε κατάσταση ισορροπίας σε 3 έως 4 εβδομάδες από την έναρξη λειτουργίας και παραμένει σε ομοιογένεια καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος αποστρωμάτωσης με τη διαφορά θερμοκρασίας επιλίμνιο – υπολίμνιο να μην υπερβαίνει τους 4 °C. Έτσι, όλες οι παράμετροι ποιότητας του νερού παρέμεναν οι ίδιες σε όλο τον όγκο του νερού και οι παράμετροι που επηρεάζονται από τη στρωμάτωση, όπως είναι η συγκέντρωση σε Fe^{2+} , Mn^{2+} , NH_4^+ , HS^- , η οσμή και η γεύση ικανοποιούσαν τα όρια ποσιμότητας. Τέλος, με εξαίρεση κάποιες ελάχιστες μέρες που συνοδευόταν από έντονη βροχόπτωση στη λεκάνη απορροής, η μικροβιολογική ποιότητα του νερού ήταν εξαιρετική, ενώ δεν ανιχνεύθηκαν επιπλέον οργανικοί ρυπαντές ανθρωπογενούς προέλευσης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Albanakis, K., Mitrakas, M., Moustaka-Gouni, M. and Psilovikos A., *Determination of the environmental parameters that influence sulfide formation in the newly formed Thesaurus reservoir, in Nestos river, Greece*. Fresenius Envir. Bul., 10: 566-571.
- Bell, S.G. and Codd, G.A., 1994. *Cyanobacterial toxins and human health*. Reviews in Medical Microbiology, 5: 256–264.

- Castaing, J.B., Masse, A., Sechet, V., Sabiri, N.-E., Pontie, M., Haure, J. and Jaouen, P., 2010. *Immersed hollow fibres microfiltration (MF) for removing undesirable microalgae and protecting semi-closed aquaculture basins*. *Desalination*, 276: 386-396
- Chorus, I. and Bartram, J., 1999. *Toxic cyanobacteria in water: A guide to their public health consequences, monitoring and management*. E & FN Spon.
- Davis, J. M., 1980. *Destratification of reservoirs – a design approach for perforated-pipe compressed-air systems*. *Water Services*, 84: 497 -504.
- Donati, C., Drikas, M., Hayes, R. and Newcombe, G., 1994. *Microcystin –LR adsorption by powder activated carbon*. *Water Res.*, 28: 1735-1742.
- Drikas M., Chow, C.W.K.; House, J. and Burch, M.D. 2001. *Using coagulation, flocculation and settling to remove toxic cyanobacteria*. *J. AWWA*, 93: 100-111.
- European Council Directive 83/03-11-1998, *Relating to the quality of water intended for human consumption*.
- Gilroy, D.J., Kauffman, K.W., Hall, R.A., Huang, X. and Chu, F.S., 2000. *Assessing potential health risks from microcystin toxins in blue-green algae dietary supplements*. *Environmental Health Perspectives*, 108: 435-439.
- Hanson, M.J. and Stefan H.G., 1984. *Side effects of 58 years of cooper sulfate treatment of the Fairmont lakes, Minnesota*. *American Waters Resources Association*, 20:889-900.
- Hawkins, P.R. and Griffiths, D. J., 1993. *Artificial destratification of a small tropical reservoir: Effects upon the phytoplankton*. *Hydrobiologia*, 254: 169-181.
- Karner, D.A., Standridge, J.H., Harrington, G.W. and Barnum, R.P., 2001. *Microcystin algal toxins in source and finished drinking water*. *J. AWWA* 93: 72-81.
- Lorenz, M. W. and Fast, A. W., 1977. *A guide to aeration / circulation techniques for lake management*. *Ecol. Res. Ser. USEPA-600/3-77-004*, pp. 125.
- Miller, T.G. and Macay, W.C., 2003. *Optimizing artificial aeration for lake winter kill prevention*. *Lake and Reservoir Management*, 19: 355-363.
- Moustaka – Gouni, M., Albanakis, K., Mitrakas M. and Psilovikos, A., 2000. *Planktic autotrophs and environmental conditions in the newly – formed Thesaurus reservoir in Nestos river, Greece*. *Archiv fur Hydrobiologie*, 149: 507-526.
- Pastorak, R.A., Lorenz, M.W. and Ginn, T.C., 1982. *Environmental aspects of artificial aeration and oxygenation of reservoirs: A review of theory, techniques and experiences*. Technical Report No E-82-3. U.S Army Corps of Engineers.
- Prepas, E.E. and Murphy, T.P., 1988. *Sediment-water interactions in farm dugouts previously treated with copper sulfate*. *Lake Reservoir Management*, 4: 161-168.
- Rositano, J., Nocholson, B.C. and Pieronne, P., 1998. *Destruction of cyanobacterial toxins by ozone*, *Ozone Sci. Eng.*, 20: 223-238.
- Westric, J., 2002. *Everything a manager should know about algal toxins but was afraid to ask*. *J. AWWA*, 95: 26-34.
- Westrick, J.A., Szlag, D.C., Southwell, B.J. and Sinclair, J., 2010. *A review of cyanobacteria and cyanotoxins removal/inactivation in drinking water treatment*. Springer-Verlag, 97: 1705–1714.
- Wu, X., Joyce, E.M., Mason T.J., 2011. *The effects of ultrasound on cyanobacteria*. *Harmful Algae*, 10: 738-743
- Yoo, R.S., Carmichael, W.W., Hoehn, R.C. and Hrudey, S.E., 1995. *Cyanobacterial (blue-green algal) toxins: A resource guide*. American Water Works Association Research Foundation, Denver, pp. 229.

**ΑΠΟΛΗΨΗ ΠΟΣΙΜΟΥ ΝΕΡΟΥ ΑΠΟ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΕΣ ΠΗΓΕΣ:
ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΣΤΗ ΣΤΟΥΠΑ ΜΕΣΣΗΝΙΑΣ
Η. Γ. Παπακωνσταντής¹, Π. Ν. Παπανικολάου¹, Ε. Γ. Καστρινάκης²**

¹Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο,
Ηρώων Πολυτεχνείου 5, Ζωγράφου 15780, Αθήνα

²Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης,
54124, Θεσσαλονίκη

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται αποτελέσματα πειραματικής διερεύνησης της δυνατότητας συλλογής νερού υποθαλάσσιων πηγών με τη μικρότερη δυνατή ανάμιξη με το θαλάσσιο νερό. Το θαλάσσιο περιβάλλον προσομοιώθηκε με δεξαμενή γεμάτη με αλατόνερο, ενώ η υποθαλάσσια πηγή με κατακόρυφη κυκλική φλέβα χρωματισμένου νερού. Πάνω από τη φλέβα τοποθετήθηκε ανεστραμμένο κυλινδρικό δοχείο του οποίου το ανώτερο τμήμα ήταν κωνικό. Το νερό της φλέβας, το οποίο συγκεντρωνόταν στο δοχείο πάνω από το αλατόνερο, λαμβανόταν από την κορυφή του δοχείου και η συγκέντρωσή του μετριοταν με βαθμονομημένο αγωγιμόμετρο. Για διάφορους πυκνομετρικούς αριθμούς Froude μελετήθηκε η μεταβολή της συγκέντρωσης του νερού συναρτήσει της παροχής απόληψης για διάφορες αποστάσεις της διεπιφάνειας νερού και αλατόνερου από την εκροή. Με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα εξετάζονται οι δυνατότητες εκμετάλλευσης των υποθαλάσσιων αναβλύσεων στη Στούπα Μεσσηνίας.

**CAPTURE OF FRESH WATER FROM SUBMARINE SPRINGS:
CASE STUDY IN STOUPA OF MESSINIA
I. G. Papakonstantis¹, P. N. Papanicolaou¹, E. G. Kastrinakis²**

¹School of Civil Engineering, National Technical University of Athens,
5 Heroon Polytechniou, Zografou 15780, Athens, Greece

²Department of Chemical Engineering, Aristotle University of Thessaloniki,
54124, Thessaloniki, Greece

ABSTRACT

Experimental results are presented regarding the possibility of capturing fresh water from submarine springs with minimum mixing between fresh and sea water. Sea ambient was simulated as a tank filled with saltwater and spring as a vertical jet of colored tap water. An inverted cylindrical container with conical upper part was placed above the jet. The jet water, which was collected in the container above the saltwater, was being received from the top of the container and its salt concentration was measured by means of a calibrated conductivity probe. The variation of the water concentration was studied as a function of capturing flow rate for various densimetric Froude numbers and for different distances of the interface between jet water and saltwater from the outlet. Based on the experimental results the exploitation of the submarine springs in Stoupa of Messinia is discussed.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εκμετάλλευση υποθαλάσσιων πηγών πόσιμου νερού είναι ιδιαίτερα σημαντική σε παράκτιες περιοχές με περιορισμένους υδατικούς πόρους. Τέτοιες πηγές δημιουργούνται συνήθως όταν παράκτιοι καρστικοί υδροφορείς συνδέονται με τη θάλασσα. Οι καρστικοί υδροφορείς σχηματίζονται σε ανθρακούχα πετρώματα (π.χ. ασβεστολιθικά) και είναι συστήματα με υπόγεια ροή νερού που μοιάζει με τη ροή πολύπλοκου συστήματος αγωγών. Η εκμετάλλευση τέτοιων υδατικών πόρων είναι συχνά δύσκολη, αφού η ύπαρξη καρστικών ανοιγμάτων επιτρέπει σε αρκετές περιπτώσεις τη διείσδυση θαλάσσιου νερού μετατρέποντας το νερό σε υφάλμυρο. Πολλές υποθαλάσσιες πηγές παραμένουν ανεκμετάλλευτες.

Οι μελέτες υποθαλάσσιων πηγών από καρστικούς υδροφορείς αφορούν κυρίως σημειακές εκτιμήσεις της παροχής, ενώ μικρότερη προσοχή έχει δοθεί στη διερεύνηση της λειτουργίας των υδροφόρων συστημάτων και στην αλληλεπίδρασή τους με το θαλάσσιο περιβάλλον. Μελέτη σχετικά με τους μηχανισμούς που διέπουν τη ροή σε καρστικούς υδροφορείς παρουσιάστηκε από τους Fleury *et al.* (2007). Αρκετά στοιχεία από την εργασία των Fleury *et al.* (2007) συνοψίζονται παρακάτω. Η εργασία περιλαμβάνει παραδείγματα καρστικών υδροφορέων που παρουσιάζουν πηγές πάνω ή κάτω από τη στάθμη της θάλασσας, πολλά από τα οποία προέρχονται από τον Ελληνικό χώρο. Πηγές καρστικών συστημάτων πάνω από τη στάθμη της θάλασσας υπάρχουν στην Κεφαλονιά, στον Αλμυρό Αγίου Νικολάου Κρήτης και στον Αλμυρό Ηρακλείου Κρήτης. Η παρουσία αλμυρού ή υφάλμυρου νερού στην εκροή καρστικών συστημάτων πάνω από τη στάθμη της θάλασσας οφείλεται στη διείσδυση θαλάσσιου νερού στην εκροή ή σε κάποιο άλλο άνοιγμα του καρστικού συστήματος προς τη θάλασσα.

Υποθαλάσσιες καρστικές πηγές υπάρχουν πολλές στο διεθνή αλλά και στον Ελληνικό χώρο. Αρκετές εργασίες έχουν πραγματοποιηθεί για τον Ανάβαλο στο Κιβέρι Αργολίδας, όπου υπάρχουν τέσσερις κύριες παράκτιες και υποθαλάσσιες πηγές σε βάθος μέχρι 7m και σε απόσταση μερικών δεκάδων μέτρων από την ακτή. Η αλατότητα είναι γενικά μικρή, μικρότερη από 0.3 g/l στην παράκτια πηγή και 0.3 g/l ως 2.5 g/l (π.χ. Pulido Bosch, 1999, Milanovic, 2000) στις υποθαλάσσιες πηγές. Η μέση συνολική παροχή είναι μεγαλύτερη από 10 m³/sec. Το «γλυκό» νερό αντλείται σε ειδικά κατασκευασμένο φράγμα. Στο διεθνή χώρο ενδιαφέρον παρουσιάζει η υποθαλάσσια πηγή Port-Miou, νοτιοανατολικά της Μασσαλίας. Η πηγή εκρέει 12m κάτω από τη στάθμη της θάλασσας και η παροχή κυμαίνεται από 1 m³/sec ως 10 m³/sec. Το σύστημα παρουσιάζει ανοίγματα προς τη θάλασσα οπότε για να εμποδιστεί η δημιουργία αλάτινης σφήνας ακολουθήθηκε η τακτική της κατασκευής φραγμάτων. Πάντως μέχρι σήμερα δεν έχει αποφευχθεί η ανάμιξη με το θαλάσσιο νερό. Σύμφωνα με τους Fleury *et al.* (2007) το βάθος των υποθαλάσσιων πηγών φτάνει μέχρι 150m. Το νερό των πηγών μπορεί να είναι πόσιμο (π.χ. Κιβέρι) ή υφάλμυρο (π.χ. Port Miou). Στη δεύτερη περίπτωση η αλατότητα εξαρτάται από τη βροχόπτωση και τον υπόγειο υδροφόρο. Κάποιες πηγές παρουσιάζουν εποχική λειτουργία, ενώ το υπόλοιπο διάστημα απορροφούν θαλάσσιο νερό. Η εκμετάλλευση υποθαλάσσιων πηγών απαιτεί την οριοθέτησή τους και την κατανόηση της λειτουργίας τους, οπότε χρειάζεται αξιόπιστη υδρογεωλογική μελέτη (Fleury *et al.*, 2007).

Οι Fleury *et al.* (2007) κατατάσσουν τους καρστικούς υδροφορείς (α) σε συστήματα με ελάχιστη καρστικοποίηση, (β) σε καρστικοποιημένα συστήματα κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας, με επικοινωνία προς αυτήν και (γ) σε καρστικοποιημένα συστήματα κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας με μερική ή χωρίς σύνδεση με τη θάλασσα (π.χ. Κιβέρι). Απ' ευθείας άντληση νερού μπορεί να γίνει μόνο σε περιπτώσεις που εμπίπτουν στην πρώτη και τρίτη κατηγορία. Οι υδροφορείς της πρώτης κατηγορίας παρουσιάζουν συνήθως μικρές παροχές, ενώ τα

συστήματα της δεύτερης κατηγορίας απαιτούν απομόνωση του νερού από τη θάλασσα (π.χ. κατασκευή περίφραξης ώστε να εμποδιστεί η είσοδος θαλάσσιου νερού στο σύστημα). Μέχρι τώρα δεν είναι γνωστή κάποια απολύτως επιτυχημένη εφαρμογή. Οι υδροφορείς της τρίτης κατηγορίας είναι πιο αξιόπιστα συστήματα για την άντληση νερού, αφού συνήθως έχουν μεγάλες παροχές και πόσιμο νερό. Για την αποφυγή διείσδυσης θαλάσσιου νερού στην εκροή μπορεί να χρειαστεί η κατασκευή φράγματος (π.χ. Κιβέρι).

Οι Bakalowicz *et al.* (2003) παρουσίασαν διερεύνηση που περιλαμβάνει δύο κατευθύνσεις, η μία αφορά στη συλλογή δεδομένων όπως η αλατότητα, η θερμοκρασία και η παροχή του γλυκού νερού μιας υποθαλάσσιας πηγής καρστικού συστήματος και η άλλη αφορά στα έργα για την απόληψη του νερού. Διάταξη απόληξης γλυκού νερού από υποθαλάσσια πηγή κατασκευάστηκε από τη Γαλλική εταιρία Nymphaea Water-Geoccean Group (<http://www.nymphaea.fr>). Το σύστημα που εφαρμόστηκε βασίζεται στη διαφορά πυκνότητας μεταξύ γλυκού και θαλάσσιου νερού. Συγκεκριμένα η εκροή του νερού της πηγής μεταφέρεται υψηλότερα μέσω κάποιου αγωγού. Το νερό συγκεντρώνεται σε ημισφαιρική διάταξη και αντλείται από το άνω μέρος της διάταξης αυτής. Η διάταξη δοκιμάστηκε σε Ιταλική πηγή καρστικού συστήματος, σε βάθος 36m. Η διάταξη απόληξης νερού εξελίχθηκε περαιτέρω και περιλαμβάνει κύλινδρο ο οποίος περικλείει την πηγή και η βάση του ακολουθεί την κλίση του πυθμένα. Ο αγωγός που οδηγεί το νερό της πηγής μέσα στον κύλινδρο περιλαμβάνει αγωγιμόμετρα για τη μέτρηση της αγωγιμότητας, της αλατότητας, της θερμοκρασίας και της συγκέντρωσης ραδονίου καθώς και ηλεκτρομαγνητικό ροόμετρο για τη μέτρηση της παροχής.

Πρόσφατα υποβλήθηκε πρόταση «πατέντας» (Argyriadis, 2007) για την υδρομάστευση νερού πηγών που εκβάλλουν στην ακτή ή στον πυθμένα της θάλασσας. Στην πρώτη περίπτωση προτείνεται η συλλογή του νερού σε φράγμα με εύκαμπτα τοιχώματα, του οποίου το ύψος μπορεί να μεταβάλλεται, ενώ η περίσσεια του νερού που δεν αντλείται θα μπορεί να διαφεύγει από το κατώτερο τμήμα του φράγματος. Στην περίπτωση της υποθαλάσσιας πηγής, προτείνεται κάλυψη αυτής με «κώδωνα» του οποίου το χείλος εφάπτεται στον πυθμένα, ενώ στο ανώτερο σημείο τοποθετείται αντλία για την απόληψη του γλυκού νερού. Υπερχείλιση του γλυκού νερού προβλέπεται από εύκαμπτες θύρες στο πλευρικό τοίχωμα του κώδωνα κοντά στον πυθμένα. Ωστόσο, δεν παρέχεται διαστασιολόγηση των προτεινόμενων διατάξεων και υπολογισμός της παροχής απόληξης γλυκού νερού.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται αποτελέσματα πειραματικής διερεύνησης της δυνατότητας συλλογής του νερού της πηγής με την όσο το δυνατόν μικρότερη ανάμιξή του με το θαλάσσιο νερό. Με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα συνάγονται συμπεράσματα για τις δυνατότητες εκμετάλλευσης των υποθαλάσσιων αναβλύσεων της περιοχής Στούπας Μεσσηνίας (Παπακωνσταντής κ.α., 2010).

2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

2.1 ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΠΗΓΗΣ

Λαμβάνοντας υπόψη ότι η πυκνότητα του θαλάσσιου νερού είναι περίπου $\rho_a=1027\text{kg/m}^3$ (για αλατότητα 38‰) και η πυκνότητα του νερού είναι περίπου $\rho_o=998\text{kg/m}^3$ (για θερμοκρασία 20°C) προκύπτει πυκνομετρική διαφορά ανάμεσα στο πόσιμο και θαλάσσιο νερό περίπου 29 kg/m^3 ή σχετική διαφορά πυκνότητας $\Delta\rho/\rho_o\approx 3\%$. Συνεπώς οι υποθαλάσσιες πηγές πόσιμου νερού μπορούν να προσομοιωθούν ως εκροές υγρού σε περιβάλλον υγρό μεγαλύτερης πυκνότητας, δηλαδή ως ανωστικές φλέβες. Στη συνέχεια παρουσιάζονται βασικά στοιχεία ανωστικών φλεβών (Fischer *et al.*, 1979).

2.2 ΑΝΩΣΤΙΚΕΣ ΦΛΕΒΕΣ

Ως ανωστικές φλέβες ορίζονται οι εκροές ρευστού σε ρευστό με διαφορετική πυκνότητα. Έστω κατακόρυφη ανωστική φλέβα που εκρέει από κυκλικό στόμιο διαμέτρου D με ταχύτητα U_0 και πυκνότητα ρ_0 σε ήρεμο ομογενή αποδέκτη με μικρότερη πυκνότητα ρ_a . Οι βασικές παράμετροι της ροής είναι η ογκομετρική παροχή της φλέβας Q_0 , η ροή ειδικής ορμής ή ποσότητας κίνησης M_0 και η ροή ειδικής άνωσης B_0 που ορίζονται ως εξής (Fischer *et al.*, 1979):

$$Q_0 = \frac{\pi D^2}{4} U_0, \quad M_0 = U_0 Q_0, \quad B_0 = \frac{\rho_a - \rho_0}{\rho_a} g Q_0 = g' Q_0 \quad (2.1)$$

όπου g' είναι η φαινομενική επιτάχυνση της βαρύτητας στην εκροή της φλέβας. Κάθε ανωστική φλέβα σε κάποια απόσταση από την πηγή μεταπίπτει σε πλούμιο. Θεωρώντας ότι στο πεδίο ροής ισχύει η παραδοχή Boussinesq ($\Delta\rho \ll \rho_a$) και ότι η ροή είναι τυρβώδης, κάθε μεταβλητή του πεδίου ροής μπορεί να γραφτεί ως συνάρτηση των παραμέτρων Q_0 , M_0 , B_0 και της απόστασης z από την εκροή. Από τις παραμέτρους της (2.1) ορίζονται δύο κλίμακες μήκους (Fischer *et al.*, 1979):

$$l_Q = \frac{Q_0}{\sqrt{M_0}}, \quad l_M = \frac{M_0^{3/4}}{B_0^{1/2}} \quad (2.2)$$

Η φυσική σημασία των κλιμάκων l_Q και l_M δίνεται από τους Fischer *et al.* (1979). Αν $z \gg l_M$ η ροή συμπεριφέρεται ως πλούμιο, ενώ για $z \ll l_M$ η ροή συμπεριφέρεται ως απλή φλέβα. Ο λόγος l_Q/l_M ονομάζεται αρχικός αριθμός Richardson της φλέβας και συσχετίζεται με τον πυκνομετρικό αριθμό Froude F_0 ως εξής:

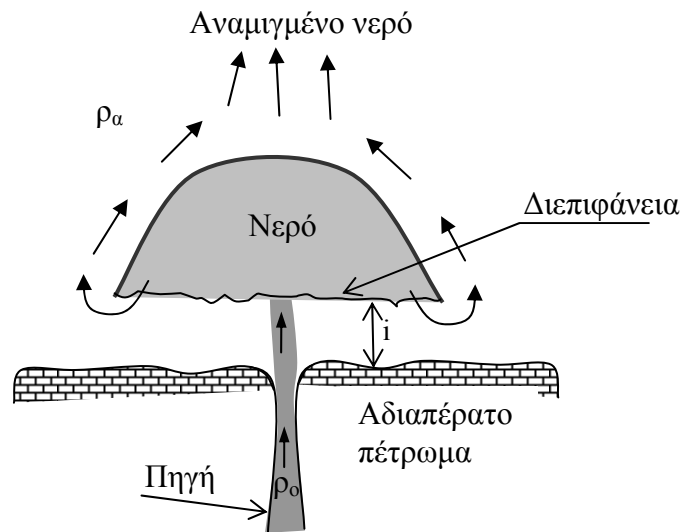
$$Ri_0 = \frac{l_Q}{l_M} = \frac{Q_0 B_0^{1/2}}{M_0^{5/4}} = \left(\frac{\pi}{4}\right)^{1/4} \frac{\sqrt{g'_0 D}}{U_0}, \quad F_0 = \frac{U_0}{\sqrt{g'_0 D}} \quad (2.3)$$

Για μεγάλους αριθμούς F_0 κυριαρχεί η ορμή στην εκροή της φλέβας, ενώ για πολύ μικρούς αριθμούς F_0 η ροή συμπεριφέρεται ως πλούμιο από την εκροή της φλέβας. Πρακτικά για $F_0 > 10$ έχουμε κυριαρχία της ορμής στην εκροή (Papanicolaou and List, 1988).

Όταν ρευστό εκρέει από στόμιο, σε αποδέκτη με βαρύτερο ρευστό, με παροχή μικρότερη από μια κρίσιμη τιμή, τότε ρευστό από τον αποδέκτη διεισδύει στο στόμιο. Ο Wilkinson (1988) διερεύνησε πειραματικά τη διείσδυση αλατόνερου (ή θαλάσσιου νερού) από τον αποδέκτη σε κυκλικό στόμιο εκροής φλέβας νερού σαν συνάρτηση του πυκνομετρικού αριθμού Froude στην εκροή και της γωνίας που σχηματίζει το στόμιο εκροής ως προς το οριζόντιο επίπεδο. Η κρίσιμη τιμή της παροχής συσχετίστηκε με τον πυκνομετρικό αριθμό Froude και προέκυψε ότι η κρίσιμη τιμή του αριθμού Froude εξαρτάται από το σχήμα και τον προσανατολισμό του στομίου εκροής. Η μέγιστη τιμή του κρίσιμου αριθμού Froude προέκυψε 0.73, για γωνία παροχέτευσης 15° ως προς το οριζόντιο επίπεδο (για αριθμούς Reynolds $Re \geq 2700$, $Re = U_0 D/\nu$). Ο Σκανδάλης (2005) μελέτησε τις συνθήκες διείσδυσης αλατόνερου από τον αποδέκτη σε στόμια εκροής κατακόρυφων φλεβών νερού, τα οποία είχαν διατομή κυκλική, τετραγωνική, ισόπλευρη τριγωνική και ορθογωνική με στρογγυλεμένες γωνίες. Προέκυψε ότι, για αριθμούς Reynolds ($Re = U_0 4R/\nu$, όπου R η υδραυλική ακτίνα της διατομής) πάνω από 2000, περιβάλλον ρευστό αρχίζει να διεισδύει στο στόμιο εκροής όταν ο αριθμός Richardson Ri_0 υπερβαίνει την τιμή 0.65.

2.3 ΔΙΑΤΑΞΗ ΑΠΟΛΗΨΗΣ ΝΕΡΟΥ

Για τη συλλογή του νερού της πηγής με τη μικρότερη δυνατή ανάμιξή του με το περιβάλλον υγρό επιλέγεται η τοποθέτηση διάταξης μορφής «ομπρέλας» πάνω από την ανάβλυση (Σχήμα 1), στο εσωτερικό της οποίας θα εγκλωβίζεται το νερό που αναβλύζει και θα αντλείται από το ανώτερο τμήμα της «ομπρέλας». Η περίσσεια νερού θα διαφεύγει οριζόντια από το κατώτερο μέρος της διάταξης, όπου εμφανίζεται η διεπιφάνεια νερού και αποδέκτη (θάλασσης). Η πλήρης κάλυψη της πηγής αποφεύγεται ώστε η περίσσεια του νερού να εκρέει ελεύθερα στη θάλασσα χωρίς να αλληλεπιδρά με την κατασκευή. Η συλλογή πόσιμου νερού προϋποθέτει, εκτός από την επιτυχή λειτουργία της διάταξης, ότι αναβλύζει πόσιμο νερό από ολόκληρη τη διατομή της πηγής.



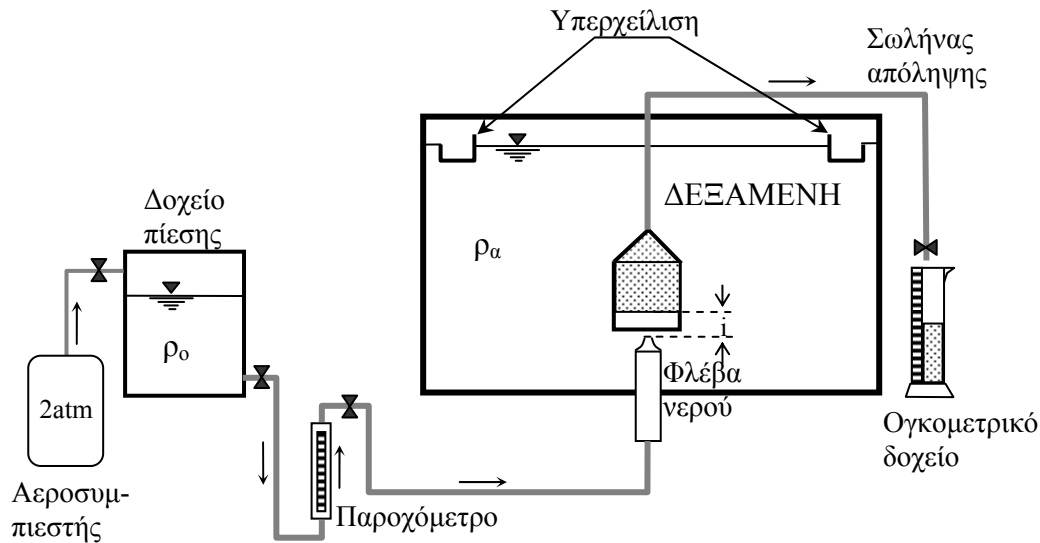
Σχήμα 1: Σκαρίφημα διάταξης απόληψης νερού από υποθαλάσσια πηγή.

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

3.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Με βάση τη θεωρητική ανάλυση που παρουσιάστηκε παραπάνω κατασκευάστηκε ομοίωμα της διάταξης απόληψης γλυκού νερού μέσα από το θαλάσσιο περιβάλλον στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Υδραυλικής του ΕΜΠ. Το θαλάσσιο περιβάλλον προσομοιώθηκε με ορθογωνική δεξαμενή διαστάσεων κάτοψης 1.00m×0.80m και βάθους 0.70 m, με διαφανή τοιχώματα ώστε να επιτρέπεται η παρατήρηση. Στο ανώτερο ύψος της δεξαμενής τοποθετήθηκε περιμετρικός υπερχειλιστής ώστε η στάθμη του υγρού της δεξαμενής να διατηρείται σταθερή. Στο κέντρο του πυθμένα τοποθετήθηκε η διάταξη παροχέτευσης κατακόρυφης κυκλικής φλέβας. Για την εκροή του νερού χρησιμοποιήθηκαν ακροφύσια με διάμετρο 0.5cm, 1.0cm και 1.5cm. Η διάταξη δημιουργίας της φλέβας μπορούσε να μετακινηθεί κατακόρυφα, ώστε το επίπεδο εκροής να μεταβάλλεται ανάλογα με τις απαιτήσεις του πειράματος. Η τροφοδοσία της φλέβας γινόταν από δοχείο χωρητικότητας 40 λίτρων το οποίο συμπιεζόταν με αέρα στις 2-2.5 atm από ένα αεροσυμπιεστή με ρυθμιστή πίεσης εξόδου. Έτσι η πιεζομετρική διαφορά ανάμεσα στη δεξαμενή τροφοδοσίας και το ακροφύσιο ήταν περίπου 20 μέτρα στήλης νερού ($\approx 2\text{atm}$) και η παροχή παρέμενε σταθερή στη διάρκεια των πειραμάτων. Η παροχή της φλέβας ρυθμιζόταν με βάνα

ακρίβειας και μετριότητας μέσω βαθμονομημένου ροομέτρου με ακρίβεια $\pm 2\%$. Διάγραμμα της πειραματικής διάταξης φαίνεται στο Σχήμα 2.

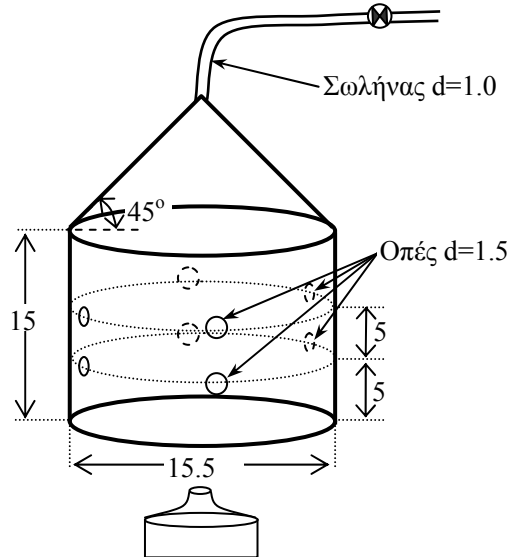


Σχήμα 2: Πειραματική διάταξη.

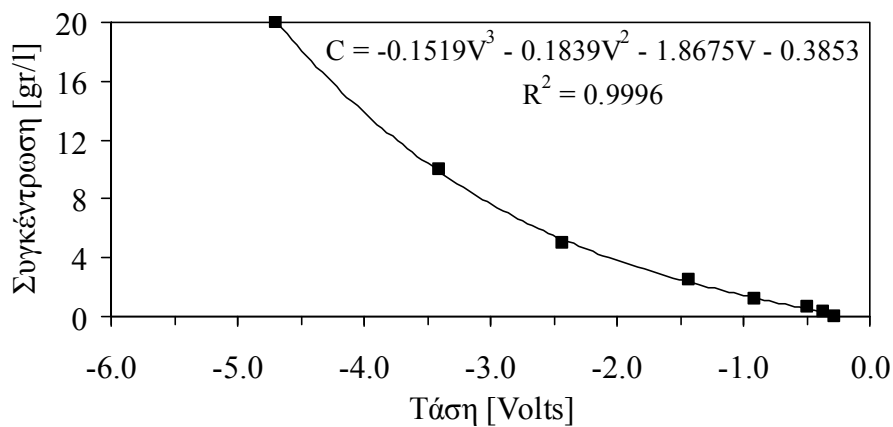
Για τη σύλληψη του νερού της φλέβας τοποθετήθηκε πάνω από την εκροή ανεστραμμένο δοχείο από Plexiglas, του οποίου το κατώτερο τμήμα είναι κυλινδρικό με ύψος 15cm και διάμετρο 15.5cm, ενώ το ανώτερο τμήμα είναι κωνικό. Στην κορυφή του δοχείου συγκολλήθηκε ειδικό μεταλλικό τμήμα σωλήνα στο οποίο στερεώθηκε εύκαμπτος σωλήνας διαμέτρου 1 cm για την απόληση του νερού. Σκαρίφημα της διάταξης σύλληψης του νερού της φλέβας φαίνεται στο Σχήμα 3. Στο άλλο άκρο του εύκαμπτου σωλήνα προσαρμόστηκε βάνα για τη ρύθμιση της παροχής απόλησης, η οποία προσδιορίζεται ογκομετρικά. Η διάταξη σύλληψης είχε τη δυνατότητα κατακόρυφης μετακίνησης με ένα σύστημα τριών κοχλιωτών στηριγμάτων τοποθετημένων πάνω σε μεταλλικό δακτύλιο που εδράζεται στον πυθμένα της δεξαμενής. Στο κυλινδρικό τμήμα της διάταξης και σε αποστάσεις 5cm και 10cm από το κατώτερο άκρο ανοίχθηκαν 4 συμμετρικά τοποθετημένες οπές διαμέτρου 1.5cm. Απομονώνοντας τις κατάλληλες οπές η διεπιφάνεια γλυκού νερού και αλατόνευρο δημιουργούνται στο επιθυμητό επίπεδο. Ωστόσο, από τα πειράματα προέκυψε ότι η «υπερχείλιση» του γλυκού νερού από τις πλαϊνές οπές ή το κατώτερο όριο της συσκευής σύλληψης δεν είχε σημαντικό ρόλο στην ποιότητα του νερού που λαμβανόταν συγκριτικά με την απόσταση της διεπιφάνειας από το επίπεδο του στομίου.

Για τη μέτρηση της αλατότητας του νερού που συλλέγεται χρησιμοποιήθηκε αγωγιμόμετρο του οποίου η αρχή λειτουργίας παρουσιάστηκε από τους Gibson and Schwarz (1963) και το οποίο αναπτύχθηκε σε εξελιγμένη μορφή στο Εργαστήριο Α Χημικής Μηχανικής του Τμήματος Χημικών Μηχανικών ΑΠΘ (υπό την επιμέλεια των Καθηγητών Ε. Καστρινάκη και Σ. Νυχά). Για την μετατροπή του αναλογικού σήματος του οργάνου σε ψηφιακό χρησιμοποιήθηκε μετατροπέας (A/D converter) της εταιρίας Measurement Computing (μοντέλο USB-1608FS), τον οποίο διαθέτει το Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Υδραυλικής ΕΜΠ. Για τη συλλογή και καταγραφή των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Das-Wizard σε συνδυασμό με το λογισμικό Microsoft® Excel. Για τη βαθμονόμηση του οργάνου παρασκευάζονταν διαλύματα αλατόνευρο με γνωστή συγκέντρωση σε αλάτι (αλατότητα). Σε κάθε διάλυμα αλατόνευρο καθώς και στο νερό της φλέβας (διάλυμα με μηδενική συγκέντρωση) γινόταν δειγματοληψία με το

αγωγιμόμετρο. Από τις τιμές που λαμβάνονταν (παραπλήσιες αφού κάθε διάλυμα ήταν ομογενές) προσδιοριζόταν μια μέση τάση V . Σε όλες τις περιπτώσεις βρέθηκε ότι μια πολυωνυμική καμπύλη 3^{ου} βαθμού διέρχεται με πολύ καλή ακρίβεια από τα μετρημένα ζεύγη τιμών τάσης V και συγκέντρωσης C . Τυπική καμπύλη βαθμονόμησης του αγωγιμομέτρου φαίνεται στο Σχήμα 4.



Σχήμα 3: Διάταξη απόληξης του νερού της φλέβας (διαστάσεις σε cm).



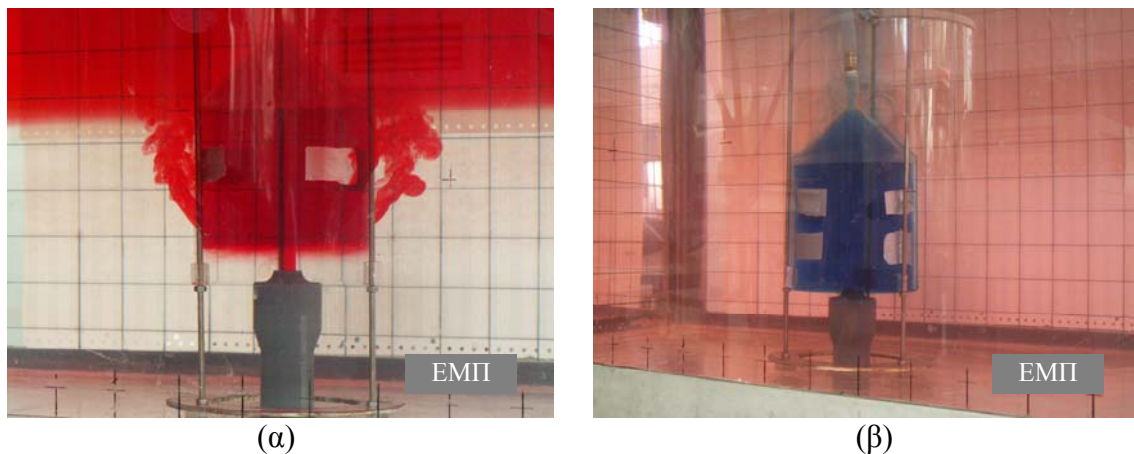
Σχήμα 4: Τυπική καμπύλη βαθμονόμησης αγωγιμομέτρου.

3.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ

Σε κάθε πείραμα η δεξαμενή ήταν γεμάτη με νερό στο οποίο γινόταν προσθήκη αλατιού. Το υγρό αναδευόταν μέχρι να ομογενοποιηθεί και αφηνόταν ικανό χρονικό διάστημα να ηρεμήσει. Έπειτα γινόταν η βαθμονόμηση του αγωγιμομέτρου. Το υγρό της φλέβας ήταν νερό από το δίκτυο του Εργαστηρίου το οποίο χρωματιζόταν με ειδική χρωστική (food dye) ώστε να είναι ορατό. Ρυθμιζόταν μια συγκεκριμένη παροχή φλέβας και ξεκινούσε το πείραμα. Το (χρωματισμένο) νερό της φλέβας συγκεντρωνόταν στο άνω τμήμα του δοχείου, ενώ το αλατόνερο παρέμενε χαμηλότερα. Έπειτα ξεκινούσε η απόληξη νερού μέσω του εύκαμπτου σωλήνα από την κορυφή της κατασκευής. Ειδική μέριμνα δινόταν ώστε η παροχή απόληξης να είναι μικρότερη από την παροχή εισόδου της φλέβας. Αφού σταθεροποιούνταν η διεπιφάνεια

χρωματισμένου νερού και αλατόνευρου στην ειδική κατασκευή (Σχήμα 5), γίνονταν διαδοχικές ογκομετρήσεις για τον προσδιορισμό της παροχής απόληξης και παράλληλα μετρούνταν μέσω του αγωγιμομέτρου η συγκέντρωση (αλατότητα) του νερού που λαμβανόταν. Μετά από μερικές απολήψεις η συγκέντρωση σταθεροποιούνταν. Στα περισσότερα πειράματα οι περιμετρικές οπές ήταν κλειστές οπότε η διεπιφάνεια σταθεροποιούνταν στο κατώτερο μέρος του δοχείου (Σχήμα 5β). Μεταβάλλοντας το ύψος του στομίου παροχέτευσης της φλέβας μεταβαλλόταν η απόσταση της διεπιφάνειας από το στόμιο εκροής της φλέβας νερού και οι μετρήσεις συνεχίζονταν.

Πραγματοποιήθηκαν 19 πειράματα και αρκετές επιμέρους μετρήσεις μέχρι να σταθεροποιηθεί η συγκέντρωση του νερού που λαμβανόταν. Η πυκνομετρική διαφορά που εφαρμόστηκε ήταν 1% ως 2% περίπου, η οποία μπορεί να είναι διαφορετική από την πραγματική (παράγραφος 2.1), ωστόσο η πειραματική μελέτη βασίζεται στην ομοιότητα κατά Froude η οποία εφαρμόζεται ευρέως στα προβλήματα ανωστικών φλεβών. Ο πυκνομετρικός αριθμός Froude κυμάνθηκε από 1.6 ως 23 περίπου (χωρίς διείσδυση αλατόνευρου στο στόμιο), καλύπτοντας την περίπτωση ροής που ομοιάζει με πλούμιο από την πηγή αλλά και την περίπτωση ανωστικής φλέβας στην οποία κυριαρχεί η ποσότητα κίνησης (ορμή) στην πηγή. Ο αριθμός Reynolds κυμάνθηκε μεταξύ 1100 και 3000 περίπου. Η μέγιστη απόσταση της διεπιφάνειας από το στόμιο ήταν $4D$ (D η διάμετρος του στομίου εκροής) και δεν χρειάστηκε να μελετηθεί μεγαλύτερη, αφού σε τέτοιες αποστάσεις παρατηρήθηκε σημαντική ανάμιξη.

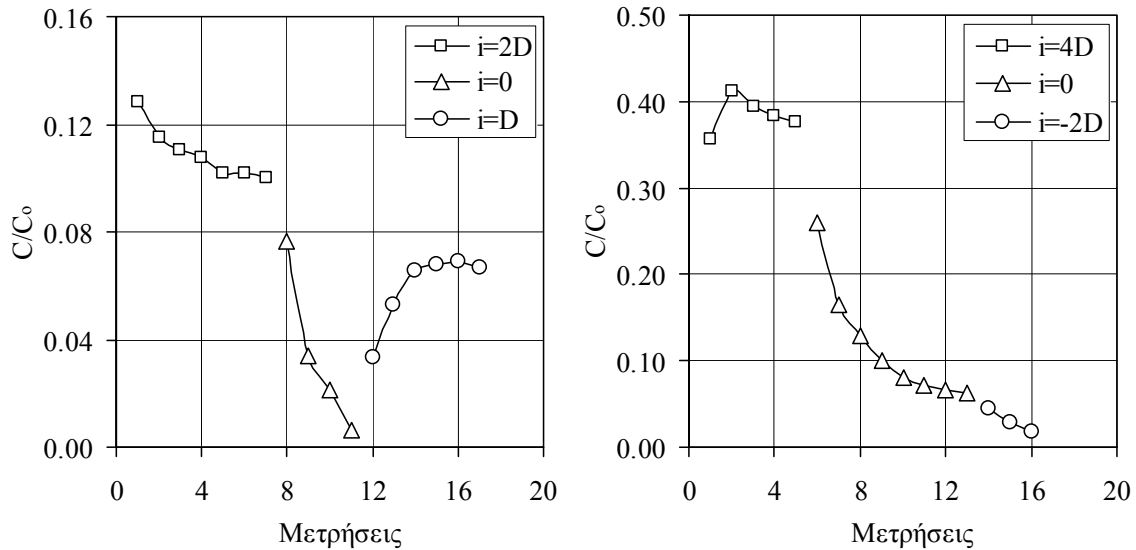


Σχήμα 5: Στιγμιότυπο πειράματος (α) με ανοικτές οπές και (β) με κλειστές οπές.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

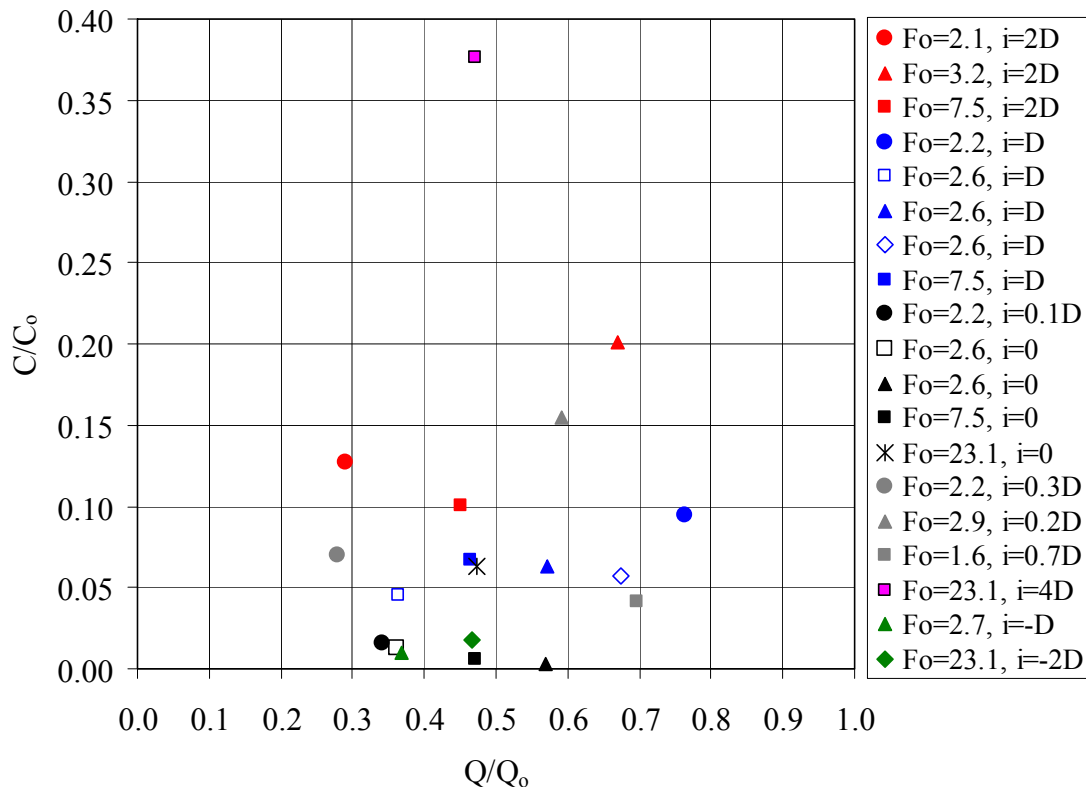
Σε κάθε πείραμα με συγκεκριμένο πυκνομετρικό αριθμό Froude F_o , για συγκεκριμένη παροχή απόληξης Q και σταθερή απόσταση i της διεπιφάνειας από το στόμιο παροχέτευσης της φλέβας (Σχήμα 1), πραγματοποιήθηκαν διαδοχικές μετρήσεις συγκέντρωσης του νερού που λαμβανόταν. Χαρακτηριστικό είναι το Σχήμα 6, όπου φαίνεται η εξέλιξη της συγκέντρωσης (αλατότητας) C για διάφορες θέσεις της διεπιφάνειας i/D ως προς το στόμιο εκροής (αρνητική τιμή i/D δηλώνει ότι η διεπιφάνεια βρίσκεται κάτω από το επίπεδο εκροής). Η συγκέντρωση C αδιαστατοποιείται με την αρχική συγκέντρωση C_o του αποδέκτη. Από το Σχήμα 6 γίνεται φανερό ότι η συγκέντρωση του νερού που λαμβάνεται σταθεροποιείται σε μια συγκεκριμένη τιμή όταν η παροχή απόληξης και η θέση της διεπιφάνειας είναι σταθερές (Q/Q_o =σταθ., i/D =σταθ.). Η τιμή αυτή της αδιάστατης συγκέντρωσης μειώνεται όσο πλησιέστερα βρίσκεται η διεπιφάνεια στο επίπεδο του στομίου εκροής

της φλέβας. Συνεπώς για να περιοριστεί η ανάμιξη του παροχτευόμενου «γλυκού» νερού με το αλατόνερο του αποδέκτη θα πρέπει η διεπιφάνεια να βρίσκεται κατά το δυνατόν πλησιέστερα στο επίπεδο εκροής. Για μεγάλους πυκνομετρικούς αριθμούς F_o ($F_o=23.1$) η συγκέντρωση διατηρείται σε υψηλότερα επίπεδα απ' ό,τι για μικρότερους αριθμούς F_o . Συγκεκριμένα για $i=0$ φαίνεται ότι η αλατότητα τείνει στο μηδέν για $F_o=7.5$, ενώ παραμένει γύρω στο 6% της συγκέντρωσης του αποδέκτη για $F_o=23.1$. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι φλέβες με μεγάλη αρχική ορμή μεταπίπτουν ταχύτερα σε τυρβώδη ροή οπότε η συμπαράσυρση υγρού από τον αποδέκτη ακόμα και κοντά στην εκροή της φλέβας είναι αναπόφευκτη.



Σχήμα 6: Χρονική εξέλιξη της συγκέντρωσης του νερού που λαμβάνεται για διάφορες αποστάσεις της διεπιφάνειας από το στόμιο παροχέτευσης της φλέβας για (α) $F_o=7.5$, $Re=2641$, $Q/Q_o=0.46$ και (β) $F_o=23.1$, $Re=2908$, $Q/Q_o=0.47$.

Χρησιμοποιώντας την τελική τιμή της συγκέντρωσης σε κάθε πείραμα (δηλαδή την τιμή στην οποία σταθεροποιείται η συγκέντρωση) μελετάται η μεταβολή της συγκέντρωσης του νερού που λαμβάνεται συναρτήσει της παροχής απόληψης για διάφορες αποστάσεις της διεπιφάνειας από την εκροή. Για λόγους γενίκευσης η συγκέντρωση C αδιαστατοποιείται με τη συγκέντρωση του αποδέκτη C_o , ενώ η παροχή απόληψης Q αδιαστατοποιείται με την παροχή εκροής της φλέβας Q_o . Τα πειραματικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 7. Όταν η διεπιφάνεια βρίσκεται υψηλότερα από το στόμιο περίπου $2D$ (D η διάμετρος του στομίου) τότε η συγκέντρωση του νερού που λαμβάνεται είναι τουλάχιστο 10% της αρχικής συγκέντρωσης του αποδέκτη. Όταν η διεπιφάνεια πλησιάσει σε απόσταση D από το επίπεδο του στομίου ($i=D$) τότε παρατηρούνται μικρότερες συγκεντρώσεις (περίπου $0.065C_o$ κατά μέσο όρο). Οι τιμές της συγκέντρωσης μειώνονται αισθητά στην περίπτωση που η διεπιφάνεια βρίσκεται στο επίπεδο του στομίου εκροής (περίπου $0.01C_o$ κατά μέσο όρο) και πρακτικά λαμβάνεται το «γλυκό» νερό της φλέβας. Εξαιρεση αποτελεί η περίπτωση μεγάλου πυκνομετρικού αριθμού Froude ($F_o=23.1$) όπου η ροή υπόκειται σε ανάμιξη από την εκροή. Η ανάμιξη ελαχιστοποιείται αν η διεπιφάνεια κατέβει κάτω από το επίπεδο εκροής έτσι ώστε η φλέβα να εκρέει σε περιβάλλον «γλυκού» νερού. Σ' αυτήν την περίπτωση ακόμα και για $F_o=23.1$ η αλατότητα είναι μικρή ($C<0.02C_o$).



Σχήμα 7: Μεταβολή της συγκέντρωσης του νερού που λαμβάνεται συναρτήσει της παροχής απόληξης (σε αδιάστατους όρους) για διάφορους πυκνομετρικούς αριθμούς Froude και αποστάσεις της διεπιφάνειας «γλυκού» νερού και αλατόνερου από την εκροή.

5. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΙΣ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΕΣ ΠΗΓΕΣ ΣΤΟΥΠΙΑΣ ΜΕΣΣΗΝΙΑΣ

Η παρούσα εργασία βασίζεται στη διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια ερευνητικού προγράμματος σχετικά με την αξιοποίηση των υποθαλάσσιων πηγών νερού στην περιοχή Στούπας Μεσσηνίας. Σύμφωνα με το ΕΛΚΕΘΕ (Καραγεώργης και Παπαθανασίου, 2009) στην περιοχή υπάρχουν 4 πηγές, από τις οποίες η μία είναι σαφώς μεγαλύτερη (κύρια ανάβλυση). Οι διαστάσεις της περιοχής των αναβλύσεων είναι 50 m x 30 m. Το βάθος γύρω από την κύρια ανάβλυση είναι 12-15 m περίπου, ενώ το μέγιστο βάθος στην περιοχή είναι 29 m. Η αλατότητα του θαλάσσιου νερού μετρήθηκε περίπου 38‰. Τον Δεκέμβριο του 2006 καταγράφηκε ελάχιστη αλατότητα στο νερό γύρω στο 1‰, ενώ κατά τους μήνες Ιούλιο, Σεπτέμβριο και Οκτώβριο του 2009 παρατηρήθηκαν πολύ μεγαλύτερες τιμές (γύρω στο 20‰). Αυτό οφείλεται πιθανώς στη διείσδυση θαλάσσιου νερού κατά τους θερινούς μήνες λόγω μειωμένης παροχής της πηγής. Μικρότερες τιμές αλατότητας παρατηρήθηκαν τον Νοέμβριο του 2009.

Η εφαρμογή της μεθοδολογίας που παρουσιάστηκε παραπάνω για τη σύλληψη του νερού προϋποθέτει ότι δεν υπάρχει διείσδυση θαλάσσιου νερού. Από τις μετρήσεις του ΕΛΚΕΘΕ (Καραγεώργης και Παπαθανασίου, 2009) στην υποθαλάσσια ανάβλυση παρατηρήθηκαν ταχύτητες 0.20m/s ως 1.20m/s, ενώ οι αλατότητες που μετρήθηκαν ήταν περίπου 22 gr/lit τον Αύγουστο του 2009 και πολύ μικρές τον Νοέμβριο του ίδιου έτους. Για να μην υπάρχει διείσδυση θαλάσσιου νερού πρέπει $Ri_0 \leq 0.65$ (Σκανδάλης, 2005). Η επιτάχυνση της βαρύτητας στην εκροή είναι κατά προσέγγιση:

$$g'_0 = \Delta\rho / \rho_\alpha = (1027.06 - 998.2) / 998.2 \cdot 9.81 = 0.284 \text{ m/sec}^2$$

Από τη (2.3), για $g'_0 = 0.284 \text{ m/sec}^2$, προκύπτει:

$$U_0 = 0.20 \text{ m/sec} \Rightarrow D = 0.067 \text{ m}, \quad U_0 = 1.20 \text{ m/sec} \Rightarrow D = 2.41 \text{ m}$$

Συνεπώς για να μην διεισδύει θαλάσσιο νερό στην πηγή η διάμετρος εκροής πρέπει να είναι μικρότερη από 0.067m για ταχύτητα εκροής 0.20 m/sec και μικρότερη από 2.41m για ταχύτητα 1.20 m/sec. Για εύρος ταχυτήτων 0.20 m/s ως 1.20 m/s, για ιδεατή διάμετρο εκροής 0.5 m προκύπτει $0.53 < F_0 < 3.18$ και $100000 < Re < 600000$, ενώ για διάμετρο 1 m προκύπτει $0.37 < F_0 < 2.25$ και $200000 < Re < 1200000$. Άρα αναμένεται η ροή να είναι τυρβώδης και ο αριθμός F_0 μικρός, δηλαδή η ροή να ομοιάζει με πλούμιο. Για $F_0 < 1.45$ ($Ri_0 > 0.65$) ενδέχεται να υπάρχει διείσδυση θαλάσσιου νερού στην πηγή.

Με βάση τα ευρήματα της πειραματικής διερεύνησης είναι δυνατή η απόληψη νερού, ελάχιστα αναμιγμένου με το νερό του αποδέκτη, μέσω μιας διάταξης παρόμοιας με αυτήν που περιγράφηκε παραπάνω. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι η σχηματιζόμενη διεπιφάνεια «γλυκού» και θαλάσσιου νερού να παραμένει στο επίπεδο της εκροής ή ακόμα πιο κάτω και από την πηγή να εκρέει πόσιμο νερό. Οι μετρημένες παροχές από το ΕΛΚΕΘΕ οδηγούν στο συμπέρασμα ότι τους χειμερινούς μήνες υπάρχει πλήρης ροή νερού (χωρίς διείσδυση θαλάσσιου νερού), αλλά όχι τους θερινούς μήνες κατά τους οποίους παρατηρήθηκε εκροή υφάλμυρου νερού. Για την υλοποίηση του έργου εκμετάλλευσης της πηγής απαιτείται η ακριβής περιγραφή των χαρακτηριστικών της εκροής (παροχή, αλατότητα κλπ.). Τα σημερινά δεδομένα αλατότητας θα πρέπει να επιβεβαιωθούν με περισσότερες μετρήσεις, αφού όπως αναφέρεται στη σχετική έκθεση ΕΛΚΕΘΕ (Καραγεώργης και Παπαθανασίου, 2009) το όργανο μέτρησης μετακινιόταν και άλλαζε θέση μέτρησης. Με τα σημερινά δεδομένα η κατασκευή συστήματος απόληξης πόσιμου νερού θεωρείται παρακινδυνευμένη, λαμβάνοντας υπόψη και το γεγονός ότι τα καρστικά συστήματα είναι πολύπλοκα και ευμετάβλητα. Ωστόσο θα μπορούσε να εξεταστεί η περίπτωση συλλογής του νερού της πηγής και η ενδεχόμενη επεξεργασία του (αφαλάτωση).

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκε πειραματική διερεύνηση της δυνατότητας απόληξης πόσιμου νερού από υποθαλάσσιες πηγές. Το θαλάσσιο περιβάλλον προσομοιώθηκε με δεξαμενή γεμάτη με αλατόνερο, ενώ η πηγή με κατακόρυφη κυκλική φλέβα νερού πάνω από την οποία τοποθετήθηκε ανεστραμμένο δοχείο για τη συλλογή του νερού της φλέβας. Από τα πειραματικά αποτελέσματα προέκυψε ότι όταν η διεπιφάνεια νερού και αλατόνερου βρίσκεται στο επίπεδο εκροής η συγκέντρωση του νερού που λαμβάνεται είναι γενικά μικρή (περίπου 1% της συγκέντρωσης του αποδέκτη) για $F_0 \leq 7.5$. Για μεγάλους πυκνομετρικούς αριθμούς Froude ($F_0 = 23.1$) παρατηρείται μεγαλύτερη συγκέντρωση η οποία μειώνεται αισθητά αν η διεπιφάνεια κατέβει κάτω από το επίπεδο εκροής. Συνεπώς το νερό της πηγής μπορεί να συλλεχθεί ελάχιστα αναμιγμένο με το θαλάσσιο νερό αν η διεπιφάνεια γλυκού και θαλάσσιου νερού βρίσκεται στο επίπεδο της εκροής ή χαμηλότερα. Φυσικά η λήψη πόσιμου νερού προϋποθέτει ότι δεν υπάρχει διείσδυση θαλάσσιου νερού στην πηγή και ότι το νερό της πηγής είναι πράγματι πόσιμο.

Οι υποθαλάσσιες αναβλύσεις στην περιοχή της Στούπας Μεσσηνίας παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Ωστόσο μετρήσεις από το ΕΛΚΕΘΕ δείχνουν μεγάλες μεταβολές στην αλατότητα του νερού κατά τους διάφορους μήνες, γεγονός που δεν αποκλείει το ενδεχόμενο μεγάλο διάστημα του έτους να εκρέει αλμυρό ή υφάλμυρο νερό από την πηγή. Συνεπώς η κατασκευή συστήματος απόληξης πόσιμου νερού δεν κρίνεται σκόπιμη υπό τις παρούσες συνθήκες.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η έρευνα της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος «Ολοκληρωμένη θαλάσσια και χερσαία μελέτη για τη διερεύνηση της ποσότητας, ποιότητας και υδρομάστευσης των υποθαλάσσιων αναβλύσεων της περιοχής Στούπας του Δήμου Λεύκτρου του Νομού Μεσσηνίας», κοινού Ερευνητικού προγράμματος Ελληνικού Κέντρου Θαλάσσιων Ερευνών (ΕΛΚΕΘΕ), Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών (ΓΠΑ), Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ). Επιστημονικός Υπεύθυνος για το ΕΜΠ: Δ. Κουτσογιάννης, Καθηγητής ΕΜΠ. Ευχαριστίες απευθύνονται στην Νομαρχιακή Αυτοδιοίκηση Μεσσηνίας και στο Δήμο Λεύκτρου για την ανάθεση του ερευνητικού έργου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Argyriadis, I., 2007. *Device for trapping subsea fresh water resurgences and method for the operation thereof*. Patent application number WO 2007/017703 A1. (In French).
- Bakalowicz, M., Fleury, P., Jouvenel, B., Prome, J.J., Becker, P., Carlin, T., Dorfliger, N., Seidel, J.L., Sergent, P., 2003. *Coastal karst aquifers in mediterranean regions. A methodology for exploring, exploiting and monitoring submarine springs*. In: Instituto Geologico y Minero de Espana Publ., *Technologia de la Intrusion de Agua de mar en Acuiferos Costeros: paisas mediterraneos* (TIAC). *Hydrogeologia y aguas subterraneas*, 8: 673–680.
- Fischer, H.B., List, E.J., Koh, R.C.Y., Imberger, J., Brooks, N.H., 1979. *Mixing in inland and coastal waters*. Academic.
- Fleury, P., Bakalowicz, M., Marsily, G., 2007. *Submarine springs and coastal karst aquifers: A review*. *J. Hydrology*, 339: 79-92.
- Gibson, C. H., Schwarz, W. H., 1963. *Detection of conductivity fluctuations in a turbulent flow field*, *J. Fluid Mech.*, 16(3): 357-364.
- Milanovic, P.T., 2000. *Geological Engineering in Karst, Dams, Reservoirs, Grouting, Groundwater Protection, Water Tapping, Tunnelling*. Zebra Publishing, Belgrade.
- Papanicolaou, P.N., and List, E.J., 1988. *Investigations of round vertical turbulent buoyant jets*. *J. Fluid Mech.*, 195, 341-391.
- Pulido Bosch, A., 1999. *Karst water exploitation*. In: Drew, D., Hotzl, H. (Eds.), *Karst Hydrogeology and Human activities, International Contribution to Hydrogeology*, 20: 235–240.
- Wilkinson, D.L., 1988. *Avoidance of seawater intrusion into ports of ocean outfalls*. *J. Hydraulic Eng., ASCE*, 123(1): 65-72.
- Καραγεώργης, Α. και Παπαθανασίου, Ε., 2009. *Ολοκληρωμένη θαλάσσια & χερσαία μελέτη για τη διερεύνηση της ποσότητας, ποιότητας και υδρομάστευσης των υποθαλάσσιων αναβλύσεων της περιοχής Στούπας του Δήμου Λεύκτρου Ν. Μεσσηνίας*. Έκθεση προόδου 2: Βαθυμετρικές και γεωφυσικές μετρήσεις–ωκεανογραφικές μετρήσεις–ιζηματολογικές αναλύσεις. ΕΛΚΕΘΕ.
- Παπακωνσταντής Η., Παπανικολάου Π., Κοτσιώνη Β., Χονδρός Μ., Μέμος Κ., Κουτσογιάννης Δ., 2010. *Ολοκληρωμένη θαλάσσια και χερσαία μελέτη για τη διερεύνηση της ποσότητας, ποιότητας και υδρομάστευσης των υποθαλάσσιων αναβλύσεων της περιοχής Στούπας του Δήμου Λεύκτρου του Νομού Μεσσηνίας*. Επιστημονικός υπεύθυνος ΕΜΠ: Δ. Κουτσογιάννης. Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, Αθήνα, (Τεύχος Ι).
- Σκανδάλης, Π., 2005. *Κατακόρυφες φλέβες με θετική και αρνητική άνωση*. Διπλωματική εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

ΔΙΑΦΥΓΕΣ ΡΕΥΣΤΩΝ ΑΠΟ ΤΟΝ ΠΥΘΜΕΝΑ ΤΩΝ ΘΑΛΑΣΣΩΝ ΤΗΣ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ: ΕΝΑ ΠΑΝΟΡΑΜΑ

Γ. Παπαθεοδώρου¹, Δ. Χριστοδούλου¹, G. Etiop², M. Γεραγά¹, Γ. Φερεντίνος¹, Σ. Κορδέλλα¹

¹ Εργαστήριο Θαλάσσιας Γεωλογίας και Φυσικής Ωκεανογραφίας (Ε.Θ.Α.ΓΕ.Φ.Ω), Τμήμα Γεωλογίας, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα 26504, Ελλάδα, gpapathe@upatras.gr (<http://www.oceanus.upatras.gr>)

² Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (I.N.G.V.), Section of Roma 2, via V. Murata 605, Rome 00143, Italy.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία αυτή περιγράφει τις διαφυγές ρευστών από τον πυθμένα δύο θαλασσιών περιοχών της Δυτικής Ελλάδος και παρουσιάζει τις επιπτώσεις τους σε θαλάσσιες κατασκευές (πεδίο κρατήρων Λιμένα Πατρών) και την χρησιμότητά τους ως δείκτες παρουσίας κοιτασμάτων υδρογονανθράκων (θαλάσσιες και χερσαίες διαφυγές Κατακόλου).

**SEABED FLUID FLOWS IN WESTERN GREECE: A PANORAMA
G. Papatheodorou¹, D. Christodoulou¹, G. Etiop², M. Geraga¹, G. Ferentinos¹,
S. Kordella¹**

¹Laboratory of Marine Geology and Physical Oceanography, Department of Geology, University of Patras, Patras 26504, Greece.

² Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (I.N.G.V.), Section of Roma 2, via V. Murata 605, Rome 00143, Italy.

ABSTRACT

This paper describes seabed fluid flows features in Western Greece and demonstrates their importance to offshore construction (Patras harbour pockmark field) and as direct indicator of gas and/or oil subsurface reservoirs (Katakolo bay offshore and onshore gas seepages).

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι «διαφυγές ρευστών από τον πυθμένα» είναι ένας γενικός όρος που περιγράφει ένα ευρύ φάσμα ρευστών (υγρά και αέρια) τα οποία διαφεύγουν από τον πυθμένα προς την υδάτινη στήλη. Αν και υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία αερίων και υγρών που διαφεύγουν από τον πυθμένα, μέχρι σήμερα τρεις τύποι διαφυγών έχουν συστηματικά μελετηθεί: (α) υδροθερμικές διαφυγές, (β) διαφυγές αερίων υδρογονανθράκων (κυρίως μεθανίου) μικροβιακής ή/και θερμογενούς προέλευσης, οι οποίοι σχηματίζονται λόγω της γρήγορης ταφής τους από νεότερα ιζήματα, και (γ) υποθαλάσσιες εκφορτίσεις γλυκού νερού από παράκτιους υδροφόρους. Οι διαφυγές αερίων υδρογονανθράκων χαρακτηρίζονται από χαμηλότερη θερμοκρασία και μικρότερο ρυθμό διαφυγής σε σχέση με τις υδροθερμικές διαφυγές. Για το λόγο αυτό καλούνται με το γενικό όρο «ψυχρές» διαφυγές και γενικώς μπορεί να υποστηριχθεί ότι εντοπίζονται σε ιζηματογενείς λεκάνες σε αντίθεση με τις υδροθερμικές που εντοπίζονται σε ωκεάνιο φλοιό νεότερης ηλικίας. Οι διαφυγές ρευστών πέραν των γεωεπιστημών έχουν σημαντική επίδραση στη θαλάσσια οικολογία και το χημισμό του θαλάσσιου περιβάλλοντος, καθώς συμβάλουν στην ανάπτυξη ιδιαίτερων περιβαλλόντων (χημειοσυνθετικές κοινότητες), αλλά και στην εξέλιξη του κλίματος καθώς, όπως έχει διαπιστωθεί προσφάτως, αποτελούν σημαντική πηγή των αερίων του θερμοκηπίου σε παγκόσμια βάση (π.χ., Etiope, 2004; Etiope and Milkov, 2004. Etiope and Ciccioli 2009). Η συμβολή των διαφυγών ρευστών στις αλληλοεπιδράσεις του συστήματος ατμόσφαιρας/ λιθόσφαιρας/ υδρόσφαιρας δεν έχει πλήρως διαλευκανθεί και συνεπώς η εκτίμηση της συμμετοχής τους στο σύνολο του ατμοσφαιρικού μεθανίου δεν είναι ακόμα ακριβής. Οι διαφυγές κυρίως αερίων υπό συγκεκριμένες συνθήκες είναι δυνατό να εξελιχθούν σε επικίνδυνες τόσο για την ανθρώπινη υγεία όσο και για τις θαλάσσιες κατασκευές (λιμάνια, υποθαλάσσιοι αγωγοί, εξέδρες πετρελαίου). Αντιθέτως, τα οφέλη τους είναι εξαιρετικής σημασίας και μπορούν να διακριθούν σε: (α) άμεσα, στα οποία εντάσσονται οι αναβλύσεις γλυκού νερού, η παροχή θερμότητας στις γεωθερμικές και υδροθερμικές ροές, η εκμετάλλευση του μεθανίου που βρίσκεται αποθηκευμένο στους «υδρίτες» (ενυδατωμένοι υδρογονάνθρακες) αλλά και λίγα μέτρα κάτω από την επιφάνεια του πυθμένα, (β) έμμεσα ή βιολογικά οφέλη, από την αύξηση της βιολογικής παραγωγικότητας λόγω των αυξημένων επιπέδων των θρεπτικών συστατικών και της μικροβιακής δραστηριότητας τοπικά στην περιοχή της διαφυγής, και τέλος (γ) οφέλη από τη χρήση των διαφυγών των ρευστών ως αξιόπιστες ενδείξεις για την πιθανή παρουσία ταμειυτήρων με εκμεταλλεύσιμες πηγές ενέργειας, όπως το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο. Οι διαφυγές ρευστών στην επιφάνεια του πυθμένα των θαλασσών ή ακόμη και της χέρσου σχηματίζουν ιδιαίτερες γεωμορφές όπως οι κρατήρες διαφυγές ρευστών, τα υβώματα ανθρακικής σύστασης και τα λασπούχα ηφαίστεια (Judd and Hovland 2007). Από τις πιο εντυπωσιακές γεωμορφές είναι οι κρατήρες (rockmarks) οι οποίοι είναι διαβρωσιγενούς προέλευσης καθώς σχηματίζονται από τη διάβρωση των ιζημάτων λόγω της διαφυγής των αερίων και δηλώνουν παλαιότερη ή σύγχρονη «υδραυλική δραστηριότητα» του πυθμένα.

Ο σκοπός αυτής της εργασίας είναι να παρουσιάσει όλα τα διαθέσιμα δημοσιευμένα και αδημοσίευτα στοιχεία για τις δύο σημαντικότερες θαλάσσιες περιοχές ψυχρών διαφυγών ρευστών στον Ελληνικό χώρο: (α) το πεδίο κρατήρων του Πατραϊκού κόλπου και (β) τις διαφυγές αερίων στην περιοχή του Κατακόλου. Το ενεργό πεδίο του Πατραϊκού έχει σε μεγάλο βαθμό καταστραφεί από την κατασκευή του Νέου Λιμένα Πατρών αποτελώντας μια σημαντική θαλάσσια γεωλογική επικινδυνότητα για αυτό ενώ στην περιοχή του Κατακόλου θα τονιστεί η χρήση των αερίων διαφυγών ως δείκτες παρουσίας ταμειυτήρων πετρελαίων ή/και αερίων στη Δυτική Ελλάδα μια από τις περισσότερο υποσχόμενες περιοχές για την παρουσία κοιτασμάτων υδρογονανθράκων (οικόπεδο «Δυτικό Κατάκολο», ΦΕΚ 76B – 27/1/2012 & Official Journal of the EU 7.3.2012/C 69/03).

2. ΨΥΧΡΕΣ ΔΙΑΦΥΓΕΣ ΡΕΥΣΤΩΝ ΑΠΟ ΤΟΝ ΠΥΘΜΕΝΑ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ, ΛΙΜΝΟΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΙ ΛΙΜΝΑΙΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΩΝ ΤΗΣ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ

Τα τελευταία είκοσι χρόνια το Εργαστήριο Θαλάσσιας Γεωλογίας και Φυσικής Ωκεανογραφίας (Ε.Θ.Α.ΓΕ.Φ.Ω), του Τμήματος Γεωλογίας του Πανεπιστημίου Πατρών σε συνεργασία με διεθνή Ινστιτούτα έχει πραγματοποιήσει έρευνες με ποικίλες μεθόδους θαλάσσιας γεωφυσικής διασκόπησης (τομογράφοι υποδομής πυθμένα τύπου 3.5 kHz, sparkler και air-gun και ηχοβολιστές πλευρικής σάρωσης) στα Αρχιπελάγη του Ιονίου και του Αιγαίου. Στις έρευνες αυτές, συχνή ήταν η ανίχνευση ποικιλίας ακουστικών χαρακτήρων του πυθμένα, που συνδέονται με διαφυγές ρευστών στα ιζήματα, αποδεικνύοντας έτσι ότι η παρουσία αερίων στους πόρους των ιζημάτων και οι διαφυγές προς την υδάτινη στήλη είναι εκτεταμένα και συχνά φαινόμενα στις Ελληνικές θάλασσες, λιμνοθάλασσες αλλά ακόμη και σε λίμνες. Ιζήματα με υψηλή συγκέντρωση αερίων έχουν εντοπιστεί σε Πλειστοκαινικά άλλα και σύγχρονα περιβάλλοντα fjords, δελταϊκές αποθέσεις, λίμνες, λιμνοθάλασσες και μεσοπέλαγα (Chronis et al., 1991, Paratheodorou et al., 1993, Paratheodorou et al., 2007a,b). Τέτοιου τύπου ιζήματα καθώς και διαφυγές αερίων έχουν διαπιστωθεί σε παράκτια περιβάλλοντα και περιβάλλοντα ανοικτής θάλασσας, ηλικίας παλαιότερης του Τεταρτογενούς και σχετίζονται με ρήγματα, ρηξιγενείς ζώνες και αλατούχο διαπυρισμό αποδίδοντας τους θερμογενή προέλευση (Paratheodorou et al., 1993). Οι Newton et al (1980) εντόπισαν για πρώτη φορά στην Ελλάδα την παρουσία κρατήρων διαφυγής ρευστών διαμέτρου μικρότερης των 25 m και βάθους μικρότερου των 3 m βορείως της νήσου Θάσου. Οι Paratheodorou et al (1993, 2001) διαπίστωσαν την παρουσία ψυχρών διαφυγών ρευστών σε μια μεγάλη ποικιλία ελληνικών περιβαλλόντων που περιλαμβάνουν δελταϊκές αποθέσεις, περιβάλλοντα τύπου fjord, (Αμβρακικός κόλπος) αποθέσεις λιμνών (Τριγωνίδα), λιμνοθαλασσών (Αιτωλικό) και ανοικτής θάλασσας (Αιγαίο και Ιόνιο πέλαγος), βασιζόμενοι στους ιδιαίτερους ακουστικούς χαρακτήρες και τις γεωμορφές όπως καταγράφηκαν σε υψηλής ανάλυσης δεδομένα τομογράφων και ηχοβολιστών πλευρικής σάρωσης. Οι ακουστικοί χαρακτήρες που είναι δηλωτικοί της παρουσίας αερίων στους πόρους των ιζημάτων περιγράφονται ως σεισμοκονιασμένες ζώνες, θύλακες αερίων, πλούμες αερίων, έντονες ανακλάσεις, στηλοειδείς διαταράξεις και ακουστικές σκιές (*λεπτομερής περιγραφή των ακουστικών χαρακτήρων δίνεται στους Paratheodorou et al., 1993 και Judd and Hovland 2007*). Μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του '90, οι έρευνες για τον προσδιορισμό της προέλευσης των ψυχρών διαφυγών αερίων βασιζόνταν αποκλειστικά στη συλλογή δεδομένων θαλάσσιας γεωφυσικής διασκόπησης. Σήμερα αυτές οι μέθοδοι συνδυάζονται με εξελιγμένες τεχνικές ανάλυσης δειγμάτων νερού/αερίων, προσφέροντας αξιόπιστες πληροφορίες για την προέλευση, την κατανομή και την κινητικότητα των αερίων στους πόρους των ιζημάτων (Etiope et al, 2006a,b). Οι αναβλύσεις γλυκού νερού σε υποθαλάσσιες θέσεις ήταν γνωστές ήδη από την αρχαιότητα (π.χ. Στράβωνας). Όμως οι δυσκολίες στη συλλογή, ανάλυση και επεξεργασία δεδομένων σε τέτοιες θέσεις έχει αποδώσει ακόμη και σήμερα λίγες πληροφορίες όσον αφορά στον ακριβή προσδιορισμό της σύνθεσης καθώς και στο ρυθμό ροής των διαφυγών αυτών. Οι Christodoulou et al (2003) μελέτησαν ένα πεδίο κρατήρων στον όρμο Ελαιώνα, στον Κορινθιακό κόλπο με τη χρήση γεωφυσικών μεθόδων διασκόπησης, επιτόπιων μετρήσεων και οπτικών παρατηρήσεων. Τα δεδομένα που προέκυψαν απέδειξαν ότι ο μηχανισμός για τον σχηματισμό των υποθαλάσσιων κρατήρων στη συγκεκριμένη περιοχή ήταν η διαφυγή γλυκού νερού. Επιπλέον συστηματική οπτική παρατήρηση του πεδίου με υποβρύχιο κατευθυνόμενο όχημα (R.O.V) συνέβαλε στον εντοπισμό μιας ιδιαίτερα πλούσιας βιοποικιλότητας, στον οικότοπο που αναπτύσσεται μέσα στους κρατήρες.

3. ΤΟ ΠΕΔΙΟ ΚΡΑΤΗΡΩΝ ΔΙΑΦΥΓΗΣ ΡΕΥΣΤΩΝ ΣΤΟΝ ΠΑΤΡΑΪΚΟ ΚΟΛΠΟ

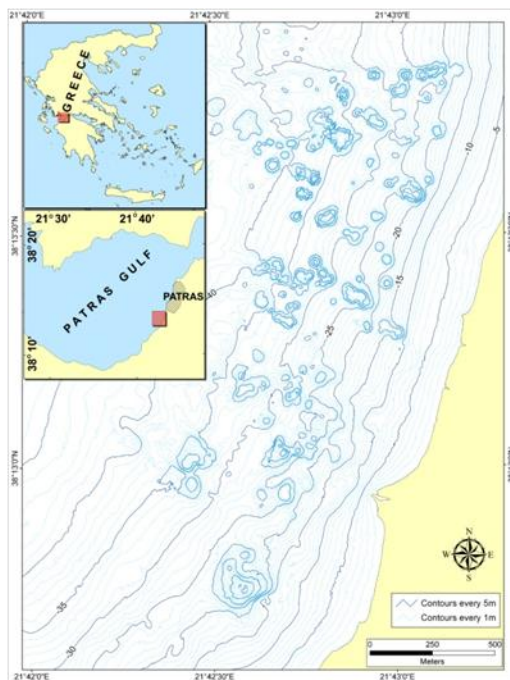
3.1. Η ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ

Το πεδίο κρατήρων του Πατραϊκού κόλπου βρίσκεται στο ανατολικό τμήμα του κόλπου, μεταξύ των ισοβαθών των 10 και 45 m και καλύπτεται πλέον σε μεγάλο βαθμό από τις εγκαταστάσεις του Νέου Λιμένα Πατρών. Υπάρχουν πολύ ισχυρά επιστημονικά δεδομένα που αποδεικνύουν ότι το πεδίο έχει ενεργοποιηθεί στο πρόσφατο παρελθόν τουλάχιστον δύο φορές, κατά τη διάρκεια δύο σεισμικών δονήσεων μεγέθους 5.4 και 6.4 Richter στις 14/7/1993 και 8/6/2008, αντίστοιχα. Οι Judd και Hovland (2007) στο βιβλίο τους “Seafloor fluid flow” αναφέρουν ότι «το πεδίο του Πατραϊκού κόλπου αντιπροσωπεύει ένα από τα πιο θεαματικά και καλύτερα πιστοποιημένα όσον αφορά την ενεργότητά τους πεδία στον κόσμο» (σελ. 230-231).

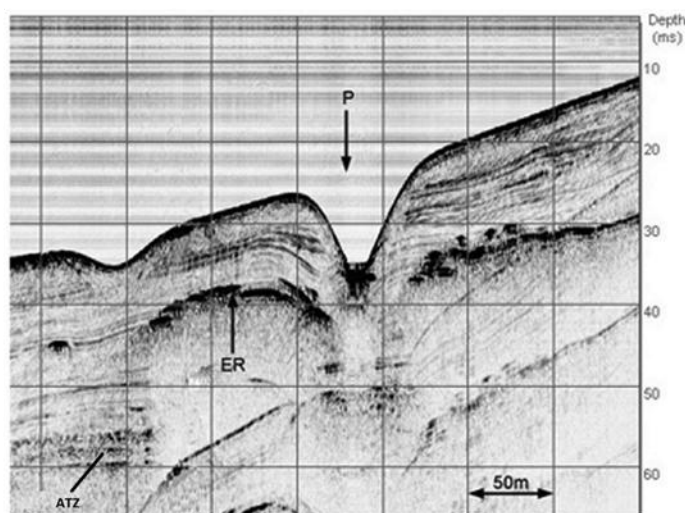
Ο Πατραϊκός κόλπος είναι ένας ημίκλειστος κόλπος που συνδέεται με το Ιόνιο Πέλαγος στη δυτική του πλευρά και με τον Κορινθιακό κόλπο μέσω των στενών Ρίου-Αντιρρίου στα ανατολικά. Η κυκλοφορία των υδάτων του κόλπου χαρακτηρίζεται από κυκλωνικούς και αντικυκλωνικούς στροβίλους η φορά των οποίων καθορίζεται από τα ισχυρά ανεμογενή παράκτια ρεύματα (Fourniotis and Horch, 2010). Το εξωτερικό, δυτικό τμήμα του κόλπου αποτελεί μια τεκτονική τάφρο μήκους περίπου 22 km και εύρους 8 km, διεύθυνσης ΔΒΔ-ΑΝΑ. Το βάθος του νερού σε αυτό το τμήμα είναι έως 135 m και ρηχαίνει προς τα νοτιοανατολικά στο στενό Ρίου- Αντιρρίου (Ferentinos et al., 1985). Η παρουσία θυλάκων αερίων στα πρόσφατα Ολοκαινικά ιζήματα και διαφυγών αερίων στην υδάτινη στήλη κατά μήκος των ρηγμάτων δηλώνει ότι τα ενεργά ρήγματα του κόλπου αποτελούν διόδους μετανάστευσης και διαφυγής των αερίων (Papatheodorou et al., 1993).

Η σύνθεση των δεδομένων μιας πολυδιάστατης έρευνας που περιελάμβανε γεωφυσική διασκόπηση υψηλής ανάλυσης με τομογράφους υποδομής πυθμένα, βυθόμετρα και ηχοβολιστές πλευρικής σάρωσης, οπτικές παρατηρήσεις με υποβρύχιο κατευθυνόμενο όχημα (ROV) και παρατηρήσεις δυτών, ιζηματολογικές και γεωχημικές αναλύσεις ιζημάτων και επιτόπιες μετρήσεις μεθανίου «έριξε φως» στο εντυπωσιακό αυτό πεδίο στον Πατραϊκό κόλπο (Hasiotis et al., 1996, Ravasopoulos et al., 2002, Christodoulou et al., 2003, Marinaro et al., 2006, Papatheodorou et al., 2007a, b, Christodoulou et al., 2009).

Το πεδίο αποτελείται από 72 κρατήρες και εκτείνεται σε μία περιοχή περίπου 2.5 km² (Σχήμα 1). Οι κρατήρες διακρίνονται σε τρεις μορφολογικές κλάσεις: (α) μοναδιαίους κρατήρες διαμέτρου 20 έως 40 m και βάθους έως 4-5 m, (β) κανονικούς (συνήθεις) κρατήρες, κυκλικού ή ωοειδούς σχήματος, η διάμετρος των οποίων κυμαίνεται από 50 έως 150 m και το βάθος τους αγγίζει τα 15 m και (γ) σύνθετους κρατήρες ακανόνιστου σχήματος που φαίνεται να αναπτύσσονται από τη συνένωση κανονικών κρατήρων (Σχήμα 1). Τομογραφίες 3.5 kHz έδειξαν την παρουσία μιας ακολουθίας πάχους 25 m με λίγους και ακουστικά ασθενείς, εσωτερικούς ανακλαστήρες να υπέρκειται μιας επιφάνειας με υψηλή ανακλαστικότητα (ΑΤΖ), η οποία φαίνεται να αποτρέπει περαιτέρω την ηχητική διείσδυση (Σχήμα 2). Η τελευταία αυτή επιφάνεια αντιπροσωπεύει το όριο Πλειστοκαίνου – Ολοκαίνου (Chronis et al., 1991, Papatheodorou et al., 1993) (Σχήμα 2). Η υψηλή ανακλαστικότητα του ορίου Πλειστοκαίνου – Ολοκαίνου, που συνοδεύεται από εμφανίσεις σεισμοκονιασμένης ζώνης (ΑΤΖ), έντονες ανακλάσεις (ΕΡ) και αναθολώσεις του πυθμένα, σε συνδυασμό με την παρουσία ανώμαλων ακουστικών χαρακτήρων στα ανώτερα 25 m των ιζημάτων συγκλίνουν στο συμπέρασμα ότι πρόκειται για επιφάνεια συσσώρευσης και συγκράτησης των αερίων από τα υποκείμενα στρώματα. Πολλοί κρατήρες εμφανίζονται σε γραμμικές διατάξεις μέσα στο πεδίο οι οποίες συμπίπτουν με επιφανειακές εμφανίσεις ρηγμάτων, γεγονός που δείχνει ότι οι ρηξιγενείς αυτές επιφάνειες αποτελούν διόδους μετανάστευσης και διαφυγής των αερίων (Christodoulou 2010).



Σχήμα 1. Λεπτομερής βυθομετρικός χάρτης του πεδίου κρατήρων του Πατραϊκού κόλπου πριν την καταστροφή του βόρειου τμήματος του από την κατασκευή του Νέου Λιμένα Πατρών.



Σχήμα 2. Τομογραφία 3.5 kHz στην οποία φαίνεται κρατήρας (P) διαφυγής ρευστών. Έντονες ανακλάσεις (ER) δηλώνουν την παρουσία ρευστών στους πόρους των ιζημάτων. Σεισμοκονιασμένη ζώνη (ATZ) στο όριο Πλειστοκαίνου-Ολοκαίνου.

3.2. Η ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΚΡΑΤΗΡΩΝ

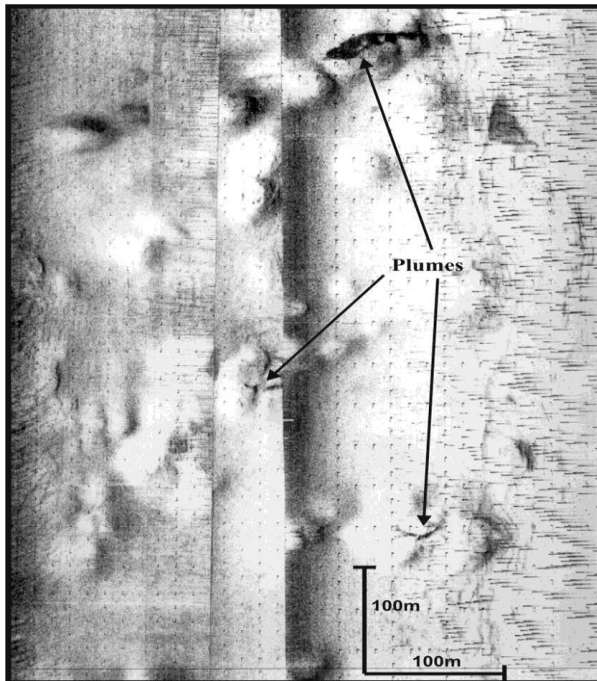
Αν και ο σχηματισμός πεδίων κρατήρων στον πυθμένα συνδέεται πάντα με διαφυγές ρευστών είναι εξαιρετικά σπάνιες οι τεκμηριωμένες αναφορές για την ενεργοποίηση πεδίων με διαφυγές των αερίων. Δύο από τις καλύτερα μελετημένες ενεργοποιήσεις παγκοσμίως είναι αυτές του πεδίου του Πατραϊκού κόλπου και συνδέονται με εκδηλώσεις σεισμών.

Στις 14 Ιουνίου 1993 και ώρα 15:32 ένας σεισμός μεγέθους 5.4 Richter σημειώθηκε στην τάφρο του Πατραϊκού κόλπου και θεωρείται ότι ήταν ο ισχυρότερος που έπλεξε την περιοχή την τελευταία 20ετία. Ένα εικοσιτετράωρο πριν την εκδήλωση του σεισμού, το θερμοσαλινόμετρο που λειτουργούσε στην περιοχή του πεδίου, κατέγραψε αυξήσεις της θερμοκρασίας από 16,8 σε 23°C. Οι αυξήσεις δεν ήταν σταδιακές αλλά απότομες και συνέβησαν σε τρία διακριτά γεγονότα. Αμέσως μετά την τρίτη αύξηση της θερμοκρασίας εκδηλώθηκε ο σεισμός. Μετά την κύρια σεισμική δόνηση πραγματοποιήθηκε μια θαλάσσια γεωφυσική διασκόπηση του πυθμένα στην παράκτια ζώνη της Πάτρας, με τη χρήση τομογράφου 3,5 kHz και ηχοβολιστή πλευρικής σάρωσης. Ακουστικές ανωμαλίες που διαπιστώθηκαν τόσο στις τομογραφίες όσο και στις ηχογραφίες και αφορούσαν στα ιζήματα του πυθμένα και στην υδάτινη στήλη αποδόθηκαν σε διαφυγές αερίων. Αρκετοί κρατήρες παρέμειναν ενεργοί («άτμιζαν») κατά τη διάρκεια της έρευνας, μερικές μέρες μετά την εκδήλωση του σεισμού, όπως διαπιστώθηκε από τα «νέφη» υψηλής ανακλαστικότητας που καταγράφηκαν στις ηχογραφίες να ανυψώνονται πάνω από τους κρατήρες (Σχήμα 3).

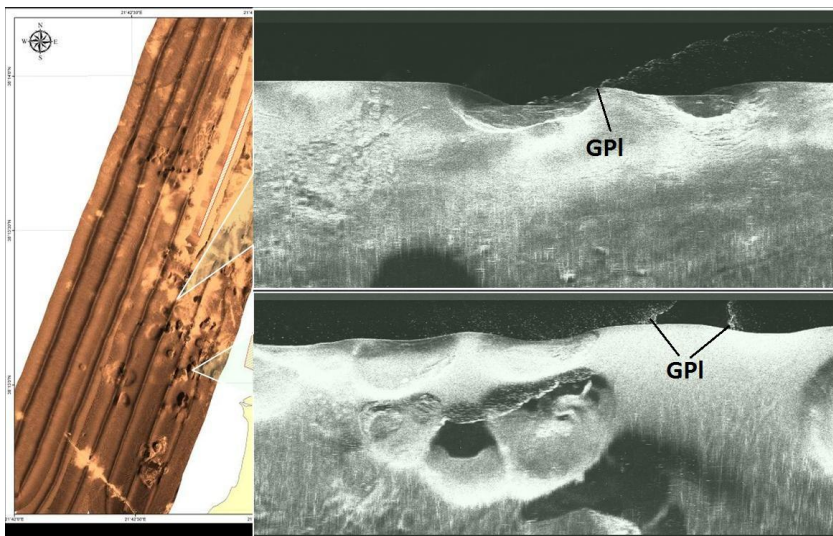
Στις 8 Ιουνίου 2008 και ώρα 12:25 ένας σεισμός μεγέθους 6.4 Richter σημειώθηκε στην Βορειο-δυτική Πελοπόννησο. Δυο μέρες μετά την κύρια σεισμική δόνηση και για μια περίοδο 15 ημερών, μια ωκεανογραφική έρευνα έλαβε χώρα στην περιοχή του πεδίου κρατήρων η οποία συνίστατο στη συστηματική συλλογή ηχογραφιών και μετρήσεων μεθανίου με σκοπό την παρακολούθηση της δραστηριότητας του πεδίου. Όπως και στην

προηγούμενη περίπτωση, στις ηχογραφίες καταγράφονταν έντονες διαφυγές αερίων πάνω από τους κρατήρες (Σχήμα 4). Τόσο ο αριθμός όσο και ο όγκος των διαφυγών σημείωνε σαφή μείωση με το πέρασμα του χρόνου. Παράλληλα οι συγκεντρώσεις του διαλυμένου μεθανίου στην υδάτινη στήλη πάνω από το πεδίο ήταν υψηλές και κυμαίνονταν από 0,308 έως 0,490 $\mu\text{mol/l}$ (Christodoulou et al., 2009).

Τα δεδομένα που συγκεντρώθηκαν από τις δύο πιο πάνω περιπτώσεις συνηγορούν στο να αποδώσουν στις σεισμικές δονήσεις το ρόλο του μηχανισμού πυροδότησης της ενεργοποίησης του πεδίου και της παροξυσμικής διαφυγής των αερίων από τους κρατήρες. Επιπλέον, η διαφυγή του αερίου φαίνεται ότι προκλήθηκε λόγω της μείωσης του όγκου του κενού των πόρων των ιζημάτων εξαιτίας της μεταβολής του πεδίου των τάσεων που ασκήθηκε σε αυτά πριν και κατά την εκδήλωση του σεισμού.



Σχήμα 3. Μωσαϊκό ηχογραφιών που συλλέχθηκε από το βόρειο τμήμα του πεδίου κρατήρων του Πατραϊκού κόλπου λίγες ημέρες μετά το σεισμό της Πάτρας μεγέθους $M=5.4R$ (1993) και στο οποίο έχουν αποτυπωθεί διαφυγές αερίων (Plumes) από τον πυθμένα συγκεκριμένων κρατήρων.

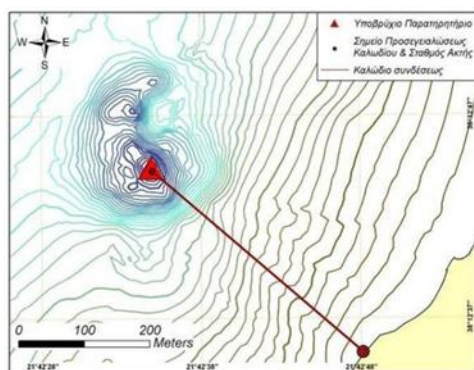


Σχήμα 4. Ηχογραφίες ηχοβολιστή πλευρικής σάρωσης που συλλέχθηκαν από το νότιο τμήμα του πεδίου κρατήρων του Πατραϊκού κόλπου δύο ημέρες μετά το σεισμό της Ανδραβίδας μεγέθους $M=6.4R$ (2008) και στις οποίες έχουν αποτυπωθεί διαφυγές αερίων (GPI) από τον πυθμένα των κρατήρων.

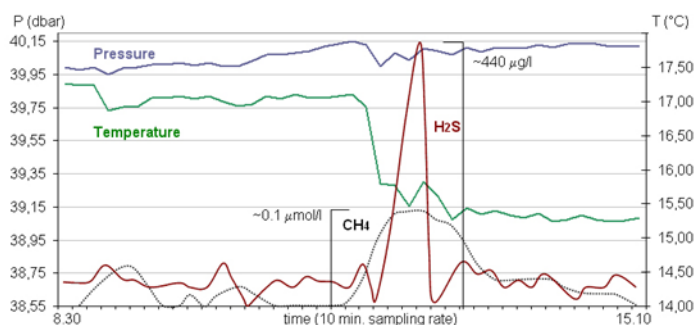
3.3. ΜΑΚΡΑΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΚΡΑΤΗΡΩΝ

Στο πεδίο κρατήρων και με βάση τα γεωφυσικά δεδομένα που είχαν συλλεγεί, επιλέχθηκαν 14 κρατήρες στους οποίους μετρήθηκαν οι συγκεντρώσεις μεθανίου στην υδάτινη στήλη με χρήση του αισθητήρα μεθανίου METS (Christodoulou et al., 2003). Οι συγκεντρώσεις υποβάθρου του διαλυμένου μεθανίου στην περιβάλλουσα περιοχή του πεδίου ήταν μεταξύ 1 και 99 nmol/l, ενώ η αντίστοιχη συγκέντρωση στο πεδίο κρατήρων κυμαίνονταν μεταξύ 3 και 235 nmol/l στην επιφάνεια της θάλασσας και από 33 έως 271 nmol/l πάνω ακριβώς από τον πυθμένα.

Οι Hovland et al. (2002) παρατηρούν ότι «.....από όσο γνωρίζουμε οι κρατήρες δεν έχουν παρακολουθηθεί με ενόργανες μεθόδους για μεγάλες χρονικές περιόδους και συνεπώς είναι δύσκολο να προσδιοριστεί ο τυπικός, συνήθης τρόπος δραστηριότητας τους». Από αυτή την παρατήρηση διαφαίνεται ότι η μακροχρόνια παρακολούθηση είναι θεμελιώδης στην κατανόηση των διεργασιών που συνδέουν τη δραστηριότητα των πεδίων κρατήρων με γεωδυναμικούς (π.χ. σεισμική δραστηριότητα), ωκεανογραφικούς (π.χ. παλίρροιες, ρεύματα, κύματα) και ατμοσφαιρικούς παράγοντες (π.χ. άνεμος, βαρομετρική πίεση). Σε αυτή τη λογική, ένας σύγχρονος σταθμός παρακολούθησης αερίου (Gas Monitoring Module, GMM) που κατασκευάστηκε στα πλαίσια του ευρωπαϊκού προγράμματος ASSEM (Array of Sensors for long-term Seabed Monitoring of geohazards) ποντίστηκε στον κρατήρα του πεδίου της Πάτρας, με τον κωδικό P4, σε βάθος 42 m και περίπου 400 m από την ακτή (Σχήμα 5) (Marinero et al., 2006). Το GMM είναι ένα πολυπαραμετρικό σύστημα μέτρησης και καταγραφής, το οποίο δίνει τη δυνατότητα να μελετηθούν οι αλληλοεπιδράσεις των διαφυγών αερίων με τις φυσικο-χημικές παραμέτρους της υδάτινης στήλης (π.χ. θερμοκρασία, πίεση, αγωγιμότητα). Η ανίχνευση και η μέτρηση της συγκέντρωσης των αερίων γίνεται με αισθητήρες CH₄ και H₂S που διαθέτει το σύστημα (Σχήμα 5). Στη συγκεκριμένη περίπτωση το πείραμα ολοκληρώθηκε σε συνολικά 201 μέρες (4824 ώρες συλλογής δεδομένων) και η παρακολούθηση πραγματοποιήθηκε σε δύο θέσεις στον ίδιο κρατήρα. Ήταν η πρώτη φορά σε παγκόσμιο επίπεδο, όπου όλες οι παραπάνω παράμετροι (συγκεντρώσεις αερίων και φυσικοχημικές παράμετροι) καταγράφονταν ταυτόχρονα σε μακροχρόνια βάση (>6 μήνες). Το πιο εντυπωσιακό αποτέλεσμα ήταν η καταγραφή μεγάλου πλήθους απότομων μειώσεων της θερμοκρασίας (T) και της πίεσης (P) του νερού (Σχήμα 6). κόλπου.



Σχήμα 5. Σχηματική αναπαράσταση της σύνδεσης του GMM με το σταθμό ξηράς και το υποθαλάσσιο παρατηρητήριο (GMM) κατά τη διάρκεια της πόντισής του στον κρατήρα P4 του πεδίου της Πάτρας.



Σχήμα 6. Τυπικό παράδειγμα διαγράμματος το οποίο δείχνει μείωση T-P και αντίστοιχη αύξηση CH₄-H₂S στον κρατήρα P4 (από Marinero et al., 2006).

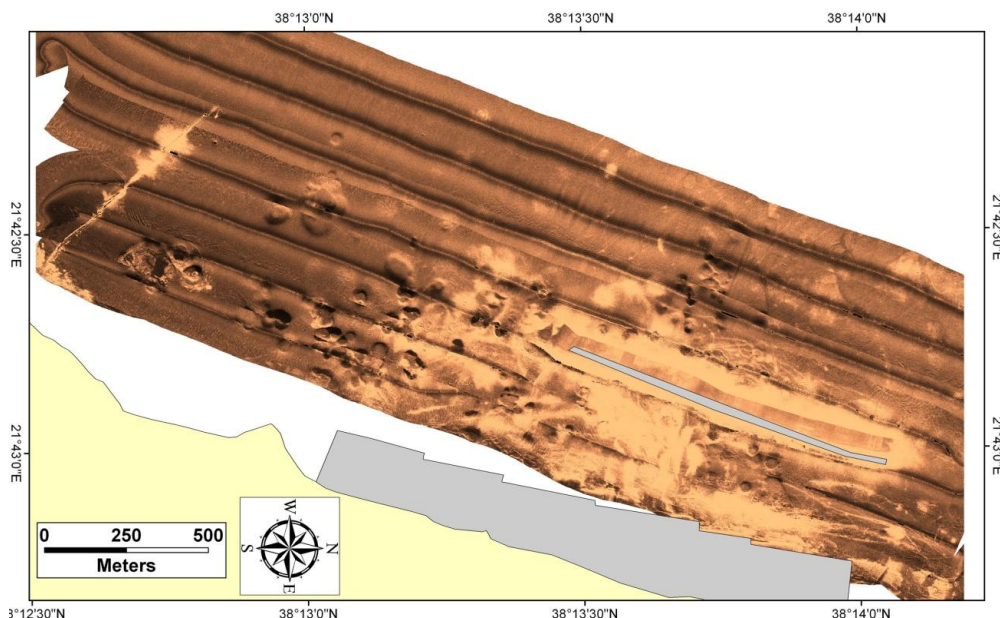
Περισσότερες από εξήντα μειώσεις, τέτοιου τύπου, καταγράφηκαν εντός του χρονικού διαστήματος παρακολούθησης των 6.5 μηνών και οι ισχυρότερες αυτών συνοδεύονταν πάντα από απότομες αυξήσεις των συγκεντρώσεων CH_4 και H_2S (Σχήμα 6). Αυτά τα μικρά γεγονότα διαφυγής CH_4 και H_2S με ταυτόχρονη μείωση της θερμοκρασίας και της πίεσης φαίνεται να είναι η τυπική, συνήθης συμπεριφορά ενός κρατήρα του πεδίου της Πάτρας. Η συνήθης αυτή συμπεριφορά διακόπτεται από παροξυσμικά γεγονότα διαφυγών αερίων τα οποία πυροδοτούνται από ισχυρούς σεισμούς που λαμβάνουν χώρα στην ευρύτερη περιοχή του Πατραϊκού

3.4. ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΑΕΡΙΩΝ

Η δειγματοληψία αερίων (in situ) από τον πυθμένα των κρατήρων δεν έχει καταστεί ακόμη δυνατή και συνεπώς ο χημισμός και η προέλευση των αερίων του πεδίου της Πάτρας παραμένει αδιευκρίνιστη. Δειγματοληψία αερίων που έλαβε χώρα στην χέρσο, στην παράκτια ζώνη της Πάτρας κοντά στο πεδίο κρατήρων έδειξε ότι τα αέρια είναι μεθάνιο μικροβιακής προέλευσης με παρουσία αιθανίου και σχηματίστηκαν σε θαλάσσιο περιβάλλον (Christodoulou, 2010). Λόγω της εγγύτητας αυτής της θέσης στο πεδίο δεν είναι άστοχο να υποστηριχθεί ότι ο σχηματισμός των κρατήρων οφείλεται σε διαφυγή ρευστών μικροβιακής προέλευσης.

3.5. ΤΟ ΠΕΔΙΟ ΚΡΑΤΗΡΩΝ ΣΗΜΕΡΑ

Ο Νέος Λιμένας Πατρών κατασκευάστηκε στο βόρειο τμήμα του πεδίου καταστρέφοντας το μεγαλύτερο αριθμό κρατήρων (Σχήμα 7). Για την έδραση του κεντρικού λιμενοβραχίονα και των λιμενικών εγκαταστάσεων ένας μεγάλος αριθμός ενεργών κρατήρων πληρώθηκε με αδρανή υλικά αποκόπτοντας έτσι τη δίοδο διαφυγής των παγιδευμένων αερίων στα υποεπιφανειακά στρώματα του πυθμένα.



Σχήμα 7. Μωσαϊκό ηχογραφιών στο οποίο αποτυπώνεται το πεδίο κρατήρων του Πατραϊκού κόλπου μετά την κατασκευή του Νέου Λιμένα Πατρών. Οι ανοιχτόχρωμοι τόνοι καταγραφής δηλώνουν τις περιοχές καταστροφής του πεδίου λόγω των έργων κατασκευής. Στο νότιο άκρο της περιοχής αποτυπώνεται ο υποθαλάσσιος αγωγός του Βιολογικού Καθαρισμού Πατρών (Οι εγκαταστάσεις του Νέου Λιμένα σημειώνονται με γκριζες περιοχές).

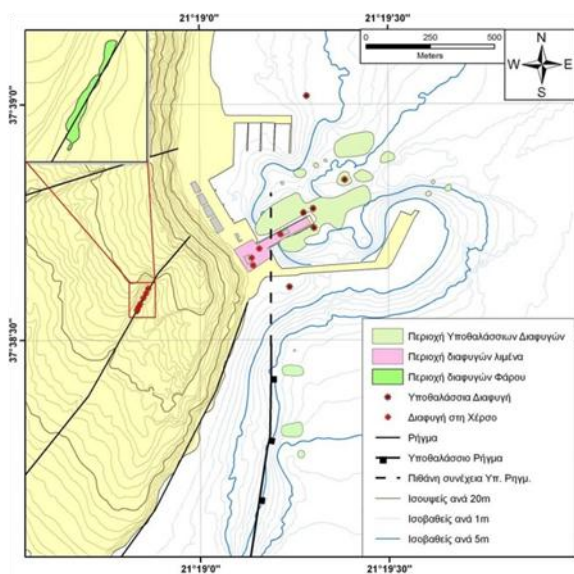
Είναι η πρώτη φορά σε παγκόσμια κλίμακα, που μια μεγάλη λιμενική εγκατάσταση κατασκευάζεται ακριβώς επάνω σε ένα ενεργό πεδίο κρατήρων και δεν υπάρχει εμπειρία σχετικά με τις πιθανές επιπτώσεις τόσο στο έργο όσο και στο πεδίο καθώς το τελευταίο είναι ένας μοναδικός γεώτοπος. Επιπλέον, σημειώνεται ότι σε κρατήρες διαφυγής ρευστών αναπτύσσονται χημειοσυνθετικές βιοκοινωνίες οι οποίες προστατεύονται από την Ευρωπαϊκή νομοθεσία (NATURA 2000, Οδηγία 92/43/ΕΟΚ. Οικότοπος 1180).

4. ΚΟΛΠΟΣ ΚΑΤΑΚΟΛΟΥ

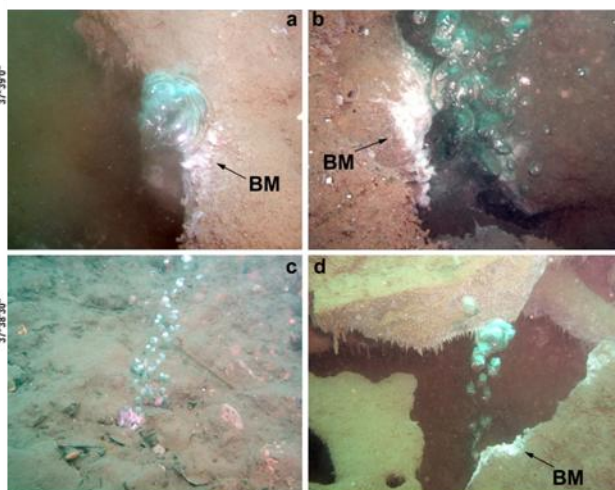
4.1. ΘΑΛΑΣΣΙΕΣ ΚΑΙ ΧΕΡΣΑΙΕΣ ΔΙΑΦΥΓΕΣ ΑΕΡΙΩΝ

Η βορειοδυτική Πελοπόννησος είναι μία από τις πιο υποσχόμενες περιοχές της Ελλάδος όσον αφορά στην παρουσία κοιτασμάτων υδρογονανθράκων. Ταμειυτήρες πετρελαίου εντοπίζονται σε βαθιά ανθρακικά πετρώματα και κλαστικές ακολουθίες ηλικίας Ιουραστικού έως Ηωκαίνου των Εξωτερικών Ελληνίδων (Kamberis et al., 2000a). Ο έντονος διαπυρισμός της περιοχής συνδέεται με επωθήσεις που αποτελούν δυνητικούς διόδους μετανάστευσης αερίων προς την επιφάνεια. Ο διαπυρισμός δεν εντοπίζεται μόνο στη χέρσο αλλά και στον πυθμένα του Ιονίου πελάγους από τη Ζάκυνθο και τη Δ. Πελοπόννησο έως την Κέρκυρα (Brooks and Ferentinos, 1984). Επιπλέον, ανοιχτά της χερσονήσου της Κυλλήνης έχει εντοπιστεί μια σειρά από πέντε μεγάλων διαστάσεων κοιλώματα που ο σχηματισμός τους συνδέεται με αλατούχο διαπυρισμό (Hasiotis et al., 2002).

Διαφυγές αερίων έχουν εντοπιστεί στο χερσαίο αλλά και το θαλάσσιο τμήμα του λιμανιού του Κατάκολου (Σχήμα 8). Οι διαφυγές των αερίων σχηματίζουν ευμεγέθεις φυσαλίδες στην υδάτινη στήλη, οι οποίες είναι διάσπαρτες σε όλη τη λιμενολεκάνη και είναι ορατές ακόμα και από την αποβάθρα. Ο Christodoulou, (2010) κατέγραψε στον πυθμένα του λιμανιού πάνω από 2500 θέσεις διαφυγών αερίων χρησιμοποιώντας ηχοβολιστή πλευρικής σάρωσης. Οπτικές παρατηρήσεις από δύτες και από υποβρύχιο κατευθυνόμενο όχημα (R.O.V.) έδειξαν ότι οι φυσαλίδες έχουν μέγεθος 20-30 cm σε διάμετρο και διαφεύγουν από ρωγμές του πυθμένα, οι οποίες είναι καλυμμένες από λευκές βακτηριακές κηλίδες (Σχήμα 9). Στη χέρσο οι διαφυγές έχουν διαπεράσει και καταστρέφει την ασφαλτόστρωση του λιμανιού του Κατάκολου.



Σχήμα 8. Γενικός χάρτης της χερσονήσου του Κατάκολου στον οποίο παρουσιάζονται οι χερσαίες και οι θαλάσσιες περιοχές διαφυγών αερίων.



Σχήμα 9. Υποβρύχιες φωτογραφίες οι οποίες δείχνουν φυσαλίδες να διαφεύγουν από τον πυθμένα ανοιχτά του Κατάκολου και λευκές βακτηριακές κηλίδες (*Beggiatoa sp.*) (BM) να αναπτύσσονται γύρω από τα σημεία διαφυγής.

Άλλες εντυπωσιακές διαφυγές αερίων εμφανίζονται στη χέρσο, στη βάση ενός λόφου, περίπου 0.5 km βόρεια του λιμανιού (Σχήμα 8). Σε αυτή την περιοχή, που ονομάζεται Φάρος, υπάρχει μια επιμήκης μορφολογική καταβύθιση μήκους περίπου 100 m στην οποία λαμβάνουν χώρα έντονες διαφυγές αερίων. Μερικές από αυτές τις διαφυγές μπορούν εύκολα να αναφλεγούν (π.χ. με έναν αναπτήρα) και να αποδώσουν φλόγες ύψους περίπου 20 cm. Αυτές οι διαφυγές στην περιοχή του Φάρου δεν μπορούν να θεωρηθούν ως λασπούχο ηφαίστειο, όπως οι ντόπιοι το αποκαλούν, καθώς δεν διαπιστώνεται ούτε έκλυση λάσπης ούτε η χαρακτηριστική κωνική γεωμορφολογία.

Στην χερσόνησο του Κατάκολου έχει υπολογιστεί ότι οι υψηλότερες ροές των μακροδιαφυγών των αερίων αγγίζουν τα $285,000 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ στην περιοχή του Φάρου και τα $165,000 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ στο λιμάνι. Συγκεκριμένα στην περιοχή του Φάρου, μια έκταση περίπου 800 m^2 ιλυώδους εδάφους χωρίς φυτοκάλυψη παρουσιάζει ροές αερίων της τάξης των 10^3 - $10^5 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Με βάση αυτές τις τιμές, η περιοχή του Φάρου είναι η μεγαλύτερη χερσαία περιοχή διαφυγής μεθανίου που έχει αναφερθεί ποτέ στην Ελλάδα. Στην αποβάθρα του λιμανιού εκεί που η άσφαλτος έχει καταστραφεί από διαρροές αερίου, οι ροές είναι της τάξης των 10^3 - $10^4 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$.

Οι μακρο- και μικροδιαφυγές στην περιοχή του Κατάκολου και της ευρύτερης περιοχής οφείλονται στον τεκτονισμό των αλατούχων διαπύρων και την ανάπτυξη ρηξιγενών και άλλων «ασθενών» ζωνών κατά μήκος των οποίων, αέρια όπως το CH_4 και το H_2S μεταναστεύουν προς την επιφάνεια. Ο διαπυρισμός στη χερσόνησο του Κατάκολου είναι ενεργός και επηρεάζει τις υπερκείμενες ακολουθίες αναπτύσσοντας συνιζηματογενή ρήγματα και σύνθετες ρηξιγενείς δομές (flower structure), με αποτέλεσμα να έχει σχηματιστεί ένας σημαντικός αριθμός από δομές εφελκυσμού διεύθυνσης Α-Δ έως ΔΒΔ-ΑΝΑ. Οι διαφυγές αερίων στο λιμάνι του Κατάκολου θα μπορούσαν να προκαλέσουν σοβαρούς κινδύνους στην ανθρώπινη υγεία αλλά και στις εγκαταστάσεις του λιμανιού (Etiope et al., 2006a). Το μεθάνιο διαφεύγει σε ποσότητες ικανές να προκαλέσουν έκρηξη και τα επίπεδα του H_2S είναι άνω των επιτρεπτών ορίων για την εμφάνιση τοξικολογικών ασθενειών.

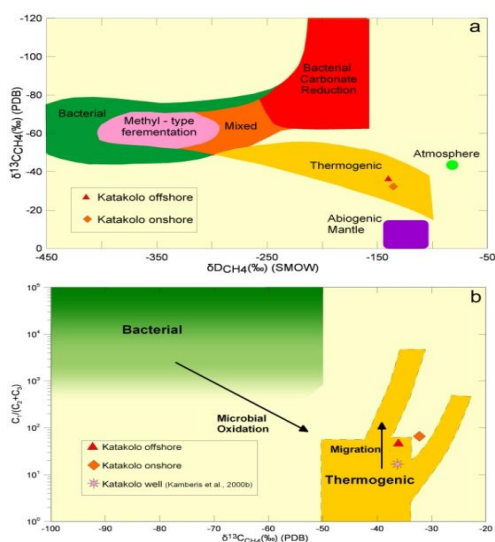
4.2. ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΑΕΡΙΩΝ

Χημικές αναλύσεις έδειξαν ότι οι διαφυγές αερίων στη περιοχή του Κατάκολου περιέχουν άνω του 85% CH_4 (Etiope et al., 2006b). Η συγκέντρωση του CH_4 ήταν περίπου 9% σε ένα δείγμα εδάφους 10 cm κάτω από την επιφάνεια της ασφάλτου στο λιμάνι ενώ σε άλλες διαφυγές από τον πυθμένα του λιμανιού η συγκέντρωση του CH_4 ήταν 40% (Etiope et al., 2006b). Οι συγκεντρώσεις του H_2S στο Κατάκολο είναι της τάξης των εκατοντάδων έως χιλιάδων ppmv ενώ σημαντικές είναι οι συγκεντρώσεις και άλλων ελαφρών υδρογονανθράκων όπως το αιθάνιο, προπάνιο, ισοβουτάνιο και C_6 αλκανίων.

Το μεθάνιο στην περιοχή του Κατάκολου είναι σαφώς θερμογενούς προέλευσης, όπως αποδεικνύεται από τα $\delta^{13}\text{C}$ και δD ισότοπα και την προβολή του λόγου $\text{C1}/(\text{C2} + \text{C3})$ στα διαγράμματα “Schoell” και “Bernard” (Σχήμα 10) (Schoell, 1980; Whiticar, 1999). Τα αποτελέσματα αυτά είναι απολύτως συμβατά με αυτά των Kamberis et al (2000b) για ένα δείγμα αερίου που συλλέχθηκε από γεώτρηση και σε βάθος 2376 m. Οι διαφυγές του Κατάκολου έχουν υψηλότερες τιμές του λόγου $\text{C1}/(\text{C2} + \text{C3})$ ως αποτέλεσμα της μοριακής κλασματοποίησης κατά τη διάρκεια της μετανάστευσης τους. Το CH_4 που ανέρχεται διαμέσου των εδαφών έχει ελαφρώς υψηλότερες τιμές $\delta^{13}\text{C}$ σε σχέση με τα υπόλοιπα δείγματα, πιθανώς λόγω κλασματοποίησης με την οξείδωση του μεθανίου από βακτήρια καθώς αυτά τείνουν να καταναλώνουν περισσότερο $^{12}\text{CH}_4$ από ότι $^{13}\text{CH}_4$.

Το μεθάνιο δρα ως αέριο κομιστής για το H_2S του οποίου ο σχηματισμός πρέπει να σχετίζεται με την κηροζίνη, το πετρέλαιο ή/και τους σχηματισμούς των ανυδριτών. Γενικώς το H_2S στους ταμειυτήρες πετρελαίου είναι δυνατό να προέρχεται από τρεις διεργασίες: τη

βακτηριακή αναγωγή του θείου (BSR), τη θερμική αποικοδόμηση των θειικών συστατικών της κηροζίνης ή του πετρελαίου και τη θερμοχημική αναγωγή του θείου (TSR). Στην περιοχή του Κατάκολου μόνο η τελευταία διαδικασία, η TSR, είναι ικανή να παράξει υψηλή ποσότητα H_2S και επιπροσθέτως είναι η κυρίαρχη διεργασία όταν εβαπορίτες (κυρίως ανυδρίτες) βρίσκονται σε επαφή με ασβεστόλιθους σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των $120^\circ C$ (Worden et al., 1995). Η υψηλή ποσότητα του H_2S στους Ιουρασσιικούς ασβεστόλιθους της ΒΔ-ικής Πελοποννήσου (πάνω από 10% σε βάθος 2500 m, Kamberis et al., 2000b) και η παρουσία των ανυδριτών υποστηρίζουν περαιτέρω την TSR ως την πιθανότερη διεργασία σχηματισμού του H_2S στην περιοχή του Κατάκολου.



Σχήμα 10. Διαγράμματα ταξινόμησης μεθανίου (a) με βάση το $\delta^{13}C_{CH_4}$ έναντι δD_{CH_4} (“Schoell” διάγραμμα), και (b) με βάση τη $\delta^{13}C_{CH_4}$ έναντι της μοριακής σύστασης των αερίων υδρογονανθράκων (“Bernard” διάγραμμα).

Η μακροχρόνια παρακολούθηση του πεδίου κρατήρων του Πατραϊκού κόλπου σε συνδυασμό με τα γεγονότα ενεργοποίησης του λόγω σεισμών έδειξαν ότι το πεδίο σχηματίστηκε από συστηματικές αλλά μικρές διαφυγές αερίων πιθανώς μικροβιακής προέλευσης, οι οποίες για σύντομα χρονικά διαστήματα διακόπτονταν από παροξυσμικές διαφυγές λόγω σεισμικής δραστηριότητας. Ο Νέος Λιμένας Πατρών κατασκευάστηκε ακριβώς επάνω στο πεδίο και κατέστρεψε ένα μεγάλο αριθμό ενεργών κρατήρων. Για το λόγο αυτό το πεδίο αποτελεί μια σημαντική θαλάσσια γεωλογική επικινδυνότητα για τις εγκαταστάσεις του λιμένα και την ασφαλή λειτουργία του.

Στη θαλάσσια και χερσαία περιοχή του Κατακόλου έχουν διαπιστωθεί και μελετηθεί συστηματικά οι μεγαλύτερες διαφυγές αερίων στον Ελληνικό χώρο και από τις μεγαλύτερες στον Ευρωπαϊκό. Ισοτοπικές και χημικές αναλύσεις αερίων έδειξαν ότι αυτά είναι κυρίως μεθάνιο (85%) ενώ σημαντική ήταν η συμμετοχή σε αυτά του υδροθείου και άλλων ελαφρών υδρογονανθράκων όπως το αιθάνιο, προπάνιο, ισοβουτάνιο και C6 αλκανίων. Οι υψηλότερες ροές των μακροδιαφυγών των αερίων αγγίζουν τα $285,000 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ στην χερσαία περιοχή του Φάρου και τα $165,000 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ στο λιμάνι του Κατακόλου. Τα αέρια του Κατακόλου είναι σαφώς θερμογενούς προέλευσης και συνδέονται με τα κοιτάσματα υδρογονανθράκων της περιοχής. Το μεθάνιο διαφεύγει σε ποσότητες ικανές να προκαλέσουν έκρηξη ενώ τα επίπεδα του H_2S είναι άνω των επιτρεπτών ορίων για την ανάπτυξη τοξικολογικών ασθενειών.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι έρευνες των οποίων τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε αυτό το άρθρο πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο τριών Ευρωπαϊκών Προγραμμάτων (ASSEM, contr. EVK3-CT2001-00051, PYTHAGORAS II. Social Funds, HYPOX project EC Grant 226126,

ENV.2008.4.1.2.1, FP7) και αυτοχρηματοδοτούμενων προγραμμάτων του Εργαστηρίου Θαλάσσιας Γεωλογίας και Φυσικής Ωκεανογραφίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Brooks, M. and Ferentinos, G., 1984. *Tectonics and sedimentation in the Gulf of Corinth and the Zakynthos and Kefallinia channels, Western Greece*. Tectonophysics, 101 (1-2): 25-54.
- Christodoulou D., 2010. *Geophysical, geotechnical, sedimentological and remote sensing monitoring of active pockmark fields in high seismicity region, Western Greece*. PhD dissertation, Dept. of Geology, University of Patras. p. 296.
- Christodoulou D., Papatheodorou G., Ferentinos G., Masson M., 2003. *Active seepage in two contrasting pockmark fields in Patras and Corinth Gulfs, Greece*. Geo-Marine Letters, 23: 194-199.
- Christodoulou D., Papatheodorou G., Fakiris E., Etiopie G., Ferentinos G., 2009. *The activation of the Patras gulf pockmark field triggered by the June 8, 2008 earthquake*. In Proceedings of 9th Panhellenic Symposium of Oceanography and Fisheries, pp. 3-8.
- Chronis, G., Piper, D.J.W., Anagnostou, G., 1991. *Late quaternary evolution of the Gulf of Patras, Greece: tectonism, deltaic sedimentation and sea level change*. Marine Geology, 97: 191-209.
- Etiopie, G., 2004. *GEM – Geologic Emissions of Methane, the missing source in the atmospheric methane budget*. Atmospheric Environm., 38, 19: 3099-3100.
- Etiopie, G., Milkov, A.V., 2004. *A new estimate of global methane flux from onshore and shallow submarine mud volcanoes to the atmosphere*. Environm. Geology, 46: 997-1002.
- Etiopie G., Papatheodorou G., Christodoulou D., Favali P., Ferentinos G., 2006a. *Gas hazard induced by methane and hydrogen sulfide seepage in the NW Peloponnesus petroliferous basin (Greece)*. Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences, 16,4: 1-7.
- Etiopie G., Papatheodorou G., Christodoulou D., Favali P., Ferentinos G., Sokos E., 2006b. *Methane and hydrogen sulfide seepage in the NW Peloponnesus petroliferous basin (Greece): origin and geohazard*. AAPG Bulletin, 90, 5: 701-713.
- Etiopie G., Ciccioli P., 2009. *Earth's degassing – A missing ethane and propane source*. Science, 323, 5913, 478, doi: 10.1126/science.1165904.
- Ferentinos, G., Brooks, M., Doutsos, T., 1985. *Quaternary tectonics in the Gulf of Patras, western Greece*. J. Struct. Geol., 7 (6): 713- 717.
- Fourniotis N. T. H. and Horsch G. M., 2010. *Three-dimensional numerical simulation of wind-induced barotropic circulation in the Gulf of Patras*. Ocean Engineering, 37, 4: 355-364.
- Hasiotis T., Papatheodorou G., Kastanos N., Ferentinos G., 1996. *A pock-mark field in the Patras Gulf (Greece) and its activation during the 14/7/1993 seismic event*. Marine Geology, 130: 333-344.
- Hasiotis, T., G. Papatheodorou, Ferentinos, G., 2002. *A string of large and deep gas-induced depressions (pockmarks) offshore of Killini Peninsula, Western Greece*. Geo-Marine Letters, 22: 142-149.
- Hovland, M., Gardner, J.V., Judd, A.G., 2002. *The significance of pockmarks to understanding fluid flow processes and geohazards*. Geofluids, 2: 127-136.

- Judd, A., Hovland, M., 2007. *Seabed Fluid Flow. The impact on Geology, Biology and the Marine Environment*. Cambridge University Press, Cambridge CB2 2RU, UK, 475pp, (www.cambridge.org/9780521819503).
- Kamberis, E., C. Ioakim, S. Tsaila-Monopolis, F. Marnelis, Sotiropoulos, S., 2000a. *Geodynamic and palaeogeographic evolution of the Ionian area (W. Greece) during Upper Cenozoic*. Geological Society of Greece, Special Publications, 9: 109-120.
- Kamberis, E., N. Rigakis, S. Tsaila-Monopolis, C. Ioakim, Sotiropoulos, S., 2000b. *Shallow biogenic gas-accumulations in Late Cenozoic sands of Katakolon peninsula, Western Greece*. Geological Society of Greece, Special Publications, 9: 121-138.
- Marinero G., Etiope G., Lo Bue N., Favali P., Papatheodorou G., Christodoulou D., Furlan F., Gasparoni F., Ferentinos G., Masson M., Rolin J.F., 2006. *Monitoring of a methane-seeping pockmark by cabled benthic observatory (Patras Gulf, Greece)*. Geo-Mar. Letters, doi: 10.1007/s00367-006-0040-4.
- Newton, R., Cunningham, R. Schubert, C., 1980. *Mud volcanoes and pockmarks: seafloor engineering hazards or geological curiosities?* Offshore Technol. Conf. (Houston, Texas) Pap. 3729, pp. 425-435.
- Papatheodorou G., Hasiotis T., Ferentinos G., 1993. *Gas charged sediments in the Aegean and Ionian Seas, Greece*. Marine Geology, 112: 171-184.
- Papatheodorou G, Lavrentaki M, Mourelatos P, Voutsinas K, Xenos K., 2001. *Pockmarks on the seabed of the Aetoliko Lagoon, Greece*. Fishing News, 238: 73-87.
- Papatheodorou G., Christodoulou D., Ferentinos G., 2007a. *Gas charged sediments and associated seabed morphological features in the Aegean and Ionian seas, Greece*. Contribution 13 In: “*Seabed Fluid Flow. The impact on Geology, Biology and the Marine Environment*” by Alan Judd and Martin Hovland, Cambridge University Press, Cambridge CB2 2RU, UK, pp. 475.
- Papatheodorou G., Christodoulou D., Geraga M., Etiope G., Ferentinos G (2007b). *The pockmark field of the Gulf of Patras: An ideal natural laboratory for studying seabed fluid flow*. In: Zelilidis, A., Papatheodorou, G. and Geraga, M. (editors): *Sedimentology of western and central Greece from recent to Triassic*. 25th IAS Meeting of Sedimentology, Patras, 2007, Field Trip Guidebook, pp. 43-62.
- Ravasopoulos, J., Papatheodorou, G., Kapolos, J., Geraga, M., Koliadima, A., Xenos K., 2002. *A promising methodology for the detection of pockmark activation in nearshore sediments, Gulf of Patras (W. Greece)*. Instrumentation Science and Technology, 30, 2:139-155.
- Schoell, M., 1980. *The hydrogen and carbon isotopic composition of methane from natural gases of various origins*. Geochimica et Cosmochimica Acta, 44: 649-661.
- Whiticar, M. J., 1999. *Carbon and hydrogen isotope systematics of bacterial formation and oxidation of methane*. Chemical Geology, 161: 291-314.
- Worden, R.H., P. C. Smalley, Oxtoby N. H., 1995. *Gas souring by thermochemical sulfate reduction at 140°C*. AAPG Bulletin, 79: 854-863.

Z

ΓΕΩΡΓΙΚΗ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ

ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΣΥΝΘΕΤΟΥ ΣΥΜΒΙΒΑΣΤΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΦΡΑΓΜΑ ΟΛΥΝΘΙΟΥ.

Χ. Τζιμόπουλος¹, Χ. Ευαγγελίδης¹, Β. Μπαλιώτη¹

¹Τομέας Συγκοινωνιακών και Υδραυλικών Έργων, Τμήμα Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, Α.Π.Θ., 54124, Θεσσαλονίκη
tzimop@eng.auth.gr, evan@vergina.eng.auth.gr, vasilikimpalioti@hotmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα έρευνα εφαρμόζεται η θεωρία της πολυκριτηριακής ανάλυσης με χρήση σύνθετου συμβιβαστικού προγραμματισμού (composite compromise programming), με κύριο σκοπό την επιλογή της βέλτιστης θέσης και τύπου φράγματος στον Ολύνθιο ποταμό του Νομού Χαλκιδικής. Οι εναλλακτικές λύσεις ή προτάσεις βαθμολογήθηκαν σε σχέση με τα κριτήρια αυτά. Ως βέλτιστη επιλογή θεωρήθηκε εκείνη που ικανοποιούσε κατά το δυνατόν τα περισσότερα προεπιλεγμένα κριτήρια. Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι τα κριτήρια αυτά βαθμονομήθηκαν με ορισμένες προτιμήσεις (βάρη) μεταξύ τους, οι οποίες προέκυψαν από την αναλυτική ιεραρχική διαδικασία (AHP) κατά Saaty. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής αυτής συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα που προέκυψαν από πόρισμα του Εργαστηρίου Γενικής και Γεωργικής Υδραυλικής και Βελτιώσεων του Α.Π.Θ. για το φράγμα Ολύνθιου.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Πολυκριτηριακή ανάλυση, σύνθετος προγραμματισμός, συμβιβαστικός προγραμματισμός, φράγμα Ολύνθιου, επιλογή θέσης φράγματος.

MULTI-CRITERIA ANALYSIS USING COMPOSITE COMPROMISE PROGRAMMING. APPLICATION IN OLYNTHIOS DAM.

C. Tzimopoulos¹, C. Evangelides¹, V. Balioti¹

¹Department of Transportation and Hydraulic Engineering, School of Rural & Surveying Engineering, Faculty of Engineering, A.U.TH., Thessaloniki 54124
tzimop@eng.auth.gr, evan@vergina.eng.auth.gr, vasilikimpalioti@hotmail.com

ABSTRACT

In this research the multi-criteria analysis is applied, using composite compromise programming, for obtaining the optimal station and type of dam at Olynthios river in Chalkidiki. For the optimization process certain criteria have been imposed for each alternative and as optimal solution was considered the alternative that satisfied mostly the selected criteria. Besides, the importance of each criterion is considered and the Saaty (1980) hierarchical process was applied for the assessment of the weights. A comparison is made between the results of this application and those of the Laboratory of General and Agricultural Hydraulics and Land Reclamation, A.U.Th. for Olynthios river dam.

KEY WORDS: Multi-criteria analysis, composite programming, compromise programming, Olynthios dam, dam site selection

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο Ν. Χαλκιδικής αντιμετωπίζει έντονο πρόβλημα εξασφάλισης των απαραίτητων υδατικών πόρων για την κάλυψη των αναγκών του. Ιδιαίτερα έντονο παρουσιάζεται το πρόβλημα στο νότιο παραθαλάσσιο τμήμα αυτού, λόγω της τουριστικής ανάπτυξης. Σύμφωνα με εθνικές προτάσεις που έχουν ξεκινήσει το 1995 και αφορούν στην υλοποίηση ενός ολοκληρωμένου προγράμματος διαχείρισης, προβλέπεται η κατασκευή τριών φραγμάτων για την κάλυψη των αναγκών της περιοχής.

Στο παρόν άρθρο εξετάζεται η χωροθέτηση ενός εκ των ανωτέρω φραγμάτων, του φράγματος Ολυνθίου. Το 2007 στα πλαίσια σχετικής πρωτοβουλίας το Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε. ανέθεσε μεταξύ άλλων στο Εργαστήριο Γενικής και Γεωργικής Υδραυλικής και Βελτιώσεων του Α.Π.Θ. τη συγκριτική αξιολόγηση των τριών θέσεων «Τσαούση – Μύλος», «Ψαλίδα» και «Λουζίκι» (Καραμούζης κ. άλ., 2008).



Σχήμα 1: Διάταξη των τριών εναλλακτικών θέσεων του φράγματος Ολύνθιου.

Σκοπός του άρθρου αυτού είναι η επιλογή της βέλτιστης θέσης και του τύπου φράγματος, με χρήση της πολυκριτηριακής ανάλυσης και συγκεκριμένα του σύνθετου συμβιβαστικού προγραμματισμού (composite compromise programming) και σύγκριση των αποτελεσμάτων της μεθόδου με τα εξαγόμενα από το παραπάνω εργαστήριο. Η διαδικασία του σύνθετου προγραμματισμού για την επιλογή θέσης προτείνεται και από άλλους συγγραφείς (Pantounakis and Manoliadis, 2008).

2. ΣΥΝΘΕΤΟΣ ΣΥΜΒΙΒΑΣΤΙΚΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ

Ο σύνθετος συμβιβαστικός προγραμματισμός (Bardossy and Duckstein, 1992) αποτελεί μία πολυκριτηριακή μέθοδο πολλών επιπέδων (ή ιεραρχική), στην οποία ο

αλγόριθμος του συμβιβαστικού προγραμματισμού εφαρμόζεται διαδοχικά σε διαφορετικά επίπεδα (σε αντίθεση με τον απλό συμβιβαστικό προγραμματισμό που χρησιμοποιεί ένα μόνο επίπεδο), έως ότου το γενικό πολυκριτηριακό πρόβλημα με n εναλλακτικές δραστηριότητες του n -διάστατου χώρου R^n , μετασχηματιστεί σε πρόβλημα μιας δραστηριότητας. Η ιεραρχική δομή του σύνθετου συμβιβαστικού προγραμματισμού παρέχει μία μέθοδο ανάλυσης του n -διάστατου χώρου σε σειρές μικρότερων διαστάσεων. Ο μετασχηματισμός αυτός γίνεται βήμα προς βήμα, ανασυντάσσοντας σε κάθε επίπεδο τις συναρτήσεις $f_i(X_j)$ που παριστάνουν την τωρινή επιτευχθείσα βαθμολογία, ή επίπεδα βαθμολογίας, των εναλλακτικών δραστηριοτήτων X_j για το i κριτήριο.

Η χρησιμοποιηθείσα μεθοδολογία συνίσταται στην ανάλυση της πεπλεγμένης διαδικασίας σε στοιχειώδεις συνιστώσες που καλούνται δείκτες επίδοσης (performance indices), (Lee et al, 1992). Μετά την ταυτοποίηση των βασικών δεικτών αρχίζει η διαδικασία του μοντέλου του σύνθετου προγραμματισμού. Οι βασικοί δείκτες επίδοσης είναι:

$$S_{i,j} = \frac{f^* - f_i}{f^* - f_*} \quad (2.1)$$

όπου:

f^* = η ιδανική τιμή του κριτηρίου x^i για την εναλλακτική X_k ,
 f_* = η χειρότερη τιμή του κριτηρίου x^i για την εναλλακτική X_k ,
 f_i = η τρέχουσα τιμή του κριτηρίου x^i για την εναλλακτική X_k .

Ο δείκτης i αντιστοιχεί στο κριτήριο x^i , ενώ ο δείκτης j αντιστοιχεί στην ομάδα j . Οι δείκτες επίδοσης εντάσσονται σε κάθε επίπεδο n σε ομάδες με όμοια χαρακτηριστικά και το αρχικό σύνολο των δεικτών που προκύπτει από την σύνταξη βασικών δεικτών αποτελεί τους δείκτες n επιπέδου. Στη συνέχεια οι τιμές δεικτών του $n-1$ επιπέδου, οι λεγόμενοι σύνθετοι δείκτες υπολογίζονται με βάση τις τιμές δεικτών των βασικών δεικτών:

$$L_{j,\ell-1}(X_k) = \left\{ \sum_{i=1}^{n_j} w_{i,j} S_{i,j,\ell}^p \right\}^{1/p} \quad (2.2)$$

Η παραπάνω διαδικασία συνεχίζεται μέχρι το τελευταίο επίπεδο και σε κάθε νέο επίπεδο $\ell - 1$ οι σύνθετοι δείκτες του προηγούμενου επιπέδου ℓ χρησιμεύουν ως βασικοί δείκτες στο επίπεδο αυτό.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η παραπάνω διαδικασία καθορίζει σε κάθε επίπεδο τους σύνθετους δείκτες, οι οποίοι αποτελούν ενδιάμεσες τιμές των υποκριτηρίων του επιπέδου ℓ και οι οποίοι μετατρέπονται σε δείκτες επίδοσης για το επίπεδο $\ell - 1$. Στο τελευταίο στάδιο υπολογίζονται οι μετρικές σχέσεις με το ιδεατό σημείο από τον τύπο:

$$L_{j,1}(X_k) = \left\{ \sum_{i=1}^{n_j} w_{i,j}^p (1 - S_{i,j,2})^p \right\}^{1/p} \quad (2.3)$$

Από τον τύπο αυτό θα προκύψουν οι τρεις μετρικές L_1 , L_2 , L_∞ και συνεπώς η τελική κατάταξη των εναλλακτικών δραστηριοτήτων. Ο εκθέτης p ονομάζεται

παράγοντας ισορροπίας (balancing factor) και επιλέγεται κάθε φορά μια διαφορετική τιμή για κάθε ομάδα. Ισχύει: $1 \leq p < \infty$. Σε ότι αφορά τα βάρη, στο παρόν άρθρο χρησιμοποιήθηκε η θεωρία του Saaty (1980), η οποία παρουσιάζεται συνοπτικά παρακάτω.

3. ΚΛΙΜΑΚΑ SAATY

Ο Saaty ανέπτυξε μια διαδικασία με την οποία προσδιορίζεται η κλίμακα του λόγου ενδιαφέροντος για ένα σύνολο στοιχείων, βασισμένη σε συγκρίσεις κατά ζεύγη. Για τις συγκρίσεις αυτές, ανέπτυξε την ακόλουθη κλίμακα έκφρασης της προτίμησης (Saaty, 1980).

Πίνακας 1: Η θεμελιώδης κλίμακα για συγκρίσεις ανά ζεύγη.

Ένταση προτίμησης	Ορισμός	Εξήγηση
1	Ίση προτίμηση	Τα δύο στοιχεία συνεισφέρουν εξίσου στο στόχο.
3	Ασθενής προτίμηση	Η πείρα και η κρίση ευνοούν ελαφρώς το ένα στοιχείο έναντι του άλλου.
5	Ισχυρή προτίμηση	Η πείρα και η κρίση ευνοούν ισχυρά το ένα στοιχείο έναντι του άλλου
7	Πολύ ισχυρή προτίμηση	Το ένα στοιχείο ευνοείται πολύ ισχυρά έναντι του άλλου, η υπεροχή του είναι προφανής
9	Ακραία προτίμηση	Η υπεροχή του ενός στοιχείου έναντι του άλλου είναι του ισχυρότερου δυνατού βαθμού

Οι εντάσεις προτίμησης βαθμών 2,4,6 και 8, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ενδιάμεσες καταστάσεις.

Για να υπολογιστούν οι τελικές προτεραιότητες των κριτηρίων γίνονται συγκρίσεις μεταξύ των κριτηρίων κατά ζεύγη. Με τον τρόπο αυτόν δημιουργείται ένα μητρώο σύγκρισης από το οποίο είναι δυνατόν να ανακτηθούν τα βάρη των κριτηρίων.

4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΣΥΝΘΕΤΟΥ ΣΥΜΒΙΒΑΣΤΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ

Η επιλογή της καταλληλότερης θέσης μεταξύ των τριών τοποθεσιών και του τύπου φράγματος (συνολικά πέντε εναλλακτικές δραστηριότητες) θα γίνει με τα εξής κύρια κριτήρια:

1. Υδατικό ισοζύγιο
2. Γεωλογική καταλληλότητα

3. Περιβαλλοντικές επιπτώσεις
4. Κόστος

Σε κάθε κύριο κριτήριο εντάσσονται υποκριτήρια ως ακολούθως:

1^η Ομάδα- Υδατικό ισοζύγιο

1. Όγκος ταμίευσης
2. Λόγος $V_{\text{μέσης απορροής}} / V_{\text{ταμίευσης}}$

2^η Ομάδα- Γεωλογική καταλληλότητα

1. Στεγανότητα στον άξονα του φράγματος
2. Λεκάνη κατάκλυσης
3. Ευστάθεια στον άξονα του φράγματος
4. Ευστάθεια των πρανών της λεκάνης κατάκλυσης
5. Επάρκεια των υλικών αργιλικού και αμμοχάλικων
6. Απόσταση των δανειοθαλάμων

3^η Ομάδα- Περιβαλλοντικές επιπτώσεις

1. Απώλεια γεωργικής γης
2. Μέση ετήσια υπερχείλιση
3. Αρχαιότητες
4. Φυσικό περιβάλλον

4^η Ομάδα- Κόστος

1. Αξιοποίηση του ενεργειακού δυναμικού
2. Συνολική δαπάνη του έργου

Εναλλακτικές δραστηριότητες:

1. Θέση Τσαούση Μύλος – Λιθόρριπτο φράγμα
2. Θέση Ψαλίδα – Λιθόρριπτο φράγμα
3. Θέση Ψαλίδα – Λιθόρριπτο φράγμα με επένδυση του δεξιού αντερείσματος
4. Θέση Λουζίκι – Λιθόρριπτο φράγμα
5. Θέση Λουζίκι – Φράγμα RCC

Ακολουθούν οι πίνακες υπολογισμού των βαρών, των βασικών και σύνθετων δεικτών, με βάση τους τύπους (2.1) και (2.2) για το επίπεδο των υποκριτηρίων. Η βαθμονόμηση των εναλλακτικών λύσεων προέκυψε είτε από κρίσεις αρμοδίων, είτε από αριθμητικά δεδομένα (Παρισόπουλος κ. άλ., 2011). Τα διαθέσιμα δεδομένα συνοψίζονται στους παρακάτω πίνακες:

Πίνακας 2α: Η βαθμονόμηση των εναλλακτικών λύσεων ανά υποκριτήριο.

	Υδατικό ισοζύγιο	
	Όγκος ταμίευσης (Mm^3)	Λόγος $V_{\mu.απορ.} / V_{\tauαμ.}$
X ₁	37,60	0,96
X ₂	23,18	1,13
X ₃	21,86	1,20
X ₄	22,84	0,98
X ₅	23,59	0,95

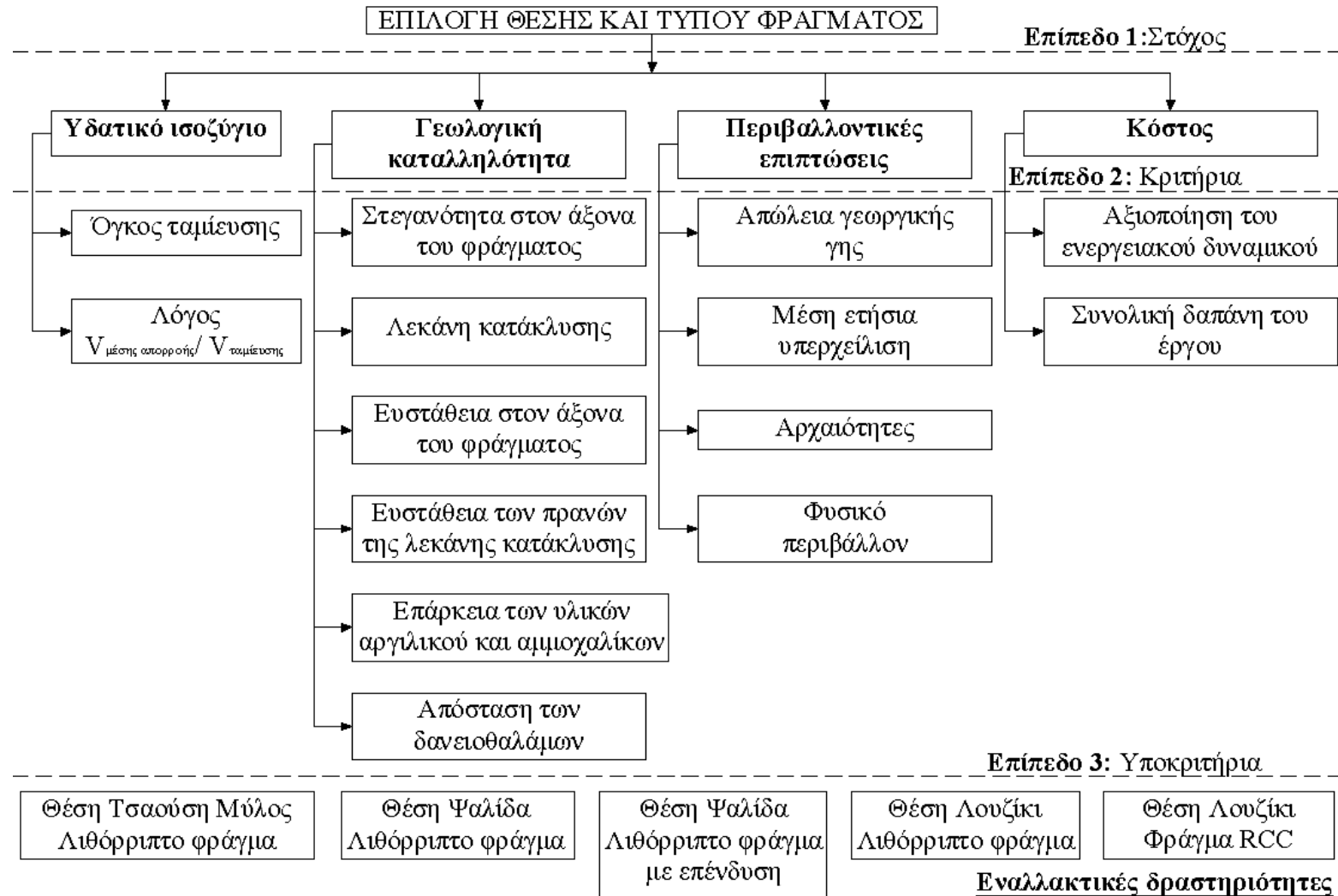
Πίνακας 2β: Η βαθμονόμηση των εναλλακτικών λύσεων ανά υποκριτήριο.

Γεωλογική καταλληλότητα						
Στεγανότητα άξονα φράγματος	Λεκάνη κατάκλυσης	Ευστάθεια άξονα φράγματος	Ευστάθεια	Επάρκεια	Απόσταση δανειοθαλάμων	
			πρανών λεκάνης κατάκλυσης	υλικών αργιλικού/ αμμοχάλικων		
X ₁	ιδιαίτερα ευνοϊκή	ιδιαίτερα ευνοϊκή	ιδιαίτερα ευνοϊκή	ιδιαίτερα ευνοϊκή	ιδιαίτερα ευνοϊκή	ιδιαίτερα ευνοϊκή
X ₂	ιδιαίτερα ευνοϊκή (*)	ιδιαίτερα ευνοϊκή (*)	ιδιαίτερα ευνοϊκή (*)	ιδιαίτερα ευνοϊκή (*)	ιδιαίτερα ευνοϊκή (*)	ιδιαίτερα ευνοϊκή (*)
X ₃	ιδιαίτερα ευνοϊκή (*)	ιδιαίτερα ευνοϊκή (*)	ιδιαίτερα ευνοϊκή (*)	ιδιαίτερα ευνοϊκή (*)	ιδιαίτερα ευνοϊκή (*)	ιδιαίτερα ευνοϊκή (*)
X ₄	ιδιαίτερα ευνοϊκή	ιδιαίτερα ευνοϊκή	ιδιαίτερα ευνοϊκή	ιδιαίτερα ευνοϊκή	ιδιαίτερα ευνοϊκή	ιδιαίτερα ευνοϊκή
X ₅	ιδιαίτερα ευνοϊκή	ιδιαίτερα ευνοϊκή	ιδιαίτερα ευνοϊκή	ιδιαίτερα ευνοϊκή	ιδιαίτερα ευνοϊκή	ιδιαίτερα ευνοϊκή

(*) «Όμως, θα πρέπει να προσεχθεί και να διερευνηθεί ακόμα περισσότερο το δεξιό αντέρεισμα, όπου θεμελιώνεται το δεξιό τμήμα του φράγματος, καθώς ο γεωλογικός σχηματισμός ίσως παρουσιάσει υψηλές διαπερατότητες»

Πίνακας 2γ: Η βαθμονόμηση των εναλλακτικών λύσεων ανά υποκριτήριο.

	Περιβαλλοντικές επιπτώσεις				Κόστος	
	Απώλεια γεωργικής γης (στρ)	Μέση ετήσια υπερχείλιση	Αρχαιότητες	Φυσικό περιβάλλον	Αξιοποίηση ενεργειακού δυναμικού (εκ. €)	Συνολική δαπάνη έργου (εκ. €)
X ₁	2100	ιδιαίτερα χαμηλή	έντονο πρόβλημα	σοβαρές επιπτώσεις	-9,00	52,20
X ₂	623	μικρές επιπτώσεις	περιορισμένες επιπτώσεις	περιορισμένες επιπτώσεις	4,50	85,80
X ₃	623	μικρές επιπτώσεις	περιορισμένες επιπτώσεις	περιορισμένες επιπτώσεις	4,50	103,80
X ₄	317	μικρές επιπτώσεις	αρχαιολογία έχει δώσει γραπτή	αναβάθμιση χλωρίδας και πανίδας	20,10	68,00
X ₅	317	μικρές επιπτώσεις	αρχαιολογία έχει δώσει γραπτή	αναβάθμιση χλωρίδας και πανίδας	20,10	89,80



Σχήμα 2: Διάγραμμα εφαρμογής με τρία επίπεδα και πέντε εναλλακτικές προτάσεις.

Πίνακας 3: Η βαθμονόμηση των εναλλακτικών λύσεων ανά υποκριτήριο.

	$f_1(X_j)$		$f_2(X_j)$						$f_3(X_j)$				$f_4(X_j)$	
X_1	37,60	0,96	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	2100,0	2,0	1,0	1,0	-9,00	5,00
X_2	23,18	1,13	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	623,0	8,0	5,0	7,0	4,50	3,00
X_3	21,86	1,20	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	623,0	8,0	5,0	7,0	4,50	2,00
X_4	22,84	0,98	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	317,0	8,0	9,0	9,0	20,10	4,00
X_5	23,59	0,95	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	317,0	8,0	9,0	9,0	20,10	3,00

Πίνακας 4: Βασικοί δείκτες.

	$S_{1,j}$		$S_{2,i}$						$S_{3,j}$				$S_{4,j}$		
X_1	0,00	0,96	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00
X_2	0,92	0,27	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,83	0,00	0,50	0,25	0,54	0,67	
X_3	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,83	0,00	0,50	0,25	0,54	1,00	
X_4	0,94	0,88	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,33	
X_5	0,89	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,67	

Πίνακας 5: Βάρη για κάθε υποκριτήριο.

$w_{1,1}$	$w_{1,2}$	$w_{2,1}$	$w_{2,2}$	$w_{2,3}$	$w_{2,4}$	$w_{2,5}$	$w_{2,6}$	$w_{3,1}$	$w_{3,2}$	$w_{3,3}$	$w_{3,4}$	$w_{4,1}$	$w_{4,2}$
0,750	0,250	0,076	0,036	0,073	0,071	0,275	0,469	0,125	0,053	0,605	0,217	0,333	0,667

Πίνακας 6: Τιμές των σύνθετων δεικτών 2^{00} επιπέδου.

	$L_{1,1}$	$L_{1,2}$	$L_{1,\infty}$	$L_{2,1}$	$L_{2,2}$	$L_{2,\infty}$	$L_{3,1}$	$L_{3,2}$	$L_{3,\infty}$	$L_{4,1}$	$L_{4,2}$	$L_{4,\infty}$
X_1	0,240	0,480	0,863	0,000	0,000	0,000	0,875	0,936	0,990	0,333	0,577	0,919
X_2	0,755	0,805	0,896	1,000	1,000	1,000	0,460	0,500	0,706	0,623	0,626	0,648
X_3	0,750	0,866	0,978	1,000	1,000	1,000	0,460	0,500	0,706	0,845	0,873	0,969
X_4	0,922	0,923	0,926	0,000	0,000	0,000	0,125	0,353	0,852	0,222	0,272	0,323
X_5	0,918	0,919	0,935	0,000	0,000	0,000	0,125	0,353	0,852	0,444	0,544	0,646

Για τους υπολογισμούς σε επίπεδο κριτηρίων θα κάνουμε χρήση της νόρμας L_2 (Ευκλείδεια νόρμα). Έτσι, στη βαθμονόμηση των κριτηρίων τίθενται οι σύνθετοι δείκτες που υπολογίστηκαν στο επίπεδο των υποκριτηρίων, οι οποίοι θα αποτελέσουν τώρα το μητρώο απόφασης στο τελικό στάδιο.

Πίνακας 7: Μητρώο απόφασης στο τελικό στάδιο.

	$F_i(X_j)$			
X_1	0,480	0,000	0,936	0,577
X_2	0,805	1,000	0,500	0,626
X_3	0,866	1,000	0,500	0,873
X_4	0,923	0,000	0,353	0,272
X_5	0,919	0,000	0,353	0,544

Πίνακας 8: Βασικοί δείκτες στο τελικό στάδιο.

	$S_{i,j}$			
X_1	1,000	1,000	0,000	0,492
X_2	0,266	0,000	0,747	0,411
X_3	0,128	0,000	0,747	0,000
X_4	0,000	1,000	1,000	1,000
X_5	0,009	1,000	1,000	0,547

Πίνακας 9: Βάρη για κάθε κριτήριο.

w_1	w_2	w_3	w_4
0,092	0,261	0,202	0,445

Πίνακας 10: Τελικές τιμές των L_1 , L_2 , L_∞ .

	L_1	L_2	L_∞
X_1	0,428	0,303	0,230
X_2	0,642	0,379	0,276
X_3	0,837	0,525	0,445
X_4	0,092	0,092	0,092
X_5	0,293	0,221	0,202

Σύμφωνα με τον Πίνακα 10, η τελική ταξινόμηση των εναλλακτικών προτάσεων είναι:

$X_4 > X_5 > X_1 > X_2 > X_3$. Όπου «>» σημαίνει προτιμητέο.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η επιλογή της βέλτιστης θέσης και του τύπου φράγματος, συμπίπτει με την προτεινόμενη από το Εργαστήριο Γενικής και Γεωργικής Υδραυλικής και Βελτιώσεων του Α.Π.Θ., όπως αυτή προέκυψε από τη συγκριτική αξιολόγηση των τριών θέσεων «Τσαούση – Μύλος», «Ψαλίδα» και «Λουζίκι». Αυτή η λύση είναι το λιθόρριπτο φράγμα στη θέση Λουζίκι. Αναλυτικά η κατάταξη των εναλλακτικών λύσεων είναι:

1. Θέση Λουζίκι – Λιθόρριπτο φράγμα
2. Θέση Λουζίκι – Φράγμα RCC
3. Θέση Τσαούση Μύλος – Λιθόρριπτο φράγμα
4. Θέση Ψαλίδα – Λιθόρριπτο φράγμα
5. Θέση Ψαλίδα – Λιθόρριπτο φράγμα με επένδυση του δεξιού αντερείσματος

Περαιτέρω σύγκριση της ταξινόμησης των λύσεων δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί καθώς δεν δίνονται στοιχεία από το Εργαστήριο Γενικής και Γεωργικής Υδραυλικής και Βελτιώσεων του Α.Π.Θ., πέραν της βέλτιστης λύσης που προτείνεται.

Ο σύνθετος συμβιβαστικός προγραμματισμός αποτελεί μία πολυκριτηριακή μέθοδο πολλών επιπέδων (ή ιεραρχική), και χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις εκείνες όπου υπάρχουν σε πρώτο επίπεδο ορισμένα βασικά κριτήρια και στη συνέχεια το κάθε βασικό κριτήριο αναλύεται σε επί μέρους υποκριτήρια.

Η αριθμητική επίλυση του προβλήματος έγινε με τη βοήθεια προγράμματος σε Visual Fortran που συντάχτηκε στο Εργαστήριο Υδραυλικών Έργων και Διαχείρισης Περιβάλλοντος (Τζιμόπουλος, 2012).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Παρισόπουλος, Γ., Γεωργίου, Π., Καραμούζης, Δ., Δημόπουλος, Γ., Παπαμιχαήλ, Δ. και Μακεδών, Θ. 2011. *Πολυκριτηριακή αξιολόγηση εναλλακτικών θέσεων φράγματος και έργων κεφαλής Ολυνθίου ποταμού στη Χαλκιδική*. Πρακτικά 7^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου Ε.Γ.Μ.Ε., Αθήνα.
- Καραμούζης, Δ., Παρισόπουλος, Γ., Δημόπουλος, Γ., Παπαμιχαήλ, Δ., Γεωργίου, Π., Μακεδών, Θ., Χαραλαμπίδης, Ν. και Σαπουντζάκης, Γ. 2008. *Συγκριτική Αξιολόγηση Φραγμάτων Ολυνθίου Θέσεις : Τσαούση Μύλος, Ψαλίδα, Λουζίκι*. Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε./ Γ.Γ.Δ.Ε./ Γ.Δ.Υ.Ε. Δ6 Δ/νση Έργων Ύδρευσης και Αποχέτευσης.

- Τζιμόπουλος, Χ. 2012. *Προγραμματισμός σύνθετου συμβιβαστικού προγραμματισμού (composite compromise programming) σε Visual Fortran*. Εσωτερικό άρθρο εργαστηρίου Υδραυλικών Έργων και Περιβάλλοντος. Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών Α.Π.Θ..
- Bardossy, A. and Duckstein, L. 1992. *Analysis of a karstic aquifer management problem by fuzzy composite programming*. *Water Resources Bulletin*, 28.1: 63-73.
- Lee, Y., Dahab, M. and Bogardi, I. 1992. *Nitrate risk management under uncertainty*. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 118.2: 151-165.
- Pantouvakis, J. and Manoliadis, O. 2008. *A compromise programming model for site selection of borrow pits*. *Construction Management and Economics*, 26: 433-446.
- Saaty, T., 1980. *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. McGraw-Hill, New York. 287 pp.

ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΑΝΤΙΠΛΗΓΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΤΩΝ ΥΠΟ ΠΙΕΣΗ ΑΡΔΕΥΤΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

Βάιος Ανυφαντής¹, Χρήστος Τζιμόπουλος², Σταύρος Γιαννόπουλος³

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Τομέας Συγκοινωνιακών και Υδραυλικών Έργων, 541 24 Θεσσαλονίκη
E-mail: ¹magnatus@gmail.com , ²tzimop@eng.auth.gr , ³giann@vergina.eng.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία η έρευνα εστιάζεται σε δύο κύριους τομείς δηλαδή (α) στη βελτιστοποίηση ενός υπό πίεση συστήματος άρδευσης και (β) στη διερεύνηση της προστασίας από το πλήγμα κριού. Για τη βελτιστοποίηση χρησιμοποιήθηκε η τροποποιημένη μέθοδος Labye ενσωματωμένη στο λογισμικό COPAM (Combined Optimization and Performance Analysis Model). Με τη βοήθεια του λογισμικού αυτού έγινε ο βέλτιστος οικονομοτεχνικός συνδυασμός των αγωγών και η ανάλυση της απόδοσης του συστήματος. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με αυτά της απλοποιημένης μη γραμμικής μεθόδου και του γραμμικού προγραμματισμού και διαπιστώνεται ότι η μέθοδος αυτή δίνει κόστος δικτύου μικρότερο κατά 6% περίπου σε σχέση με αυτά που δίνουν άλλες μέθοδοι βελτιστοποίησης. Για τη διερεύνηση του πλήγματος κριού εφαρμόζεται μια απλουστευμένη αναλυτική μέθοδος υπολογισμού των υπερπίεσεων και εξετάζεται η περίπτωση της χρήσης αντιπληγματικής συσκευής για την προστασία του συστήματος.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Βελτιστοποίηση, αρδευτικά δίκτυα, διάμετροι, COPAM, αντιπληγματική προστασία.

OPTIMIZATION AND PROTECTION OF THE WATER HAMMER PHENOMENON IN PRESSURIZED IRRIGATION NETWORKS

Vaios Anyfantis¹, Christos Tzimopoulos², Stavros Yannopoulos³

Aristotle University of Thessaloniki, School of Rural and Surveying Engineering, Department of Transportation and Hydraulics Engineering, GR - 54124 Thessaloniki, Greece

E-mail: ¹magnatus@gmail.com , ²tzimop@eng.auth.gr , ³giann@vergina.eng.auth.gr

ABSTRACT

Our research has been focused in two main fields: a) Optimization of a pressurized irrigation system and b) the system's protection of the water hammer phenomenon. For the first one we have used Lamaddalena's method, which is a modified Labye's method, incorporating in an integrated program, the COPAM (Combined Optimization and Performance Analysis Model). Applying this program, the optimal economical and technical combination of pipe diameters in a certain irrigation system was found, as well as the performance analysis of the system. We compared the results with a simplified non linear method and also with a method of linear programming and we ascertained that the cost of network yielded by this method is about 6% lower than the cost yielded by the other methods. For the case of water hammer phenomena protection, we introduced a simplified analytical method for the excess pressures calculation, and we examined some anti-hammer apparatus for the system's protection.

KEY WORDS: Optimization, irrigation systems, diameters, COPAM, water hammer protection.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Για την ικανοποιητική λειτουργία των υπό πίεση αρδευτικών δικτύων, είναι απαραίτητη η διασφάλιση των απαιτούμενων παροχών και πιέσεων στις θέσεις των υδροληψιών. Από το πλήθος των συνδυασμών διαμέτρων των αγωγών που δίνουν τεχνικά αποδεκτή λύση, επιλέγεται τελικά ο συνδυασμός που δίνει την οικονομικότερη λύση (οικονομικότερες διάμετροι αγωγών), ώστε να καταστεί το κόστος των αγωγών του δικτύου ελάχιστο. Η διαδικασία αυτή καλείται βελτιστοποίηση του κόστους των αγωγών αρδευτικού δικτύου.

Οι μέθοδοι, οι οποίες έχουν αναπτυχθεί για τη βελτιστοποίηση αυτή, είναι: (α) Η συνεχής μέθοδος με μη γραμμικό προγραμματισμό (Νουτσόπουλος, 1969, Τζιμόπουλος, 1983). (β) Η ασυνεχής μέθοδος με γραμμικό προγραμματισμό (Smith, 1966, Shamir, 1974, Morgan and Goulter, 1985, Τζιμόπουλος and Ιωαννίδης, 1997). (γ) Η ασυνεχής μέθοδος με δυναμικό προγραμματισμό (Liang, 1971, Walters and McKechnie, 1985, Βαμβακερίδου-Λυρούδια, 1990, Θεοχάρης, 2004, Theocharis et al., 2005). (δ) Η ασυνεχής μέθοδος Labye (Labye, 1966, Λειβαδίτης, 1972, Τζιμόπουλος, 1991, Theocharis et al., 2010), (ε) Τροποποιημένη συνεχής μέθοδος με μη γραμμικό προγραμματισμό (Θεοχάρης, 2004).

Η μέθοδος Labye αποτελεί μία μέθοδο βελτιστοποίησης, που εφαρμόζεται σε ακτινωτά δίκτυα και είναι ασυνεχής, δηλαδή λαμβάνονται εξαρχής υπόψη μόνο οι διάμετροι εμπορίου. Οι βέλτιστοι διάμετροι του δικτύου προκύπτουν με τη χάραξη της χαρακτηριστικής καμπύλης σε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων πιεζομετρικού φορτίου/κόστους των αγωγών σε συνδυασμό με την εξασφάλιση του διαθέσιμου φορτίου στην αρχή του δικτύου.

Ο Lamaddalena (1997) ανέπτυξε ένα ολοκληρωμένο και πρακτικό αλγόριθμο, τον COPAM (Combined Optimization and Performance Analysis Model), ο οποίος χρησιμοποιεί την τροποποιημένη μέθοδο Labye (Lamaddalena and Sagardoy, 2000), που αποτελεί εξέλιξη της κλασικής μεθόδου Labye.

Στη εργασία αυτή παρουσιάζεται ο τρόπος υπολογισμού των βέλτιστων διαμέτρων ενός αρδευτικού δικτύου με την τροποποιημένη μέθοδο Labye με τη χρήση του λογισμικού COPAM στα αρδευτικά δίκτυα Βασιλικών και Καβασιλών ν. Θεσσαλονίκης και γίνεται συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων αυτού με αυτά που προέκυψαν από άλλες μεθόδους βελτιστοποίησης.

Ένα, επίσης, βασικό στοιχείο της μελέτης των υπό πίεση αρδευτικών δικτύων αποτελεί η λήψη μέτρων προστασίας έναντι του πλήγματος κριού (water hammer), που προκαλείται από απότομες μεταβολές της παροχής λόγω κακού χειρισμού των δικλιδών λειτουργίας του δικτύου και των υδροληψιών. Το φαινόμενο εμφανίζεται με τη δημιουργία κυμάτων υπερπίεσης και υποπίεσης στον αγωγό, λόγω της αδράνειας της μάζας του νερού που κινείται και προκαλεί θραύση των αγωγών, χαλάρωση των συνδέσμων ή καταστροφή των οργάνων λειτουργίας. Παρουσιάζεται μια απλουστευμένη διαδικασία υπολογισμού των υπερπίεσεων που παράγονται από το φαινόμενο αυτό, βασισμένη στην Εγκύκλιο 22200/1977 του άλλοτε Υπουργείου Δημοσίων Έργων (Υ.Δ.Ε.).

2. ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΤΩΝ ΑΓΩΓΩΝ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ

2.1. Η ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΣ LABYE

Η τροποποιημένη μέθοδος Labye (Lamaddalena and Sagardoy, 2000) αναπτύσσεται σε δυο στάδια:

Κατά το πρώτο στάδιο γίνεται μια αρχική επίλυση του δικτύου με δεδομένα για κάθε αγωγό k αυτού τη μικρότερη διαθέσιμη διάμετρο εμπορίου, D_{\min} (m), που υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση (2.1) από τη μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα, V_{\max} (m/s), και την παροχή σχεδιασμού Q_k (m³/s), η οποία προκύπτει με εφαρμογή των μεθόδων του Clément, προκειμένου για δίκτυα ελεύθερης ζήτησης (Clément and Galand, 1979).

$$(D_{\min})_k = \sqrt{(4 Q_k) / (\pi V_{\max})} \quad (2.1)$$

Σημειώνεται ότι το COPAM για όλες τις διαμέτρου εμπορίου χρησιμοποιεί το ίδιο εύρος επιτρεπομένων ταχυτήτων νερού στους αγωγούς και συγκεκριμένα, $V_{\min}=0.2$ m/s και $V_{\max}=2.5$ m/s, σε αντίθεση με την εγκύκλιο Δ.22200/30-7-1977 του άλλοτε Υ.Δ.Ε., που ορίζει μεγαλύτερες ελάχιστες και μικρότερες μέγιστες επιτρεπόμενες ταχύτητες ανάλογα με τη διάμετρο του αγωγού. Γι αυτό η χρήση του COPAM συνεπάγεται τη χρήση αγωγών με μικρότερες διαμέτρους.

Μετά τον υπολογισμό των αρχικών διαμέτρων όλων των αγωγών του δικτύου υπολογίζεται, για κάθε διαδρομή M_j από την αρχή του δικτύου μέχρι κάθε τερματικό αγωγό, το πιεζομετρικό φορτίο $(Z_0)_{\text{αρχ}}$ στην αρχή του δικτύου που ικανοποιεί την ελάχιστη απαιτούμενη πίεση $H_{j,\min}$ στην τερματική υδροληψία j :

$$(Z_0)_{\text{αρχ}} = H_{j,\min} + Z_{\text{εδαφ},j} + \sum_{0 \rightarrow M_j} Y_k \quad (2.2)$$

όπου το άθροισμα των Y_k είναι οι απώλειες φορτίου κατά μήκος της διαδρομής M_j και $Z_{\text{εδαφ},j}$ είναι το υψόμετρο εδάφους στη τερματική υδροληψία j . Αν υπάρχουν ενδιάμεσα στη διαδρομή M_j υδροληψίες μεγαλύτερου υψόμετρου από τις τερματικές, το $(Z_0)_{\text{αρχ}}$ υπολογίζεται και γι' αυτές. Η αρχική τιμή, που λαμβάνεται υπόψη για τους περαιτέρω υπολογισμούς, είναι το μεγαλύτερο από τα $(Z_0)_{\text{αρχ}}$, που υπολογίστηκαν για να ικανοποιείται η πιο δυσμενής υδροληψία. Επειδή η επίλυση γίνεται με τη μικρότερη διαθέσιμη διάμετρο, το κόστος των αγωγών είναι το ελάχιστο δυνατό και οι γραμμικές απώλειες φορτίου οι μέγιστες δυνατές. Προκύπτει έτσι ένα πιεζομετρικό φορτίο στην αρχή του δικτύου μεγαλύτερο από αυτό που διαθέτουμε, το οποίο είναι, για παράδειγμα, η στάθμη νερού στη δεξαμενή αναρρύθμισης.

Κατά το δεύτερο στάδιο, που είναι επαναληπτικό, η βέλτιστη λύση επιτυγχάνεται με επαναληπτική μείωση του πιεζομετρικού φορτίου $(Z_0)_{\text{αρχ}}$ στην κεφαλή, μέχρι την επίτευξη του πραγματικού διαθέσιμου πιεζομετρικού φορτίου Z_0 , επιλέγοντας σε κάθε επανάληψη τους αγωγούς για τους οποίους μια αύξηση της διαμέτρου παράγει ελάχιστη αύξηση του κόστους του δικτύου. Η επιλογή γίνεται ως εξής: Σε κάθε επανάληψη i είναι γνωστές οι διαδοχικές διαμέτροι εμπορίου D_s και D_{s+1} ($D_{s+1} > D_s$), οπότε προσδιορίζεται η κλίση κόστους-απωλειών φορτίου:

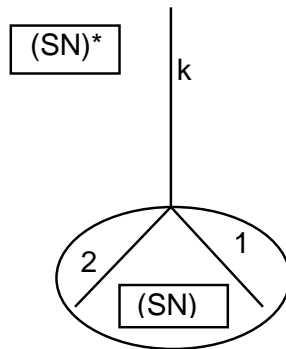
$$\beta_s = \frac{P_{s+1} - P_s}{Y_s - Y_{s+1}} \quad \text{ή} \quad \beta_s = \frac{\delta_{s+1} - \delta_s}{J_s - J_{s+1}} \quad (2.3)$$

όπου J η κλίση γραμμικών απωλειών φορτίου (m/m), δ η δαπάνη ανά τρέχον μέτρο σωλήνα (€/m), $P = \delta L$ το κόστος του αγωγού (€), $Y = J L$ οι γραμμικές απώλειες φορτίου (m) και L το μήκος του αγωγού (m).

Η ελάχιστη μεταβολή κόστους dP του στοιχειώδους δικτύου συμβολής τριών αγωγών (SN)* (Σχήμα 1) που αποτελείται από ένα υποδίκτυο (SN) δυο αγωγών σε διακλάδωση και ένα αγωγό k σε σειρά με το (SN), για κάθε δοθείσα μεταβολή dH' της πίεσης H' (m) στην αρχή του στοιχειώδους δικτύου (SN)*, επιτυγχάνεται με την επίλυση του παρακάτω προβλήματος «τοπικού» γραμμικού προγραμματισμού:

$$\begin{aligned} \text{Αντικειμενική συνάρτηση:} & \quad \text{minimize } dP = -\beta_{s,SN} dH - \beta_{s,k} dY_k . \\ \text{Περιορισμός:} & \quad dH + dY_k = dH' , \end{aligned}$$

όπου dH (m) είναι η μεταβολή φορτίου στην αρχή της διακλάδωσης (SN) και dY_k (m) η μεταβολή των γραμμικών απωλειών φορτίου στον αγωγό k .



Σχήμα 1: Το στοιχειώδες δίκτυο.

Η βέλτιστη λύση του προβλήματος είναι:

$$\begin{aligned} \text{Αν } \beta_{s,SN} < \beta_{s,k} & \text{ τότε } dH = dH' \text{ και } dY_k = 0 \\ \text{Αν } \beta_{s,SN} > \beta_{s,k} & \text{ τότε } dH = 0 \text{ και } dY_k = dH' \end{aligned}$$

οπότε

$$dP = -\beta^* dH' \quad (2.4)$$

όπου $\beta^* = \min(\beta_{s,SN}, \beta_{s,k})$.

Σε κάθε επανάληψη, δηλαδή, επιλέγεται προς μεταβολή φορτίου dH_i , ο αγωγός ή το υποδίκτυο αγωγών SN με τη μικρότερη κλίση β_s κόστους-απωλειών φορτίου, για να επιτυγχάνεται η ελάχιστη μεταβολή dP_i (σταδιακή αύξηση) του κόστους (που αντιστοιχεί σε σταδιακή αύξηση της διαμέτρου D_s). Συνεπώς, προχωρώντας από κάθε ακραίο αγωγό του δικτύου προς τα ανάντη, με τη βοήθεια της εξίσωσης (2.2) μπορεί να καθορίζεται ο αγωγός που θα μεταβληθεί σε κάθε επανάληψη. Κατά τη διαδικασία αυτή, η κλίση $\beta_{s,SN}$ δυο αγωγών 1 και 2 σε διακλάδωση είναι $\beta_{s,SN} = \beta_{s,1} + \beta_{s,2}$.

Αν η μεταβολή φορτίου dH_i είναι μικρότερη από τη μεταβολή φορτίου που παράγει η αύξηση της διαμέτρου από τη D_s στην αμέσως μεγαλύτερη διάμετρο εμπορίου D_{s+1} , δεν μεταβάλλεται η διάμετρος ολοκλήρου του αγωγού, αλλά διαχωρίζεται ο αγωγός σε δύο τμήματα διαμέτρων D_s και D_{s+1} , ώστε η συνολική μεταβολή φορτίου να ισούται με dH_i . Η επαναληπτική διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να επιτευχθεί το πραγματικό διαθέσιμο πιεζομετρικό φορτίο Z_0 στην αρχή του δικτύου, επιτυγχάνοντας κατ' αυτό τον τρόπο τη βέλτιστη λύση.

2.2. ΕΦΑΡΜΟΓΗ

2.2.1 Παραδοχές υπολογισμών

Η τροποποιημένη μέθοδος Labye λαμβάνει υπόψη της ότι το δίκτυο αποτελείται από αγωγούς σε σειρά ή από συμβολές τριών το πολύ αγωγών (Σχήμα 1). Περιπτώσεις συμβολής περισσότερων αγωγών αναλύονται σε συμβολές τριών αγωγών που βρίσκονται σε μικρή απόσταση μεταξύ τους. Επίσης, λαμβάνει υπόψη της μόνο ένα υδροστόμιο ανά υδροληψία. Αν υπάρχουν περισσότερα υδροστόμια, θεωρείται ότι βρίσκονται σε μικρή απόσταση μεταξύ τους. Η απόσταση αυτή στην παρούσα εργασία κατά την εφαρμογή του COPAM ελήφθη ίση με 1.00 m.

Το COPAM για τον υπολογισμό των γραμμικών απωλειών φορτίου στους υπό πίεση αγωγούς λόγω τριβών χρησιμοποιεί την τροποποιημένη εξίσωση των Darcy-Weisbach (εξίσωση κίνησης) (Lamaddalena and Sagardoy, 2000):

$$J = u Q^2, \quad (2.5)$$

όπου $u = 0.000857 (1 + 2 \gamma D^{-0.5})^2 D^{-5}$, J = η κλίση των απωλειών φορτίου (m/m), Q = η παροχή (m^3/s), D = η εσωτερική διάμετρος (m) και γ = ο συντελεστής τραχύτητας του Bazin ($m^{1/2}$), ο οποίος χαρακτηρίζει το υλικό του σωλήνα και τη μέθοδο κατασκευής του.

Ο συντελεστής γ του Bazin μπορεί να ληφθεί από πίνακες (Lamaddalena and Sagardoy, 2000) ή να υπολογιστεί από την εξίσωση (2.3), η οποία προκύπτει από συνδυασμό των εξισώσεων των Darcy-Weisbach, Chézy και Bazin (Singh, 1996, Durgaiyah, 2002):

$$\gamma = \frac{87 \sqrt{(D/4)}}{\sqrt{(8g)/f}} - \sqrt{\frac{D}{4}} \quad (2.6)$$

όπου g = η επιτάχυνση της βαρύτητας (m/s^2) και f = ο αδιάστατος συντελεστής τριβών των Darcy-Weisbach, ο οποίος υπολογίζεται από την εξίσωση των Colebrook-White:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{K}{3.7 D} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right), \quad Re = \frac{V D}{\nu} \quad (2.7)$$

όπου K = η ισοδύναμη απόλυτη τραχύτητα των εσωτερικών παρειών του αγωγού (m), Re = ο αριθμός Reynolds, V = η μέση ταχύτητα (m/s) και ν = το κινηματικό ιξώδες του νερού (m^2/s).

2.2.2 Εφαρμογή στο αρδευτικό δίκτυο Βασιλικών Θεσσαλονίκης

Εφαρμόστηκε η τροποποιημένη μέθοδος Labye με τη χρήση του COPAM για τη βελτιστοποίηση του αρδευτικού δικτύου Βασιλικών Θεσσαλονίκης, έκτασης 1560 στρ. Τα υψόμετρα του εδάφους στην περιοχή μελέτης κυμαίνονται από 72.50 m έως 90.00 m. Το νερό παροχετεύεται στο δίκτυο μέσω δεξαμενής αναρρύθμισης ελάχιστου πιεζομετρικού φορτίου 132.00 m. Τα εγκατεστημένα υδροστόμια είναι 52 με παροχή 9 L/s, ενώ η ελάχιστη απαιτούμενη πίεση στα υδροστόμια είναι 32 m (3.2 atm). Το κόστος των αγωγών ανά τρέχον m ελήφθη από τα Ενιαία Τιμολόγια Υδραυλικών Έργων έτους 2004 του άλλοτε Υπουργείου ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε.

Με τη βοήθεια του COPAM υπολογίστηκαν οι παροχές των αγωγών από τα ενεργά υδροστόμια που προέκυψαν με το 2ο τύπο του Clément για συσσώρευση ζητήσεως $F(a)=1\%$, απόδοση χρονικής χρησιμοποίησης του δικτύου $r=0.667$ και θεωρητική ειδική παροχή άρδευσης $q_0=0.76 L s^{-1} ha^{-1}$.

Οι αγωγοί είναι από πολυαιθυλένιο HDPE ονομαστικής πίεσης $P_{ονομ}=10$ atm, με ισοδύναμη απόλυτη τραχύτητα $K=0.01$ mm. Από την εξίσωση (2.3) υπολογίστηκε ο συντελεστής Bazin $\gamma = 0.06 m^{1/2}$, στον οποίο έγινε και κατάλληλη προσαύξηση, ώστε να προκύπτει αύξηση των γραμμικών απωλειών περίπου 10%, για κάλυψη τοπικών απωλειών και παλαίωση των αγωγών σύμφωνα με την Εγκύκλιο Δ. 22200/30-7-1977 του άλλοτε Υ.Δ.Ε. Τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης δίνονται στον Πίνακα 1.

Όπως προαναφέρθηκε, το COPAM χρησιμοποιεί στους υπολογισμούς για όλες τις διαμέτρους εμπορίου ως μέγιστη ταχύτητα, $V_{max} = 2.5$ m/s. Οι ταχύτητες, που προέκυψαν συναρτήσει των διαμέτρων της βελτιστοποίησης και των παροχών είναι για 14 από τους 35 συνολικά αγωγούς μεγαλύτερες από τις μέγιστες επιτρεπόμενες ταχύτητες, που ορίζονται με την Εγκύκλιο Δ. 22200/1977 του άλλοτε Υ.Δ.Ε. Στον Πίνακα 2 δίνονται ενδεικτικά αποτελέσματα που προέκυψαν με το COPAM και οι αντίστοιχες ταχύτητες σύμφωνα με την ανωτέρω εγκύκλιο.

Πίνακας 1: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης με την τροποποιημένη μέθοδο Labye

ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ (mm)	ΜΗΚΟΣ (m)	ΚΟΣΤΟΣ (€)	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ (mm)	ΜΗΚΟΣ (m)	ΚΟΣΤΟΣ (€)
110	469.7	7458	250	878.3	39206
125	598.0	10542	315	194.2	14348
140	469.3	9897	355	282.3	25685
160	591.6	14714	400	1.0	121
180	947.5	27127	500	408.0	71841
200	777.1	25310	560	565.6	123538
225	640.5	24546	Συνολικό κόστος		394333

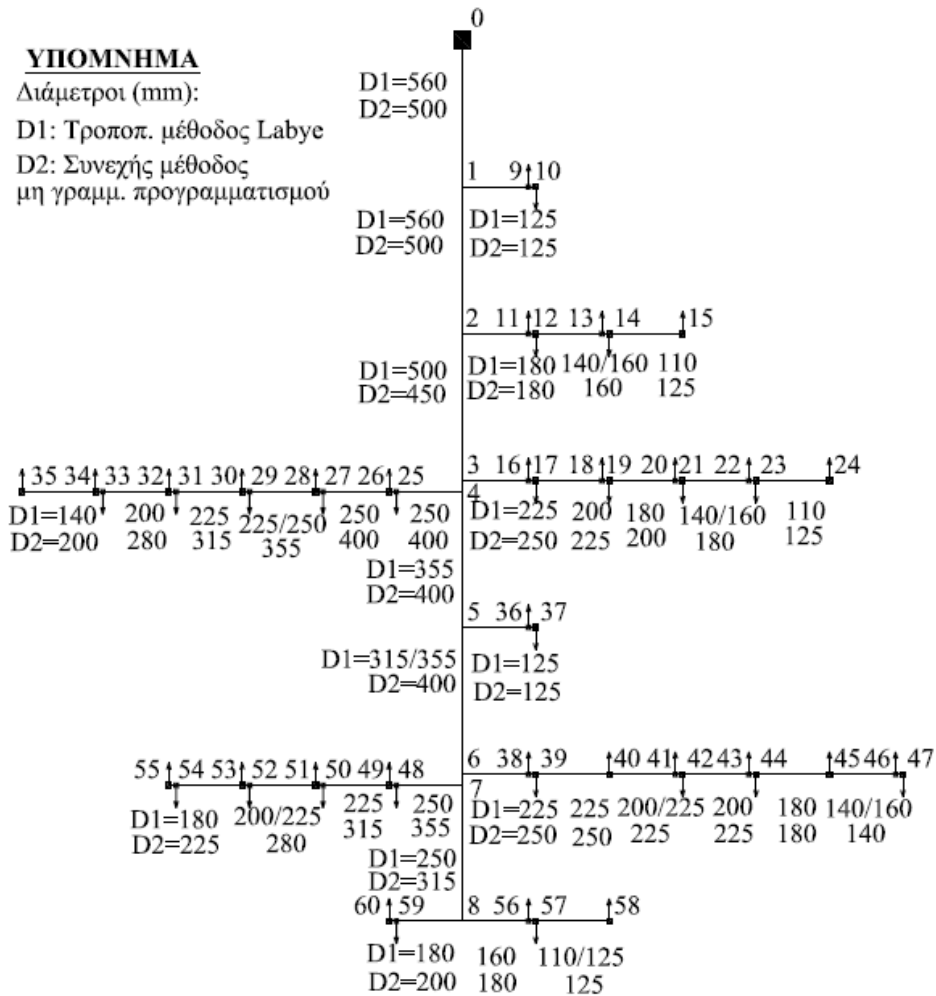
Πίνακας 2: Ταχύτητες ροής με το COPAM και επιτρεπόμενες V_{max} σύμφωνα με την Εγκύκλιο Δ. 22200/1977 του άλλοτε Υ.Δ.Ε.

ΑΓΩΓΟΣ	Q (L/s)	DN (εξωτ.) (mm)	D (εσωτ.) (m)	V (m/s)	V_{max} (Εγκ. 22200/77) (m/s)
6	126	315	0.269	2.22	2.00
9	18	125	0.107	2.02	1.55
11	45	180	0.153	2.43	1.85
13	27	140	0.119	2.41	1.55
16	63	225	0.192	2.18	2.00
18	54	200	0.171	2.36	1.85
20	45	180	0.153	2.43	1.85
22	27	140	0.119	2.41	1.55
36	18	125	0.107	2.02	1.55

Για λόγους σύγκρισης, λήφθηκε υπόψη η βελτιστοποίηση του ίδιου αρδευτικού δικτύου, που έγινε από το Μελετητικό Γραφείο ΥΕΤΟΣ (Σπυρίδης και Κουτάλου, 2005) με τη συνεχή μέθοδο βελτιστοποίησης με μη γραμμικό προγραμματισμό και με τις ίδιες τιμές αγωγών. Το κόστος των αγωγών, που προέκυψε με τη μέθοδο αυτή είναι 445726 €. Επομένως, το κόστος που προέκυψε με την τροποποιημένη μέθοδο Labye με χρήση του COPAM είναι μικρότερο κατά ποσοστό 11.5%.

Στο Σχήμα 2 παρουσιάζονται συγκριτικά οι διάμετροι που προέκυψαν από τις δυο μεθόδους βελτιστοποίησης. Για λόγους εποπτικού, παραλήφθηκαν οι διάμετροι των αγωγών ελαχίστου μήκους.

Παρατηρείται ότι οι διάμετροι της τροποποιημένης μεθόδου Labye προέκυψαν μικρότερες της συνεχούς μεθόδου, στους περισσότερους αγωγούς. Αυτό οφείλεται στην εφαρμογή από το COPAM της μέγιστης επιτρεπόμενης ταχύτητας $V_{max} = 2.5$ m/s, ενώ στη συνεχή μέθοδο εφαρμόστηκαν οι ταχύτητες της εγκυκλίου Δ. 22200/1977 του άλλοτε Υ.Δ.Ε., που είναι γενικά μικρότερες (Πίνακας 2). Η μεγαλύτερη V_{max} δίνει μικρότερη D_{min} , λόγω της εξίσωσης (2.1). Επίσης, στη συνεχή μέθοδο, οι παροχές των αγωγών είχαν υπολογιστεί με τη μέθοδο της εκ περιτροπής διανομής του αρδευτικού νερού, και διαφέρουν από τις παροχές, που προκύπτουν με εφαρμογή των μεθόδων του Clément, που χρησιμοποιεί το COPAM. Το ποσοστό διαφοράς κόστους, που προέκυψε (11.5%) οφείλεται στους δυο παραπάνω λόγους.



Σχήμα 2: Σύγκριση διαμέτρων βελτιστοποίησης

2.2.3 Εφαρμογή στο αρδευτικό δίκτυο Καβασιλών Θεσσαλονίκης

Για τη διερεύνηση των επιπτώσεων των μέγιστων επιτρεπόμενων ταχυτήτων στο κόστος των αγωγών του δικτύου ελήφθησαν υπόψη οι βελτιστοποιήσεις του αρδευτικού δικτύου Καβασιλών που έγιναν από το Χονδρογιάννη (2005). Συγκεκριμένα, ο Χονδρογιάννης (2005) έκανε επίλυση του δικτύου αυτού με: (α) Την απλοποιημένη συνεχή μη γραμμική μέθοδο βελτιστοποίησης του Θεοχάρη (2004), από την οποία προέκυψε κόστος των αγωγών του δικτύου 301945 € και (β) τη μέθοδο γραμμικού προγραμματισμού από την οποία προέκυψε κόστος των αγωγών του δικτύου 301591 €.

Σημειώνεται ότι στο δίκτυο Καβασιλών είναι εγκατεστημένα 83 υδροστόμια με παροχή 6 L/s. Οι αγωγοί είναι από PVC, με ισοδύναμη απόλυτη τραχύτητα $K = 0.08$ mm. Οι παροχές των αγωγών έχουν υπολογιστεί με τις μεθόδους του Clément. Οι υπολογισμοί με το COPAM έγιναν για συντελεστή Bazin $\gamma = 0.08 \text{ m}^{1/2}$, που υπολογίστηκε με την εξίσωση (2.3).

Το κόστος του δικτύου με τη χρήση του COPAM δίνεται στον Πίνακα 3 και ανέρχεται σε 283008 €.

Διαπιστώνεται, λοιπόν, ότι με την τροποποιημένη μέθοδο Labye (COPAM) προκύπτει κόστος κατά 6.3% μικρότερο της απλοποιημένης συνεχούς μη γραμμικής μεθόδου βελτιστοποίησης του Θεοχάρη (2004) και κατά 6.2% μικρότερο της μεθόδου του γραμμικού προγραμματισμού.

Πίνακας 3: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης με την τροποποιημένη μέθοδο Labye (COPAM)

ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ	ΜΗΚΟΣ	ΚΟΣΤΟΣ	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ	ΜΗΚΟΣ	ΚΟΣΤΟΣ
(mm)	(m)	(€)	(mm)	(m)	(€)
110	475	6227	225	805.2	36790
125	356	5714	250	375	21159
140	647	12706	315	300	25773
160	1415.5	35217	355	290	31175
200	2431.3	89447	400	140	18799
Συνολικό κόστος					283008

3. ΑΝΤΙΠΛΗΓΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΤΩΝ ΥΠΟ ΠΙΕΣΗ ΑΡΔΕΥΤΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

3.1. Η ΑΠΛΟΥΣΤΕΥΜΕΝΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ

3.1.1 Γενικά

Η απλουστευμένη διαδικασία υπολογισμού των υπερπίεσεων που προκαλούνται από το φαινόμενο του πλήγματος κριού και της λήψης των απαραίτητων μέτρων προστασίας του δικτύου, κωδικοποιούνται στις οδηγίες που δίνονται με την Εγκύκλιο Δ.22200/30-7-1977 του άλλοτε Υ.Δ.Ε., όπως διορθώθηκε με το έγγραφο ΒΜ3/21417/17-8-1984 του ίδιου Υπουργείου.

Η ονομαστική πίεση λειτουργίας ($P_{ονομ}$) ή κλάση αγωγού, που είναι η μέγιστη πίεση που μπορεί να υφίσταται συνεχώς ο αγωγός, πρέπει να ικανοποιεί τη σχέση: $P_{ονομ} > P_0$, όπου P_0 είναι η μέγιστη υδροστατική πίεση που αναπτύσσεται σε κάθε θέση του δικτύου. Στην περίπτωση δικτύου που υδροδοτείται απευθείας από δεξαμενή, P_0 είναι η υδροστατική πίεση που αντιστοιχεί στην ανωτάτη στάθμη της δεξαμενής (πίεση μηδενικής παροχής). Πρέπει, επίσης, να ικανοποιείται η σχέση $P_{ονομ} \geq P_\lambda$, όπου P_λ είναι η μέγιστη εσωτερική υδραυλική πίεση που αναπτύσσεται στις εξεταζόμενες θέσεις των αγωγών, περιλαμβανομένων των υπερπίεσεων που προκαλούνται από τους χειρισμούς ή τη λειτουργία των διαφόρων οργάνων.

Για την αντιμετώπιση των υδραυλικών πληγμάτων, που προκαλούνται από χειρισμό των δικλίδων ελέγχου λειτουργίας και των υδροληψιών, το βασικό πρόβλημα είναι ο υπολογισμός των υπερπίεσεων που προκαλούνται στους αγωγούς λόγω του πλήγματος κριού. Με βάση τις υπερπίεσεις αυτές επιλέγονται στη συνέχεια οι κατάλληλες αντιπληγματικές συσκευές, για να περιοριστεί η πίεση P_λ , που δημιουργείται λόγω του πλήγματος, ώστε να ισχύει η ανισότητα $P_{ονομ} \geq P_\lambda$.

3.1.2 Διαδικασία και παραδοχές υπολογισμού

Ο υπολογισμός αφορά στη μέγιστη υπερπίεση Δp που μπορεί να προκληθεί κατά τον χειρισμό δικλίδας που είναι εγκατεστημένη στο τέλος αγωγού, όταν ο αγωγός αυτός (σε όλο το μήκος του) έχει σταθερά χαρακτηριστικά (διατομή, υλικό, πάχος) και τροφοδοτείται από δεξαμενή σταθερής στάθμης. Εξετάζονται οι περιπτώσεις κλεισίματος κάθε φορά μιας δικλίδας ελέγχου ροής ή μιας υδροληψίας και λαμβάνεται ως L η απόσταση μέχρι το πλησιέστερο προς τα ανάντη σημείο εκτόνωσης της υπερπίεσης.

Για το σκοπό αυτό προτείνεται η παρακάτω διαδικασία:

- (α) Έλεγχος των πλήρων διαδρομών από κάθε τερματική υδροληψία μέχρι την αρχή του δικτύου (εκτόνωση της υπερπίεσης στη δεξαμενή).
- (β) Έλεγχος των διαδρομών κάθε δευτερεύοντα κλάδου (εκτόνωση σε αγωγούς σημαντικά μεγαλύτερης διαμέτρου στον κύριο κλάδο).

(γ) Έλεγχος των διαδρομών από κάθε κόμβο του κύριου κλάδου μέχρι την αρχή του δικτύου, για ενδεχόμενο πλήγμα από κλείσιμο δικλείδας ελέγχου λειτουργίας.

Υπολογίζεται η μέγιστη πίεση $P_\lambda = P_0 + \Delta p$ για τα κρίσιμα σημεία της διαδρομής (αρχή, τέλος και τυχόν ενδιάμεσα σημεία χαμηλότερου υψομέτρου). Λαμβάνεται υπόψη η P_0 , επειδή το κύμα της υπερπίεσης μειώνεται μεν με το χρόνο, αλλά η ταλάντωση γίνεται εκατέρωθεν της ανώτερης πιεζομετρικής στάθμης, επειδή στο τελικό μόνιμο φαινόμενο, μετά το κλείσιμο της δικλείδας, δεν υπάρχουν απώλειες και το υδραυλικό φορτίο είναι στην ανώτερη στάθμη (Τολίκας, 2000). Αν ισχύει η ανισότητα $P_{ονομ} \geq P_\lambda$, δεν υπάρχει ανάγκη αντιπληγματικής συσκευής, αλλιώς τοποθετείται αντιπληγματική βαλβίδα σε ένα σημείο της εξεταζόμενης διαδρομής, το οποίο επιλέγεται κατά προτίμηση (Τζιμόπουλος, 1986):

(α) Αμέσως ανάντη των δικλείδων των κύριων κόμβων του δικτύου.

(β) Σε σημείο χαμηλότερου υψομέτρου.

(γ) Σε βαρυκεντρικό σημείο ομάδας υδροληψιών.

(δ) Στον κύριο αγωγό σε κατάλληλη θέση, ώστε η μέγιστη απόσταση μεταξύ δυο βαλβίδων αποφορτίσεως να μην υπερβαίνει τα 2000 m.

Τέλος, ελέγχονται οι διαδρομές κατάντη της θέσης της αντιπληγματικής βαλβίδας, μέχρι τα πέρατα του δικτύου. Αν ο αγωγός, στο μήκος που εξετάζεται, δεν έχει ενιαία διάμετρο, τότε το μήκος L , που χρειάζεται για την εφαρμογή των τύπων, υπολογίζεται με αναγωγή των επιμέρους μηκών σε ισοδύναμα μήκη και άθροισή τους, σύμφωνα με την εξίσωση:

$$L = L_1 + L_2 \frac{F_1}{F_2} + L_3 \frac{F_1}{F_3} + \dots \quad (3.1)$$

όπου L_1, L_2, L_3, \dots τα επιμέρους μήκη, F_1, F_2, F_3, \dots οι αντίστοιχες διατομές και L το συνολικό μήκος ανηγμένο σε διατομή F_1 . Για κάθε περίπτωση διακοπής της ροής εκλέγεται ενεργός χρόνος διακοπής, T_χ , εναρμονισμένος με το υλικό που προβλέπεται να χρησιμοποιηθεί για το έργο και τις συνθήκες πίεσεως του δικτύου. Ενδεικτικές τιμές ενεργού χρόνου, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, σύμφωνα με την Εγκύκλιο 22200/1977 του άλλοτε Υ.Δ.Ε., είναι οι εξής:

- Στις υδροληψίες: 3 s
- Στις δικλείδες ελέγχου ροής (χειροκίνητες):
 - για διαμέτρους 100 μέχρι 300 mm: 5s
 - για διαμέτρους 300 mm και άνω: 10s
- Επί δικλείδων ελέγχου ροής άλλων τύπων : κατά περίπτωση

3.1.3 Υπολογισμός των υπερπίεσεων

Η μέγιστη υπερπίεση εξαρτάται από το χρόνο χειρισμού T_χ της δικλείδας σε σχέση με τη φάση του αγωγού T_μ , δηλαδή του χρόνου που απαιτείται για μετάβαση του κύματος υπερπίεσης στην αρχή του αγωγού και επιστροφή στη θέση της δικλείδας και η οποία υπολογίζεται από τη σχέση:

$$T_\mu = \frac{2L}{a} \quad (3.2)$$

όπου a = η ταχύτητα μετάδοσης του κύματος (m/s), που υπολογίζεται από τη σχέση:

$$a = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{KD}{Ee} C}} \quad (3.3)$$

με K = το μέτρο ελαστικότητας του νερού (2.08×10^9 Pa), ρ = η πυκνότητα του νερού (1000 kg/m^3), D = η εσωτερική διάμετρος του αγωγού (m), E = το μέτρο ελαστικότητας του υλικού των αγωγών (για πολυαιθυλένιο: $E = 8 \times 10^8$ Pa), e = το πάχος των τοιχωμάτων του αγωγού (m) και C = συντελεστής που αναφέρεται στη δυνατότητα αξονικής παραμόρφωσης του αγωγού και εξαρτάται από το λόγο του Poisson.

Για αγωγούς, των οποίων δεν παρακωλύεται η ελαστική συμπεριφορά εγκάρσια ή κατά μήκος (αρμοί συνδέσεως, που επιτρέπουν συστολή και διαστολή), και των οποίων το πάχος είναι μικρό ($D/\alpha > 25$), ο συντελεστής C είναι ίσος με τη μονάδα (Τζιμόπουλος, 1983).

Αν $T_x < T_\mu$, τότε η μέγιστη υπερπίεση Δp προκύπτει από την εξίσωση του Joukowsky (Joukowsky, 1900):

$$\Delta p = \frac{a \cdot \Delta V}{g} = \frac{2L}{g} \frac{\Delta V}{T_\mu} \quad (3.4)$$

όπου ΔV = η μεταβολή της ταχύτητας (προκύπτει από τη διακοπείσα παροχή Q συναρτήσει της διαμέτρου D) και g = η επιτάχυνση της βαρύτητας.

Στην περίπτωση αυτή, η υπερπίεση Δp εξαρτάται από το υλικό, το πάχος, τη διάμετρο του αγωγού και τις λοιπές παραμέτρους που καθορίζουν την ταχύτητα μεταδόσεως του κύματος (μέτρα ελαστικότητας) και όχι από το μήκος του αγωγού.

Αν $T_x > T_\mu$, τότε η μέγιστη υπερπίεση Δp προκύπτει από την εξίσωση του Michaud (Michaud, 1878) (με την υπόθεση γραμμικής μεταβολής της ταχύτητας):

$$\Delta p = \frac{2L}{g} \frac{\Delta V}{T_x} \quad (3.5)$$

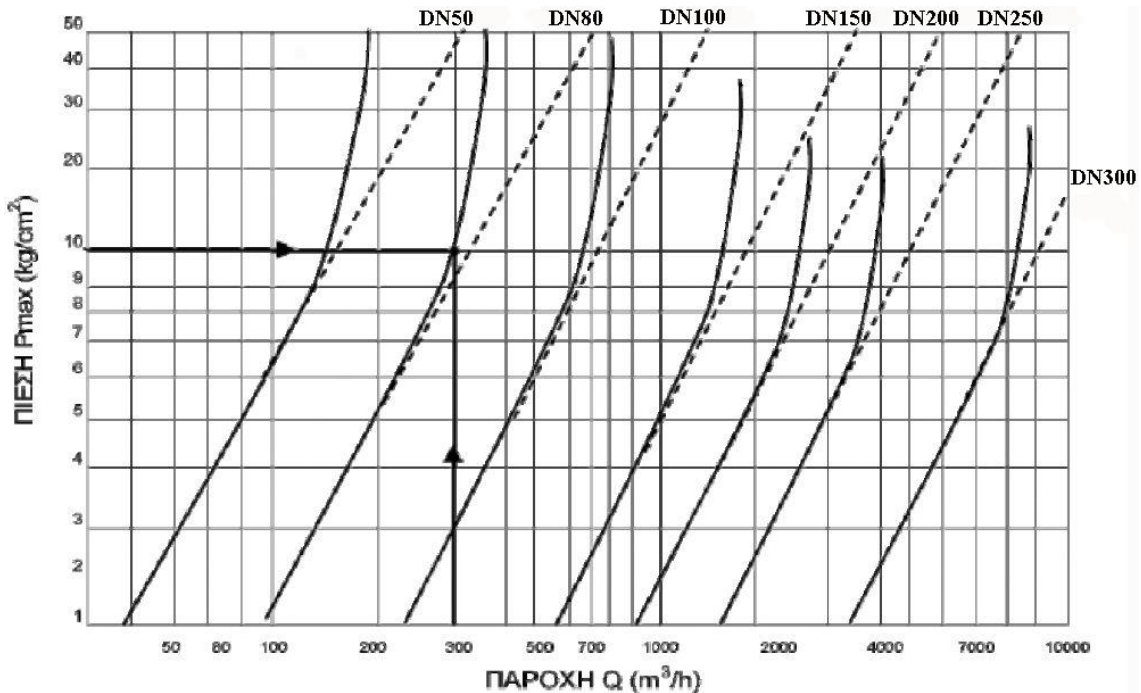
Στην περίπτωση αυτή, η υπερπίεση Δp δεν εξαρτάται από το υλικό, το πάχος, τη διάμετρο του αγωγού και τις λοιπές παραμέτρους που καθορίζουν την ταχύτητα μεταδόσεως του κύματος, αλλά από το μήκος του αγωγού.

3.1.4 Επιλογή αντιπληγματικής συσκευής

Η αντιπληγματική βαλβίδα πρέπει να υπολογίζεται κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να απορροφά παροχή Q ίση τουλάχιστο με την παροχή του αγωγού ανάντη της βαλβίδας (Bonnal, 1966). Η επιλογή του τύπου της βαλβίδας (της διαμέτρου διαφυγής DN) μπορεί να γίνει από διάγραμμα παροχής Q /πίεσης $P_{max} = P_{ovoim}$ (Σχήμα 3).

Για κάθε διάμετρο διαφυγής διατίθενται διάφορες βαλβίδες, από τις οποίες πρέπει να επιλεγεί εκείνη που καλύπτει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά (Εγκύκλιος Δ.22200/1977/ΥΔΕ, Ι.Ο.Κ., 2006):

- (α) Πίεση ρύθμισης της βαλβίδας ή πίεση στεγανότητας $P = P_0 \times 1.05$,
- (β) Παροχή αποφορτίσεως ή εκτονώσεως μεγαλύτερη ή ίση της παροχής Q του αγωγού ανάντη της βαλβίδας,
- (γ) Πίεση ανοικτής βαλβίδας (πίεση κατά τη διάρκεια της αποφόρτισης) $P_1 < P_{ovoim}$.



Σχήμα 3: Διάγραμμα επιλογής τύπου αντιπληγματικής βαλβίδας

3.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ

Ο αντιπληγματικός έλεγχος στο αρδευτικό δίκτυο Βασιλικών Θεσσαλονίκης έγινε βάσει της ανώτατης στάθμης της δεξαμενής: 134.00 m. Τηρήθηκε η διαδικασία, όπως περιγράφεται στην ενότητα 3.1.2 και ο υπολογισμός έγινε σύμφωνα με την ενότητα 3.1.3. Κατά τον έλεγχο των διαδρομών από κάθε κόμβο του κύριου κλάδου μέχρι την αρχή του δικτύου, προέκυψε στον κόμβο 6 (Σχήμα 2) $P_{\lambda} = 10.87 \text{ atm} > P_{\text{ονομ}} = 10 \text{ atm}$ (Πίνακας 4).

Πίνακας 4: Αντιπληγματικός έλεγχος δικτύου Βασιλικών

Διαδρομή:		0-5	0-6	0-8
Διακοπή παροχή αγωγού, Q	(L/s)	135.00	126.00	45.00
Ονομαστική διάμετρος, DN	(mm)	355	315	250
Εσωτερική διάμετρος αγωγού, $D_{\text{εσ.}}$	(m)	0.3028	0.2686	0.2132
Πάχος τοιχωμάτων, e	(m)	0.026	0.023	0.018
Ανηγμένο μήκος αγωγού, L	(m)	654.59	735.06	987.31
Μεταβολή ταχύτητας ροής, ΔV	(m/s)	1.875	2.224	1.261
Επιτάχυνση της βαρύτητας, g	(m/s ²)	9.81	9.81	9.81
Υψόμετρο ανάντη	(m)	132.00	132.00	132.00
Υψόμετρο κατόντη	(m)	83.00	83.90	85.15
Πιεζομ. φορτίο μηδενικής παροχής	(m)	134.00	134.00	134.00
Πίεση μηδενικής παροχής ανάντη	(m)	2.00	2.00	2.00
Πίεση μηδενικής παροχής κατόντη	(m)	51.00	50.10	48.85
Μέτρο ελαστικότητας αγωγού, E	(Pa)	8.00×10^8	8.00×10^8	8.00×10^8
Μέτρο ελαστικότητας ύδατος, K	(Pa)	2.08×10^9	2.08×10^9	2.08×10^9
Ταχύτητα διάδοσ. ελαστ. κύματος, a	(m/s)	258.35	258.61	258.51

Πίνακας 4 (συνέχεια): Αντιπληγματικός έλεγχος δικτύου Βασιλικών

Διαδρομή:		0-5	0-6	0-8
Πυκνότητα νερού, ρ	(kg/m ³)	1000.00	1000.00	1000.00
Χρόνος χειρισμού βαλβίδας, T_{χ}	(s)	7.00	5.00	5.00
Φάση του αγωγού υπό πίεση, T_{μ}	(s)	5.07	5.68	7.64
Μέγιστη υπερπίεση πλήγματος, Δp	(m)	35.74	58.62	33.22
	ή (atm)	3.57	5.86	3.32
Μέγιστη πίεση ανάντη, P_{λ}	(m)	37.74	60.62	35.22
	ή (atm)	3.77	6.06	3.52
Μέγιστη πίεση κατάντη, P_{λ}	(m)	86.74	108.72	82.07
	ή (atm)	8.67	10.87	8.21

Απαιτείται, επομένως, τοποθέτηση αντιπληγματικής συσκευής σ' ένα σημείο της διαδρομής 0-6. Επιλέχθηκε η τοποθέτηση αντιπληγματικής βαλβίδας στον κόμβο 3 (αμέσως ανάντη αυτού), σύμφωνα με τις αρχές που αναφέρθηκαν στην ενότητα 3.1.2. Μετά την τοποθέτηση της αντιπληγματικής βαλβίδας, ο έλεγχος των διαδρομών κατάντη του κόμβου 3, έδειξε ότι δεν παρουσιάζεται υπερπίεση λόγω πλήγματος κριού.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η τροποποιημένη μέθοδος Labye (Lamaddalena, 1997) αποτελεί μια μέθοδο υπολογισμού των βέλτιστων διαμέτρων ενός αρδευτικού δικτύου, η οποία χαρακτηρίζεται από ευελιξία και ταχύτητα υπολογισμών. Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων της σε σχέση με αυτά που προκύπτουν από άλλες μεθόδους βελτιστοποίησης προέκυψε ότι δίνει μικρότερα κόστη δικτύων της τάξεως του 6% περίπου, που οφείλεται στη μέγιστη ταχύτητα ροής (2.5 m/s), που λαμβάνει υπόψη του το COPAM. Η ταχύτητα αυτή είναι μεγαλύτερη από τις αντίστοιχες επιτρεπόμενες ταχύτητες που ορίζει η Εγκύκλιος Δ.22200/1977 του άλλοτε Υ.Δ.Ε., που εφαρμόζονται στην Ελλάδα και επομένως, επιτρέπει την επιλογή μικρότερων διαμέτρων. Όμως, αγωγοί με μικρότερες διαμέτρους αυξάνουν την πιθανότητα εμφάνισης υπερπίεσεων λόγω πλήγματος κριού στο δίκτυο και επομένως, χρειάζεται βελτίωση του λογισμικού για να υπάρχει η δυνατότητα επιλογής από το χρήστη του εύρους επιτρεπόμενων ταχυτήτων για κάθε διάμετρο του εμπορίου.

Η απλουστευμένη διαδικασία υπολογισμού των υπερπίεσεων που προκαλούνται από το πλήγμα κριού έχει προγραμματιστεί σε υπολογιστικά φύλλα επεξεργασίας του Excel και δίνει τη δυνατότητα εύκολου αντιπληγματικού ελέγχου του αρδευτικού δικτύου. Στο πρόγραμμα αυτό επισημαίνονται τα βασικά σημεία, όπου αναπτύσσονται μεγάλες υπερπίεσεις επιτρέποντας έτσι στο Μελετητή να λάβει τα απαραίτητα μέτρα προστασίας του δικτύου με τοποθέτηση αντιπληγματικών βαλβίδων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Bonnal, C., 1966. *Εγχειρίδιον συλλογικής αρδύσεως δια καταιονισμού*. Υπουργείο Δημοσίων Έργων, Αθήνα, 141 σελ.
- Clément, R. and Galand, A., 1979. *Irrigation par aspersion et réseaux collectifs de distribution sous pression*. Eyrolles, Paris, 188 pp.
- Durgaiyah, D. R., 2002. *Fluid Mechanics and Machinery*. New Age International Ltd, New Delhi, 912 pp.

- Joukowsky, N., 1900. *Über den hydraulischen Stoss in Wasserleitungsröhren (On the hydraulic hammer in water supply pipes)*. Mémoires de l' Académie Impériale des Sciences de St.-Petersbourg, Series 8, vol. 9(5): 1-71.
- Labye, Y., 1966. *Etude des procédés de calcul ayant pour but de rendre minimal le cout d' un réseau de distribution d' eau sous pression*. La Houille Blanche., 5: 577-583.
- Lamaddalena, N. and Sagardoy, J.A., 2000. *Performance analysis of on-demand pressurized irrigation systems*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, paper 59, 133 pp.
- Lamaddalena, N., 1997. *Integrated simulation modeling for design and performance analysis of on-demand pressurized irrigation systems*. Ph.D. Dissertation, Technical University of Lisbon, Lisbon, 504 pp.
- Liang, T., 1971. *Design Conduit system by dynamic programming*. J. Hydr. Div. A.S.C.E., 97(3): 383-393.
- Michaud, J., 1878. *Coup de bélier dans les conduites: étude des moyens employés pour en atténuer les effects*. Bulletin de la Société Vaudoise des Ingénieurs et des Architectes, Lausanne, Switzerland 4 (3/4), 56-64/65-77.
- Morgan, D.R. and Goulter, I.C., 1985. *Optimal urban water distribution design*. J. Water Res. Research, 21(5): 642-652.
- Shamir, U., 1974. *Optimal design and operation*. J. Water Res. Research, 10(1): 27-36.
- Singh, V.P., 1996. *Kinematic wave modeling in Water Resources - Surface Water Hydrology*. John Wiley & Sons, Canada, 1424 pp.
- Smith, D.V., 1966. *Minimum cost design of linearly restrained water distribution networks*. M.Sc. Thesis, Dept. of Civil Eng., Mass. Inst. of Technol., Cambridge.
- Theocharis M., C. Tzimopoulos, M., Sakellariou-Makrantonaki, S. Yannopoulos, I.K. Meletiou, 2010. *Comparative calculation of irrigation networks using Labye's method, the linear programming method and a simplified nonlinear method*, Mathematical and Computer Modelling 51 , 286-299.
- Theocharis M., C. Tzimopoulos, S.Yannopoulos, and M. Sakellariou-Makrantonaki, 2005. *Dynamic method and a simplified nonlinear method in irrigation networks optimization*, Jour. WSEAS Transactions on Advances in Engineering Education , Issue 3, Vol. 2, 156-165.
- Walters, G.A. and McKechnie, S.J., 1985. *Determining the least-cost spanning network for a system of pipes by the use of dynamic programming*. Proc. 2nd Int. Conf. on Civil & Structural Eng. Computing, pp. 237-243.
- Βαμβακερίδου-Λυρούδια, Λ., 1990. *Δίκτυα Υδρεύσεων-Αρδεύσεων υπό πίεση. Επίλυση-Βελτιστοποίηση*. Εκδότης Ε. & Λ. Λουριδιάς Ε.Π.Ε., Αθήνα, 402 σελ.
- Θεοχάρης, Μ., 2004. *Βελτιστοποίηση των αρδευτικών δικτύων - Εύρεση των οικονομικών διαμέτρων*. Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη, 295 σελ.
- Ι.Ο.Κ., 2006. *Προσωρινές Εθνικές Τεχνικές Προδιαγραφές*. Vol. 08-06-07-06, Ινστιτούτο Οικονομίας Κατασκευών, ΥΠΕΧΩΔΕ, Αθήνα, 5 σελ.
- Λειβαδίτης, Ε., 1972. *Η ασυνεχής μέθοδος Labye δια τον υπολογισμόν του οικονομικού συνδυασμού διαμέτρων σωληνωτών δικτύων αρδεύσεως*. Τεχνικά Χρονικά, Μάιος, ΤΕΕ, Αθήνα, 661-676.
- Νουτσόπουλος, Γ., 1969. *Το πρόβλημα της οικονομικής πιεζομετρικής γραμμής ακτινωτών αρδευτικών δικτύων υπό πίεση*. Τεχνικά Χρονικά, Οκτώβριος, ΤΕΕ, Αθήνα.
- Σπυρίδης, Α. και Κουτάλου, Β., 2005. *Μελέτη αρδευτικού δικτύου Δήμου Βασιλικών*. Περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας, Θεσσαλονίκη.

- Τζιμόπουλος, Χ. και Ιωαννίδης, Δ., 1997. *Βελτιστοποίηση αρδευτικού δικτύου με τη μέθοδο Simplex*. Η Γη και το Σύμπαν, Τιμητική Έκδοση του Τμήματος Α.Τ.Μ., Θεσσαλονίκη, 641-653.
- Τζιμόπουλος, Χ., 1983. *Γεωργική Υδραυλική: Συλλογικά αρδευτικά δίκτυα με καταιονισμό*, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 263 σελ.
- Τζιμόπουλος, Χ., 1986. *Αντιπληγματική προστασία αρδευτικών δικτύων*. Σεμινάριο Έργων Έγγειων Βελτιώσεων, ΠΣΔΑΤΜ, Αθήνα, 46-57.
- Τζιμόπουλος, Χ., 1991. *Μέθοδος Labye*. Πανεπιστημιακές σημειώσεις, Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη.
- Τολίκας, Δ., 2000. *Υδραυλικό πλήγμα*. Παρατηρητής, Θεσσαλονίκη, 130 σελ.
- Χονδρογιάννης, Σ., 2005. *Απλοποιημένη μη γραμμική μέθοδος βελτιστοποίησης του κόστους ενός αρδευτικού δικτύου υπό πίεση. Σύγκριση με τη μέθοδο του γραμμικού προγραμματισμού. Εφαρμογή στο αρδευτικό δίκτυο Καβασίλων*. Μεταπτυχιακή διατριβή, Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη.

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ TOPSIS ΣΕ ΑΡΔΕΥΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΤΟΥ ΤΟΕΒ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

Χρήστος Τζιμόπουλος

Εργαστήριο Υδραυλικών Έργων και Διαχείρισης Περιβάλλοντος, Τμήμα
Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Α.Π.Θ., 54124, Θεσσαλονίκη,
tzimop@eng.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Εφαρμόζεται η θεωρία της πολυκριτηριακής ανάλυσης με χρήση της μεθόδου TOPSIS για την επιλογή του βέλτιστου αρδευτικού δικτύου στη πεδιάδα Θεσσαλονίκης μεταξύ μιας ομάδας αρδευτικών δικτύων. Ως βέλτιστο αρδευτικό δίκτυο θεωρήθηκε εκείνο το δίκτυο που ικανοποιούσε κατά το δυνατόν περισσότερο ορισμένα κριτήρια τα οποία επιλέχθηκαν προκειμένου να ενσωματωθούν στον οικονομικό χρονικό προγραμματισμό του ΓΟΕΒ Θεσσαλονίκης – Λαγκαδά. Τα δίκτυα αυτά θεωρήθηκαν ως εναλλακτικές δραστηριότητες και ως κριτήρια αξιολόγησης χρησιμοποιήθηκαν τα ακόλουθα : α) παραγωγικότητα ανά στρέμμα με βάση τις καλλιέργειες, β) κόστος παραγωγής, γ) κόστος συντήρησης, δ) ανάγκες των καλλιεργειών σε νερό, ε) διάθεση των προϊόντων παραγωγής. Η βαθμολόγηση των εναλλακτικών ως προς τα κριτήρια έγινε με μία κλίμακα ανάλογη της κλίμακας του Saaty, ενώ η σπουδαιότητα(βάρος) του κάθε κριτηρίου βαθμολογήθηκε με τη μέθοδο της εντροπίας του Shannon.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Πολυκριτηριακή ανάλυση, μέθοδος TOPSIS, βάρη, εντροπία Shannon, πεδιάδα Θεσσαλονίκης.

APPLICATION OF TOPSIS METHOD IN IRRIGATION NETWORKS IN THE THESSALONIKI PLAIN

Christos Tzimopoulos

Laboratory of Hydraulics and Environmental Management, Faculty of Rural and
Surveying Engineering, AUTH., 54124, Thessaloniki, E-mails: tzimop@eng.auth.gr

ABSTRACT

In the present paper the multi-criteria analysis is applied, using TOPSIS method (*Technique for order preference by similarity to ideal solution*) for obtaining the optimal irrigation network among a finite number of networks in the area of Thessaloniki plain. The networks should be graded for certain evaluation criteria in order to be incorporated in the Economic Plan of the GOEB Thessaloniki. The criterions have been selected for each alternative and as optimal solution was considered the network satisfying mostly the selected criteria. Besides, the importance of each criterion is considered and the process of Shannon entropy was applied for the assessment of the weights.

KEY WORDS: Multi-criteria analysis, TOPSIS method, weights, Shannon entropy, Thessaloniki plain

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η κατασκευή και λειτουργία των συλλογικών δικτύων άρδευσης ξεκίνησε στην Ελλάδα κατά την διάρκεια της δεκαετίας του 1960 (Κωνσταντινίδης, 1989; Μπαλιώτη, 2009, Τζιμόπουλος κ.α. 2011, Ζορμπά, 2010). Τα δίκτυα αυτά χωρίζονται σε: α) δίκτυα με ανοικτούς αγωγούς (Διώρυγες σε πρωτεύοντες και δευτερεύοντες αγωγούς και σιμενταύλακες ή καναλέττα σε τριτεύοντες αγωγούς), β) δίκτυα υπό πίεση(δίκτυα με τεχνητή βροχή ή και δίκτυα με σταγόνες βροχής) με σωληνωτούς αγωγούς υπό πίεση σε όλο το δίκτυο. Σήμερα ιδίως τα δίκτυα με ανοικτούς αγωγούς χαρακτηρίζονται από παλαιότητα αλλά και από μια ξεπερασμένη τεχνολογία και κατά το σχεδιασμό τους δεν ελήφθη υπόψη ο παράγων προστασίας τόσο του νερού όσο και του περιβάλλοντος. Κατά τη διαδρομή τους από το φράγμα υδροληψίας μέχρι το χωράφι τα δίκτυα υφίστανται μεγάλες απώλειες νερού λόγω εξάτμισης και επίσης υπάρχουν μεγάλες διαρροές νερού σε πολλά σημεία της διαδρομής τους, λόγω κακής κατασκευής, κακής συντήρησης και κακής θεμελίωσης. Η συντήρηση των δικτύων αυτών γίνεται με μέριμνα των ΓΟΕΒ και επειδή δεν υπάρχουν διαθέσιμοι σημαντικοί χρηματικοί πόροι, γίνεται ένας αυστηρός προγραμματισμός στην χρονική επιλογή των δικτύων αυτών προς συντήρηση. Για τη σωστή διαχείριση και την επισκευή των αρδευτικών δικτύων απαιτείται η γνώση ενός συνόλου κριτηρίων, τα οποία θα βοηθήσουν στην αειφόρο διάθεση του νερού.

Εδώ επελέγησαν πέντε αρδευτικά δίκτυα της πεδιάδας Θεσσαλονίκης και αναζητήθηκε η ιεραρχική κατάταξή τους σύμφωνα με ορισμένα κριτήρια ως προς τα οποία βαθμολογήθηκαν τα αρδευτικά δίκτυα. Τα κριτήρια αυτά επελέγησαν και τα δίκτυα βαθμολογήθηκαν(Ζορμπά, 2010) σε συνεργασία με τον ΓΟΕΒ και είναι τα ακόλουθα: α) C_1 = παραγωγικότητα ανά στρέμμα με βάση τις καλλιέργειες, β) C_2 = κόστος παραγωγής, γ) C_3 = κόστος συντήρησης, δ) C_4 = ανάγκες των καλλιεργειών σε νερό, ε) C_5 = διάθεση των προϊόντων παραγωγής. Σύμφωνα με την ιεραρχική κατάταξη που προέκυψε, θα αποφασίσει ο ΓΟΕΒ πεδιάδας Θεσσαλονίκης τη χρονολογική σειρά συντήρησης των δικτύων αυτών. Ο βαθμός κακής ποιότητας δεν ελήφθη υπόψη, γιατί θεωρήθηκε ο ίδιος για όλα τα δίκτυα.

Το όλο πρόβλημα της εύρεσης της ιεραρχικής κατάταξης των αρδευτικών δικτύων θεωρείται ως πρόβλημα πολυκριτηριακής ανάλυσης για το οποίο κατά τη δεκαετία του 1980 και εντεύθεν αναπτύχθηκαν πολλές μέθοδοι ως ακολούθως:

- I. **Πολυκριτηριακή θεωρία χρησιμότητας** (MAUT) ή **Μέθοδοι Βαθμολόγησης** (Scoring Methods, Triantaphyllou, 2000), όπως α) το Σταθμισμένο Αθροιστικό μοντέλο (WSM), β) το μοντέλο Σταθμισμένου Γινομένου (WPM), και γ) Η Διαδικασία Αναλυτικής Ιεράρχησης(AHP, Saaty, 1980, 1986, 1990, και 2008).
- II. **Συμβιβαστικές μέθοδοι** όπως α) Συμβιβαστικός Προγραμματισμός (Zeleny, 1982), και β) TOPSIS ή η Τεχνική της Διάταξης Προτίμησης με ομοιότητα στην ιδεατή λύση. (Yoon, 1980, Hwang and Yoon ,1981).
- III. **Μέθοδοι υπεροχής**, όπως α) ELECTRE(Roy, 1968, 1985), και β) η μέθοδος PROMETHEE(Brans and Vincke, 1985).

Στο παρόν άρθρο χρησιμοποιείται η μέθοδος TOPSIS η οποία αποτελεί μια επέκταση του συμβιβαστικού προγραμματισμού, όπως αναλύεται από τους Yoon ,(1980), και Hwang and Yoon, (1981) και γίνεται μια σύγκριση της μεθόδου αυτής με τη μέθοδο του Συμβιβαστικού Προγραμματισμού (Zeleny, 1982 και Yu, 1985). Το μεγαλύτερο ίσως πρόβλημα στην κατάστρωση και επίλυση ενός τέτοιου μοντέλου για την επιλογή της καλύτερης εναλλακτικής δραστηριότητας αποτελεί η μέθοδος για τον υπολογισμό των προτιμήσεων(βαρών) των κριτηρίων. Εδώ χρησιμοποιείται η μέθοδος της εντροπίας(EM,

Shannon, 1948), η οποία αποτελεί μια τεχνική εύρεσης αντικειμενικών βαρών και στηρίζεται σε μέση εσωτερική πληροφόρηση των βαθμών επίδοσης των κριτηρίων.

Στο χώρο της Διαχείρισης Υδατικών Πόρων με ανάλογα προβλήματα διαχείρισης έχουν ασχοληθεί οι Duckstein and Opricovic (1980), Opricovic (1993), Μαραβέα (1998), Καρασαββίδης (2003), Μπάκα (2006), Zarghami (2006), Schiau and Wu (2006), Καρασαββίδης κ.ά. (2009), Ζορμπά(2010), Τζιμόπουλος κ.α.(2011).

2. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Έστω ότι $X=(x^1,x^2,...x^m)$, συμβολίζει το σύνολο των αρχικών εναλλακτικών δυνατών δραστηριοτήτων(αρδευτικά δίκτυα), και κάθε μια εναλλακτική δραστηριότητα χαρακτηρίζεται από n **κριτήρια αξιολόγησης** $C_i, i=1,2,...n$. Έτσι η x^k εναλλακτική δραστηριότητα βαθμολογείται ως εξής:
 $x^k = (x_1^k, x_2^k, \dots, x_n^k)$, $k = 1,2, \dots, m$, όπου x_j^k σημαίνει το **βαθμό επίδοσης** της x^k εναλλακτικής δραστηριότητας ως προς το κριτήριο C_j . Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται το μητρώο απόφασης $x_j^i, i = 1,2, \dots, m, j = 1,2, \dots, n$:

$$\begin{matrix}
 & \begin{matrix} c_1 & c_2 & \dots & \dots & c_n \end{matrix} \\
 \begin{matrix} x^1 \\ x^2 \\ \dots \\ x^m \end{matrix} & \begin{bmatrix} x_1^1 & x_2^1 & \dots & \dots & x_n^1 \\ x_1^2 & x_2^2 & \dots & \dots & x_n^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_1^m & x_2^m & \dots & \dots & x_n^m \end{bmatrix}
 \end{matrix} \tag{2.1}$$

Το μητρώο αυτό σύμφωνα με τους Yoon and Hwang(1995) και Chen, (2000) κανονικοποιείται ως ακολούθως:

$$\begin{matrix}
 & \begin{matrix} c_1 & c_2 & \dots & \dots & c_n \end{matrix} \\
 \begin{matrix} x^1 \\ x^2 \\ \dots \\ x^m \end{matrix} & \begin{bmatrix} r_1^1 & r_2^1 & \dots & \dots & r_n^1 \\ r_1^2 & r_2^2 & \dots & \dots & r_n^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_1^m & r_2^m & \dots & \dots & r_n^m \end{bmatrix}
 \end{matrix}, \quad r_j^i = \frac{x_j^i}{\{\sum_{i=1}^m (x_j^i)^2\}^{1/2}} \quad \text{ή} \quad r_j^i = \frac{x_j^i}{\sum_{i=1}^m x_j^i} \tag{2.2}$$

Οι συμβιβαστικές λύσεις του Zeleny(1985) είναι αυτές που βρίσκονται εγγύτερα μέσω μιας απόστασης d προς το ιδεατό σημείο. Συνήθως ως σημείο αναφοράς χρησιμοποιείται το αντιληπτό ιδεατό σημείο, θεωρούμενο ως το σημείο (εναλλακτική δραστηριότητα), του οποίου τα κριτήριά έχουν φθάσει τις καλύτερες επιδόσεις. Για παράδειγμα στο παρακάτω μητρώο ως βέλτιστο αντιληπτό ιδεατό σημείο χαρακτηρίζεται το σημείο(ιδεατή εναλλακτική δραστηριότητα) $x^*=[9^*,8^*,7^*,8^*]$.

	C_1	C_2	C_3, \dots, C_4, \dots	
x^1	1	2	5	8*
x^2	5	3	6	3
x^3	6	7	7*	5
x^4	9*	8*	4	4

Το αντιληπτό ιδεατό σημείο δεν βρίσκεται στο χώρο των δυνατών λύσεων και για το λόγο αυτό εισάγονται οι συμβιβαστικές λύσεις, οι οποίες προσεγγίζουν το ιδεατό σημείο μέσω μιας απόστασης. Στη μέθοδο TOPSIS χρησιμοποιείται η ευκλείδεια απόσταση μεταξύ της εναλλακτικής x_i και της ιδεατής εναλλακτικής x^* :

$$d_2^*(i) = \left\{ \sum_{j=1}^n w_j^2 (r_j^* - r_j^i)^2 \right\}^{1/2}, i = 1, 2, \dots, m, \quad (2.3)$$

όπου r_j^* αποτελεί τον ευνοϊκότερο κανονικοποιημένο βαθμό επίδοσης για το κριτήριο C_j . Με τον τρόπο αυτό βρίσκεται η τιμή της συμβιβαστικής λύσης από τη σχέση:

$$C_2^* = \min(d_2^*(i)), i = 1, 2, \dots, m. \quad (2.4)$$

Ο Yoon(1980) και Yoon and Hwang(1995) εισάγουν την έννοια του αντι-ιδεατού σημείου(εναλλακτικής δραστηριότητας) ως εκείνου του σημείου, του οποίου τα κριτήριά έχουν φθάσει τις χειρότερες επιδόσεις. Η απόσταση μεταξύ της εναλλακτικής x_i και της αντι-ιδεατής εναλλακτικής x^- δίνεται ως εξής:

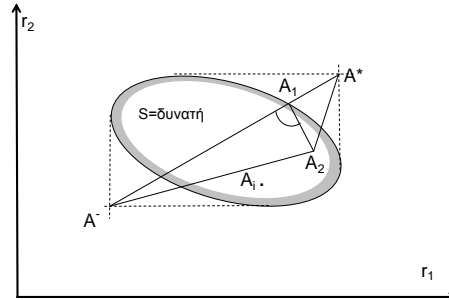
$$d_2^-(i) = \left\{ \sum_{j=1}^n w_j^2 (r_j^- - r_j^i)^2 \right\}^{1/2}, i = 1, 2, \dots, m, \quad (2.5)$$

όπου r_j^- αποτελεί τον δυσμενέστερο κανονικοποιημένο βαθμό για το κριτήριο C_j . Με τον τρόπο αυτό βρίσκεται η τιμή της συμβιβαστικής λύσης από τη σχέση:

$$C_2^- = \max(d_2^-(i)), i = 1, 2, \dots, m. \quad (2.6)$$

Ο Yoon (1980) θεωρεί λοιπόν ότι οι εναλλακτικές δραστηριότητες οι οποίες είναι πολύ απομακρυσμένες από το αντι-ιδεατό σημείο προτιμούνται από αυτές που είναι πλησίον στο αντι-ιδεατό σημείο. Πολλές φορές η συμβιβαστική λύση που βασίζεται στο ιδεατό σημείο δεν ταυτίζεται με αυτήν που βασίζεται στο αντι-ιδεατό σημείο. Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, η A_1 εναλλακτική δραστηριότητα βασίζεται στην ιδεατή A^* και βρίσκεται εγγύτατα αυτής, ενώ η A_2 βασίζεται στην αντι-ιδεατή A^- , βρίσκεται πολύ απομακρυσμένη από αυτήν, αλλά προφανώς οι δύο εναλλακτικές δραστηριότητες δεν ταυτίζονται. Αυτή η αντίθεση οδήγησε στη σκέψη ότι θα έπρεπε οι δύο αποστάσεις d_2^*, d_2^- να ληφθούν υπόψη ταυτόχρονα. Οι Hwang and Yoon's (1981) προσδιόρισαν ως ομοιότητα (ή σχετική εγγύτητα) προς το ιδεατό σημείο των εναλλακτικών δραστηριοτήτων το λόγο:

$$D_2(i) = \frac{d_2^-}{d_2^* + d_2^-}. \quad (2.7)$$



Σχήμα 1. Ιδεατό A^* και αντί-ιδεατό σημείο A^- .

Η λύση TOPSIS είναι τελικά:

$$T_2 = \max\{ D_2(i) \}, \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (2.8)$$

Είναι φανερό ότι ισχύει: $0 \leq T_2 \leq 1$, όπου $T_2=1$, εάν $A_i=A^*$, και $T_2=0$, εάν $A_i=A^-$.

2.1 ΠΡΟΤΙΜΗΣΕΙΣ-ΒΑΡΗ

Η μέθοδος της εντροπίας του Shannon (Shannon, 1948) είναι απολύτως κατάλληλη για τη μέτρηση των σχετικών εντάσεων αντιθέσεων που υπάρχουν μεταξύ των κριτηρίων και παριστάνει τη μέση εσωτερική πληροφόρηση που μεταδίδεται στον λήπτη απόφασης. Η εντροπία αποτελεί ένα μέτρο αβεβαιότητας διαμορφωμένη με τη χρήση της θεωρίας πιθανοτήτων. Δείχνει ότι μια πεπλατυσμένη κατανομή παριστά περισσότερη αβεβαιότητα από μια απότομη κατανομή. Το ποσό της πληροφορίας που περιέχεται στο παραπάνω μητρώο και εκπέμπεται από κάθε κριτήριο C_j ($j=1, 2, \dots, m$) μπορεί να μετρηθεί με την τιμή εντροπίας e_j ως ακολούθως:

$$e_j = -k \sum_{i=1}^n r_j^i \ln r_j^i, \quad (2.9)$$

όπου $k=1/\ln n$ αποτελεί μια σταθερά που εξασφαλίζει τη σχέση $0 \leq e_j \leq 1$. Ο βαθμός απόκλισης (d_j) της μέσης εσωτερικής πληροφόρησης που περιέχεται σε κάθε κριτήριο C_j ($j=1, 2, \dots, m$) υπολογίζεται ως εξής:

$$d_j = 1 - e_j. \quad (2.10)$$

Η απόκλιση d_j παριστά την ενυπάρχουσα ένταση αντιθέσεων του κριτηρίου C_j , δηλαδή όσο περισσότερο αποκλίνοντες είναι οι βαθμοί επίδοσης r_j^i ($i = 1, 2, \dots, n$) για το κριτήριο C_j ,

τόσο μεγαλύτερη είναι η αντιστοιχούσα απόκλιση d_j και τόσο μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το κριτήριο C_j για το πρόβλημα (Zeleny, 1982). Εξ αντανάκλασεως συμπεραίνεται ότι ένα κριτήριο είναι λιγότερο ενδιαφέρον για ένα ειδικό πρόβλημα εάν όλες οι εναλλακτικές δραστηριότητες έχουν όμοιους βαθμούς επίδοσης για το κριτήριο αυτό, και στην περίπτωση αυτή το κριτήριο μπορεί να παραλείπεται από το μητρώο απόφασης, διότι δεν μεταδίδει πληροφορίες στον λήπτη απόφασης. Το αντικειμενικό βάρος για κάθε κριτήριο δίδεται από την ακόλουθη έκφραση:

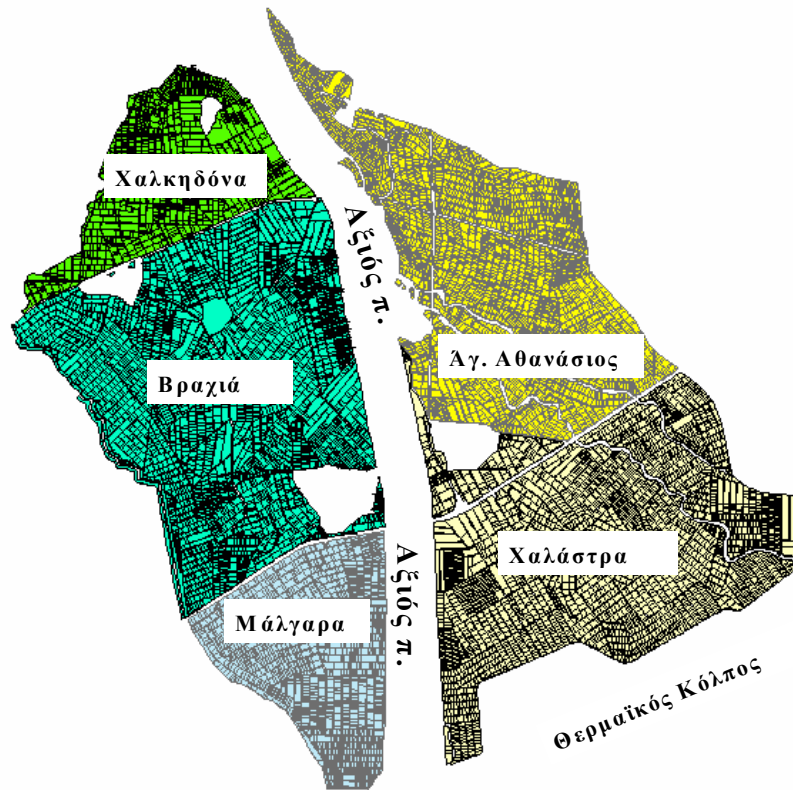
$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{k=1}^m d_k} \quad (2.11)$$

3. ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΑΡΔΕΥΤΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ-ΙΕΡΑΡΧΗΣΗ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ

3.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Η περιοχή μελέτης αποτελείται από 5 αρδευτικά δίκτυα της πεδιάδας Θεσσαλονίκης και συγκεκριμένα:

- a) x^1 = το αρδευτικό δίκτυο του Αγίου Αθανασίου,
- b) x^2 = το αρδευτικό δίκτυο της Βραχιάς,
- c) x^3 = το αρδευτικό δίκτυο των Μαλγάρων,
- d) x^4 = το αρδευτικό δίκτυο της Χαλάστρας
- e) x^5 = το αρδευτικό δίκτυο της Χαλκηδόνας.



Σχήμα 2. Περιοχή έρευνας

Κοινό χαρακτηριστικό και των πέντε αρδευτικών δικτύων (εναλλακτικές δραστηριότητες/σενάρια) είναι ότι εφοδιάζονται με νερό από τον ποταμό Αξίο για να εξυπηρετήσουν τις υδατικές ανάγκες των καλλιεργειών. Επιπρόσθετα η κατασκευή τους έγινε κατά την πρώτη φάση κατασκευής των εγγειοβελτιωτικών έργων που έγιναν στην πεδιάδα Θεσσαλονίκης κατά την δεκαετία του 1960 (Κωνσταντινίδης, 1989). Το πρόβλημα λοιπόν ανάγεται στη ιεραρχική ταξινόμηση των δικτύων αυτών από πλευράς οικονομικού Προγραμματισμού.

Για τη εύρεση της ιδανικής λύσης του προβλήματος, είναι αναγκαία η θέσπιση κριτηρίων τα οποία θα καλύπτουν τόσο το οικονομικό-περιβαλλοντικό όσο και το παραγωγικό σκέλος της αξιολόγησης του κάθε σεναρίου. Έτσι, όπως ήδη αναφέρθηκε χρησιμοποιούνται τα παρακάτω βασικά κριτήρια:

- a) C_1 = παραγωγικότητα ανά στρέμμα με βάση τις καλλιέργειες,
- b) C_2 = κόστος παραγωγής,
- c) C_3 = κόστος συντήρησης,
- d) C_4 = ανάγκες των καλλιεργειών σε νερό,
- e) C_5 = διάθεση των προϊόντων παραγωγής.

Η βαθμονόμηση των κριτηρίων έγινε μερικώς με μία κλίμακα ανάλογη της μεθόδου Α.Η.Ρ. που εισήχθη το 1980 από τον Saaty, και παρουσιάζεται στον Πίνακα 1. Ο χειρίστος βαθμός είναι το 1 ενώ ο μέγιστος το 9. Ο κύριος λόγος που χρησιμοποιήθηκε αυτή η βαθμονόμηση ήταν για να επιτευχθεί κατά το δυνατό η αντικειμενοποίηση των κριτηρίων.

Πίνακας 1. Λεκτική βαθμονόμηση των κριτηρίων

Αριθμητική βαθμονόμηση	Λογική βαθμονόμηση
9	εξαιρετικά καλή (EG)
8	Πολύ, πολύ καλή (VVG)
7	πολύ καλή (VG)
6	Αρκετά καλή (SG)
5	καλή(G)
4	μετρίως καλή (MG)
3	μέτρια πτωχή(MP)
2	πτωχή(P)
1	Πολύ πτωχή (VP)

3.2 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Το μητρώο απόφασης x_j^i περιέχει τα στοιχεία που δείχνουν το βαθμό της επίδοσης των διαφορετικών σεναρίων για τα διαφορετικά κριτήρια (Ζορμπά, 2010). Ο δείκτης i είναι για τα διαφορετικά σενάρια (εναλλακτικές προτάσεις), ενώ ο δείκτης j για τα διαφορετικά κριτήρια. Δείχνει δηλαδή ο x_j^i το βαθμό της επίδοσης του κάθε σεναρίου ως προς τα διάφορα κριτήρια. Στον Πίνακα 2 παρουσιάζεται η αριθμητική βαθμολογία των αρδευτικών δικτύων για την περιοχή μελέτης, ενώ στον Πίνακα 3 δίνεται η λογική βαθμολογία του προβλήματος.

Πίνακας 2. Αριθμητική αξιολόγηση των δικτύων

	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅
x ¹	8	3	5	2	8
x ²	6	3	3	2	4
x ³	1	3	3	2	5
x ⁴	7	1	1	3	9
x ⁵	3	4	2	1	1

Πίνακας 3. Λεκτική αξιολόγηση των δικτύων

	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅
X ¹	VVG	MP	G	P	VVG
X ²	SG	MP	MP	P	MG
X ³	VP	MP	MP	P	G
X ⁴	VG	VVG	VP	MP	EG
X ⁵	MP	MG	P	VP	VP

Για την εύρεση των βαρών με τη μέθοδο της εντροπίας έγινε πρώτα η αδιαστατοποίηση του προβλήματος με βάση τη σχέση (2.2): $r_j^i = \frac{x_j^i}{\sum_{i=1}^m x_j^i}$ και το νέο κανονικοποιημένο μητρώο παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.

Πίνακας 4. Κανονικοποιημένο Μητρώο Απόφασης r_j^i

	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅
x ¹	0,320	0,214	0,357	0,200	0,296
x ²	0,240	0,214	0,214	0,200	0,148
x ³	0,040	0,214	0,214	0,200	0,185
x ⁴	0,280	0,071	0,071	0,300	0,333
x ⁵	0,120	0,286	0,143	0,100	0,037

Από τον Πίνακα 4 υπολογίστηκαν με τη σειρά:

- Τα διανύσματα $e_j = -k \sum_{i=1}^n r_j^i \ln r_j^i$, $j = 1, 2, \dots, 5$,
- τα διανύσματα $d_j = 1 - e_j$, $j = 1, 2, \dots, 5$,
- τα βάρη $w_j = \frac{d_j}{\sum_{k=1}^m d_k}$, $j = 1, 2, \dots, 5$.

Ο Πίνακας 5 παρουσιάζει τα βάρη(προτιμήσεις) των διαφόρων κριτηρίων

Πίνακας 5. Τα βάρη w_j των κριτηρίων

W_1	W_2	W_3	W_4	W_5
0,286	0,128	0,202	0,092	0,291

Με βάση τα παραπάνω δημιουργήθηκε ο Πίνακας 6 που αποτελεί το ζυγостаθμισμένο Κανονικοποιημένο Μητρώο Απόφασης $v_{ij}=w_jr_{ij}$. Στον Πίνακα αυτό σε κάθε στήλη επιλέγησαν οι μεγαλύτερες (*) και μικρότερες τιμές (·). Με βάση τις τιμές αυτές και τα στοιχεία του Πίνακα 6, υπολογίστηκαν με τη βοήθεια των σχέσεων (3) και (5) οι ελάχιστες και μέγιστες αποστάσεις από τα ιδεατό και αντι-ιδεατό σημεία d_2^* και d_2^- , καθώς και η ομοιότητα ή σχετική εγγύτητα $D_2(i) = d_2^- / (d_2^* + d_2^-)$. Οι σχέσεις αυτές δίνονται στον Πίνακα 7.

Πίνακας 6. Ζυγостаθμισμένο Κανον. Μητρώο Απόφασης $v_{ij}=w_jr_{ij}$

	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
x^1	0,092*	0,027	0,072*	0,018	0,086
x^2	0,069	0,027	0,043	0,018	0,043
x^3	0,011·	0,027	0,043	0,018	0,054
x^4	0,080	0,009·	0,014·	0,028*	0,097*
x^5	0,034	0,037*	0,029	0,009·	0,011·

Πίνακας 7. Κατάταξη των αρδευτικών δικτύων με τη μέθοδο TOPSIS

	$d_2^*(i)$	$d_2^-(i)$	$D_2(i)=d_2^- / (d_2^* + d_2^-)$	Κατάταξη	
x^1	0,02	0,13	0,88	1	Άγ. Αθανάσιος
x^2	0,07	0,07	0,53	3	Βραχιά
x^3	0,10	0,06	0,37	4	Μάλγαρα
x^4	0,07	0,11	0,63	2	Χαλάστρα
x^5	0,11	0,04	0,25	5	Χαλκηδόνα

Οι παραπάνω αριθμητικοί υπολογισμοί των αποστάσεων για τα διάφορα βάρη έγιναν με τη βοήθεια του προγράμματος “TOPSIS” σε γλώσσα προγραμματισμού Visual Fortran (Τζιμόπουλος, 2011). Από τον Πίνακα 7 φαίνεται ότι το βέλτιστο δίκτυο είναι του Αγίου Αθανασίου και ακολουθούν το δίκτυο Χαλάστρας, το δίκτυο Βραχιάς, το δίκτυο Μαλγάρων και το δίκτυο Χαλκηδόνας. Έγινε και μια σύγκριση με τη μέθοδο του Συμβιβαστικού Προγραμματισμού και τα βάρη υπολογίστηκαν πάλι με τη μέθοδο εντροπίας του Shannon. Τα αποτελέσματα κατάταξης υπήρξαν ακριβώς τα ίδια. Όταν όμως χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των βαρών η μέθοδος του Saaty τα αποτελέσματα της κατάταξης υπήρξαν εντελώς διαφορετικά, δηλαδή στην περίπτωση αυτή η κατάταξη είχε ως εξής:

$$X_1 > X_3 > X_2 > X_5 > X_4,$$

όπου το σύμβολο $>$ αποτελεί σχέση προτίμησης.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η μέθοδος TOPSIS αποτελεί μια αξιόπιστη Πολυκριτηριακή μέθοδο για την επίλυση προβλημάτων που έχουν να κάνουν με αλληλοσυγκρουόμενα κριτήρια και θεωρείται ως επέκταση της μεθόδου του Συμβιβαστικού Προγραμματισμού. Επιτρέπει σε μια περιοχή μελέτης με εναλλακτικές προτάσεις την εύρεση της ιδανικής λύσης με βάση την ομοιότητα ή σχετική εγγύτητα και την ιεράρχηση των αρδευτικών δικτύων ως προς τις ανάγκες του Προγράμματος συντήρησης, δίνοντας έτσι την δυνατότητα στον λήπτη της απόφασης και εν προκειμένω στον ΓΟΕΒ να προβεί στον ορθολογικό προγραμματισμό της συντήρησης των αρδευτικών δικτύων, ταξινομώντας τα διάφορα δίκτυα ανάλογα με την σπουδαιότητά τους. Θα πρέπει όμως να δίνεται μεγάλη προσοχή στην επιλογή της μεθόδου υπολογισμού των βαρών των κριτηρίων, επιλέγοντας μεθόδους όπως η μέθοδος εντροπίας του Shannon, η οποία αποτελεί μια αποτελεσματική τεχνική εύρεσης αντικειμενικών βαρών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Zormpá Δ., 2010. *Πολυκριτηριακή ανάλυση με χρήση συμβιβαστικού προγραμματισμού. Εφαρμογή σε αρδευτικά δίκτυα της πεδιάδας Θεσσαλονίκης*, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Τ.Α.Τ.Μ., Μ.Π.Σ.: Κατεύθυνση: Υδατικοί Πόροι, Α.Π.Θ., 207 σελ..
- Καρασαββίδης, Π., 2003. *Εφαρμογή της Πολυκριτηριακής Ανάλυσης (Συμβιβαστικός Προγραμματισμός) στη Διαχείριση Υδατικών Πόρων στην Περιοχή Λιβαδείου Λαρίσης. Επιλογή Βέλτιστης Θέσης Φράγματος*. Μεταπτυχιακή Διατριβή, ΤΑΤΜ, Α.Π.Θ., 91 σελ.
- Καρασαββίδης Π., Χ. Τζιμόπουλος, Χ. Ευαγγελίδης, 2009. *Εφαρμογή της πολυκριτηριακής ανάλυσης (Συμβιβαστικός προγραμματισμός) στη διαχείριση υδατικών πόρων στην περιοχή Λιβαδείου Λαρίσης.*, 6ου Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωργικής Μηχανικής (ΕΓΜΕ), σελ. 123-130, Θεσσαλονίκη.
- Κωνσταντινίδης, Κ., 1989. *Τα εγγειοβελτιωτικά έργα στην πεδιάδα Θεσσαλονίκης*. Εκδόσεις ΓΕΩΤ.Ε.Ε, Θεσσαλονίκη, 134 σελ.
- Μαραβέα, Ε., 1998. *Μέθοδος πολυκριτηριακής ανάλυσης στη διαχείριση των υδατικών πόρων*. Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π., 97 σελ.
- Μπάκα, Μ., 2006. *Διαχείριση Υδατικών Πόρων με Μεθόδους Πολυκριτηριακής Ανάλυσης (Συμβιβαστικός Προγραμματισμός) και Εφαρμογή στην Υδρολογική Λεκάνη του Ποταμού Νέστου*. Μεταπτυχιακή Διατριβή, Α.Π.Θ., 222 σελ.
- Μπαλιώτη, Β., 2009. *Διαχείριση αρδευτικών δικτύων με τη βοήθεια του γραμμικού προγραμματισμού*. *Εφαρμογή στο Αρδευτικό δίκτυο Γέφυρας*. Μεταπτυχιακή Διατριβή, Α.Π.Θ., 162 σελ.
- Τζιμόπουλος Χ., Δ. Ζορμπά, Χ. Ευαγγελίδης, 2011. *Πολυκριτηριακή ανάλυση με χρήση συμβιβαστικού προγραμματισμού. Εφαρμογή σε αρδευτικά δίκτυα της πεδιάδας Θεσσαλονίκης*, Πρακτικά, 7^ο Συνέδριο ΕΓΜΕ, ΑΘΗΝΑ.
- Τζιμόπουλος Χ., 2011. *Πρόγραμμα "TOPSIS" σε γλώσσα Visual Fortran*, Εργαστήριο Υδραυλικών Έργων και Διαχείρισης Περιβάλλοντος, Α.Π.Θ. .
- Brans J. P., Vincke Ph., 1985. *A preference ranking organisation method: The PROMETHEE method for multiple criteria decision making*, Management Science, 31, 6, 647 – 656.
- Chen C.-T., 2000. *Extension of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment*, Fuzzy Sets and Systems, 114, 1-9

- Duckstein, L. and Opricovic, S., 1980. *Multiobjective optimization in river basin development*. Water Res. Res., 16(1): 14-20.
- Hwang and Yoon (1981). *Multiple Attributes Decision Making Methods and Applications*, Berlin, Heidelberg: Springer, 350 pp.
- Opricovic, S., 1993. *Dynamic programming with application to water reservoir management*. Agricultural Systems, 41: 335-347.
- Roy, B., 1968. *Classement et choix en présence de points de vue multiples (la méthode ELECTRE)*, RIRO, n° 8, 57 – 75.
- Roy, B., 1985. *Méthodologie Multicritère d' Aide à la Décision*, Economica, Paris
- Saaty, T.L., 1980. *The Analytic Hierarchy Process*. Mc Graw-Hill, New York. 450 pp.
- Saaty, T.L., 1986. *A note on the AHP and expected value theory*, Socio-Econ. Plann. Sci., Vol.20, No.6, 397-398.
- Saaty, T.L., 1990. *How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process*, European Journal of Operational Research 48, 9-26.
- Saaty, T.L., 2008. *Relative Measurement and Its Generalization in Decision Making. Why Pairwise Comparisons are Central in Mathematics for the Measurement of Intangible Factors. The Analytic Hierarchy/Network Process*, RACSAM, Rev. R. Acad. Cien. Serie A. Mat. VOL. 102 (2), 251–318.
- Shannon C.E., 1948. *A Mathematical Theory of Communication*, the Bell System, Technical Journal, Vol. XXVII, July, No. 3, 279-423.
- Schiau, J.T. and Wu F.C., 2006. *Compromise Programming Methodology for determining instream flow under multiobjective water allocation criteria*. JAWRA Journal of the A.W.R.A., 42(5): 1179-1191.
- Triantaphyllou E., 2000. *Multi-Criteria Decision making Methods: A Comparative Study*, Springer , 280 p.p.
- Yoon K., 1980. *System selection by multiple attributes decision making*, PhD, dissertation, Kansas State University, Manhattan, Kansas, USA.
- Yoon K. C.L. Hwang ,1995. *Multiple Attributes Decision Making-An Introduction*, Series: Quantitative Applications in the Social Sciences, a SAGE Publications, 75 pp.
- Yu P.L., 1985. *Multiple-Criteria Decision Making, Concepts, Techniques, and Extension*. Plenum Press, Lawrence, Kansas, pp. 388.
- Zarghami, M., 2006. *Integrated water resources management in polrud irrigation system*. Water Resources Management, 20: 215-225.
- Zeleny, M., 1982. *Multiple Criteria Decision Making*. McGraw-Hill, New York, 562 pp.
- Zeleny, M. , 1985. *Spontaneous Social Orders. The Science and Praxis of Complexity*, International Journal of General Systems, 11(2)1985, 117-131.

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΙΚΟΥ ΝΕΡΟΥ ΜΕ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ SWBACROS ΣΕ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΒΑΜΒΑΚΙΟΥ ΣΕ ΛΥΣΙΜΕΤΡΑ

**Χ. Παρασκευάς^{1,*}, Π. Γεωργίου¹, Α. Ηλίας², Α. Πανώρας²,
Χ. Μπαμπατζιμόπουλος¹**

¹Τομέας Εγγείων Βελτιώσεων, Εδαφολογίας και Γεωργικής Μηχανικής,
Γεωπονική Σχολή, Α.Π.Θ., 54124, Θεσσαλονίκη

²ΕΘ.Ι.ΑΓ.Ε., Ινστιτούτο Εγγείων Βελτιώσεων, 57400, Σίνδος

*✉ paraskevasb@gmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή μελετήθηκε η δυναμική του εδαφικού νερού με τη βοήθεια δύο λυσιμέτρων ελεύθερης στράγγισης σε καλλιέργεια βαμβακιού. Στα δύο λυσιμέτρα γινόταν συνεχής καταγραφή της εδαφικής υγρασίας μέσω δύο βαθμονομημένων αισθητήρων τεχνολογίας FDR. Τα δεδομένα από το λυσίμετρο 2 χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό φυτικών συντελεστών με τη μέθοδο του υδατικού ισοζυγίου, από όπου προέκυψαν αυξημένες τιμές στη διάρκεια του μέσου σταδίου. Οι αυξημένες τιμές οφείλονταν στο «φαινόμενο όασης» (oasis effect) λόγω ύπαρξης πολύ μικρού σε επιφάνεια και ακτίνα περιβάλλοντα χώρου. Τα δεδομένα από το λυσίμετρο 1 χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη της δυναμικής του εδαφικού νερού με το μαθηματικό μοντέλο SWBACROS χρησιμοποιώντας τόσο τους φυτικούς συντελεστές που προσδιορίστηκαν, όσο και βιβλιογραφικούς φυτικούς συντελεστές. Από τις προσομοιώσεις προέκυψε ότι το «φαινόμενο όασης» πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη κατά τη μελέτη του υδατικού ισοζυγίου καλλιεργούμενων εδαφών.

STUDY OF THE SOIL WATER DYNAMICS USING SWBACROS MODEL IN A LYSIMETER COTTON PLOT

C. Paraskevas^{1,*}, P. Georgiou¹, A. Ilias², A. Panoras², C. Babajimopoulos¹

¹Department of Hydraulics, Soil Science and Agricultural Engineering,
School of Agriculture, Aristotle University, Thessaloniki 54124

²N.AG.RE.F., Land Reclamation Institute, 57400, Sindos

*✉ paraskevasb@gmail.com

ABSTRACT

The soil water dynamics was studied out in two free-drainage lysimeters cultivated with cotton with the SWBACROS model. Soil moisture was measured for the whole soil profile with two sensors based on FDR technology. The sensors were calibrated with gravimetric moisture samples. The soil water balance method was used to estimate crop coefficients in lysimeter 2. These coefficients were higher than literature's coefficients during the mid-season stage due to 'oasis effect'. The local crop coefficients of lysimeter 2 were used for the simulation of the water movement in lysimeter 1 by the SWBACROS model. Simulated results obtained with the local crop coefficients were much better than those obtained with literature's coefficients indicating that 'oasis effect' is very important in the study of the water balance of cultivated soils.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα λυσίμετρα είναι δοχεία με διαταραγμένους ή αδιατάρακτους όγκους εδάφους, εγκατεστημένα στην επιφάνεια του εδάφους τα οποία υπολογίζουν τη στράγγιση / έκπλυση από το κάτω μέρος του εδάφους με διάφορες μεθόδους (Lanthaler, 2004). Τα λυσίμετρα απομονώνουν υδρολογικά το έδαφος το οποίο περιέχουν από αυτό που το περιβάλλει (Kutilek and Nielsen, 1994) και θεωρούνται ότι προσομοιώνουν καλύτερα τις φυσικές συνθήκες του αγρού σε σχέση με τις εργαστηριακές στήλες εδάφους (Bergström, 1990, Abdou and Flury, 2004). Ακόμη τα λυσίμετρα χρησιμοποιούνται ευρέως για τη μελέτη της ροής του νερού στο έδαφος και στη μεταφορά των ουσιών (Bergström and Jarvis, 1993, Abdou and Flury, 2004) καθώς και στη βαθμονόμηση μοντέλων και στον προγραμματισμό των αρδεύσεων με πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα (Flury et al., 1999, Zhou et al., 2007).

Ο προγραμματισμός των αρδεύσεων απαιτεί τον υπολογισμό της χωροχρονικής διακύμανσης του διαθέσιμου στα φυτά εδαφικού νερού. Ο έλεγχος της ποιότητας του νερού το οποίο επιστρέφει στους αποδέκτες, η συσσώρευση των αλάτων στο ριζόστρωμα λόγω της άρδευσης, της εξάτμισης και της πρόσληψης του νερού με τις ρίζες και η ρύπανση των επιφανειακών και υπόγειων νερών, εξαρτάται από την κίνηση και την ανακατανομή του νερού στην ακόρεστη ζώνη του εδάφους (Αντωνόπουλος, 1999). Τα παραπάνω οδηγούν στην ανάγκη μιας ολοκληρωμένης μεθοδολογίας για τον προσδιορισμό της κίνησης του εδαφικού νερού στην ακόρεστη ζώνη, ώστε να είναι δυνατή η καλύτερη διαχείριση του νερού στην ζώνη αυτή. Για το λόγο αυτό αναπτύχθηκαν σύνθετα μαθηματικά μοντέλα προσομοίωσης της δυναμικής του νερού σε καλλιεργούμενα εδάφη (Feddes et al., 1978, Babajimopoulos et al., 1995, Simunek et al., 1998, Αντωνόπουλος, 1998).

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η μελέτη της κίνησης του νερού σε έδαφος καλλιεργούμενο με βαμβάκι με χρήση λυσιμέτρων. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν δύο λυσίμετρα ελεύθερης στράγγισης στο Ινστιτούτο Εγγείων Βελτιώσεων του ΕΘΙΑΓΕ στην περιοχή της Σίνδου Θεσσαλονίκης κατά την καλλιεργητική περίοδο του 2007, στα οποία γινόταν συνεχής καταγραφή της εδαφικής υγρασίας μέσω δύο βαθμονομημένων αισθητήρων τεχνολογίας FDR. Επιπλέον, συγκεντρώθηκαν όλα τα απαιτούμενα δεδομένα (εδαφολογικά, αγρονομικά και μετεωρολογικά) για τη μελέτη της δυναμικής του εδαφικού νερού. Με τη βοήθεια των δεδομένων του λυσιμέτρου 2, προσδιορίστηκαν τοπικοί φυτικοί συντελεστές με τη μέθοδο του υδατικού ισοζυγίου. Οι φυτικοί συντελεστές που προέκυψαν είχαν αυξημένες τιμές, οι οποίες οφείλονταν στο «φαινόμενο όασης» (oasis effect) λόγω ύπαρξης πολύ μικρού σε επιφάνεια και ακτίνα περιβάλλοντα χώρου. Οι τιμές των φυτικών συντελεστών, μαζί με τα υπόλοιπα δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη της κίνησης του νερού στο λυσίμετρο 1 με την εφαρμογή του μαθηματικού μοντέλου SWBACROS (Babajimopoulos et al., 1995). Η ανταπόκριση του μοντέλου με τη χρήση των τοπικών φυτικών συντελεστών ήταν πολύ καλύτερη από ότι με τη χρήση βιβλιογραφικών φυτικών συντελεστών πράγμα που δείχνει ότι το «φαινόμενο όασης» πρέπει να λαμβάνεται πολύ σοβαρά υπόψη κατά τη μελέτη του ισοζυγίου καλλιεργούμενων εδαφών.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΥ ΛΥΣΙΜΕΤΡΩΝ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Τα δεδομένα για την μελέτη της κίνησης του νερού συγκεντρώθηκαν σε πειραματικό αγρό με δύο λυσίμετρα ελεύθερης στράγγισης (λυσίμετρα 1 και 2), στο Ινστιτούτο Εγγείων Βελτιώσεων του Εθνικού Ιδρύματος Αγροτικής Έρευνας στην

περιοχή της Σίνδου Θεσσαλονίκης, κατά την καλλιεργητική περίοδο του 2007. Τα λυσίμετρα αυτά έχουν διαταραγμένο εδαφικό προφίλ και εσωτερική διάμετρο 4 m². Τα τοιχώματα των λυσιμέτρων είναι κατασκευασμένα από σκυρόδεμα και έχουν πάχος 20 cm. Το βάθος του εδάφους μέσα στα λυσίμετρα φτάνει το 1 m και μετά από αυτό υπάρχει χονδρόκοκκο υλικό (άμμος και χαλίκια) για να διευκολύνεται η στράγγιση.

Η καλλιέργεια που επιλέχθηκε είναι αυτή του βαμβακιού, ενώ οι πρακτικές που ακολουθήθηκαν είναι οι συνήθειες που ακολουθούνται στην πεδιάδα της Θεσσαλονίκης. Η σπορά πραγματοποιήθηκε στις 11/5/2007 και η ποικιλία που επιλέχθηκε ήταν η Fibermax Celia μια μεσοπρώιμη ποικιλία που συναντάται αρκετά στον ελληνικό χώρο. Σε κάθε λυσίμετρο σπάρθηκαν εσωτερικά αυτού τρεις γραμμές, μία κεντρική γραμμή στο μέσο του και εκατέρωθέν της σε απόσταση 70 εκατοστών άλλες δύο, ενώ εξωτερικά σπάρθηκε μία ακόμη γραμμή σε απόσταση 25 εκατοστών από αυτό. Η βασική λίπανση έγινε στις 18/5/2007. Η πυκνότητα των φυτών ήταν 12-14 φυτά/m φύτευσης. Τέλος, η συγκομιδή της καλλιέργειας έγινε στις 25/9/2007.

Η άρδευση στο πειραματικό γινόταν με τη μέθοδο της στάγδην άρδευσης, με ποσοστό ύγρανσης της επιφάνειας του εδάφους στο 100% (πλήρης διαβροχή). Σε κάθε γραμμή καλλιέργειας αντιστοιχούσαν δύο σταλακτηφόροι σωλήνες με απόσταση 20 cm εκατέρωθέν της. Κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου έλαβαν χώρα 8 συνολικά αρδεύσεις, με συνολικό ύψος άρδευσης 496.7 mm.

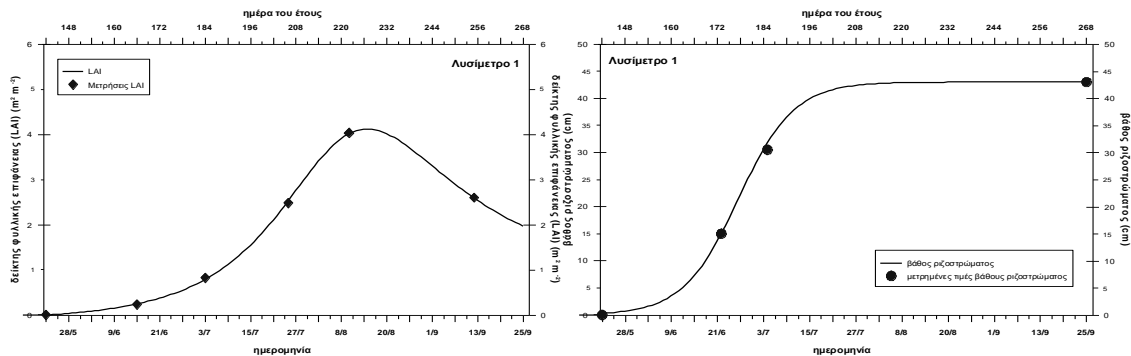
Τα μετεωρολογικά δεδομένα (θερμοκρασία T, σχετική υγρασία RH, ταχύτητα ανέμου u₂, προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία R_s και ύψος βροχόπτωσης R) μετρήθηκαν από μετεωρολογικό σταθμό που ήταν εγκατεστημένος πλησίον του πειραματικού, σε ωριαίο χρονικό βήμα. Στον Πίνακα 1 δίνονται οι μέσες μηνιαίες τιμές των μετεωρολογικών παραμέτρων.

Πίνακας 1. Μέσες μηνιαίες τιμές μετεωρολογικών παραμέτρων κατά τη διάρκεια του πειραματικού (2007)

Μήνας	T (°C)	u ₂ (m/s)	R _s (kW/m ²)	RH (%)	R (mm)
Μάιος	21.43	1.07	0.25	67.33	90.0
Ιούνιος	25.65	0.729	0.291	63.04	115.6
Ιούλιος	27.41	0.858	0.302	58.14	0.0
Αύγουστος	26.30	0.595	0.249	68.84	66.2
Σεπτέμβριος	20.83	1.094	0.193	66.65	24.0

Τέλος, στο κέντρο κάθε λυσιμέτρου εγκαταστάθηκαν σωλήνες PVC για την μέτρηση της εδαφικής υγρασίας από τους αισθητήρες τεχνολογίας FDR (frequency-domain reflectometry), Diviner 2000 και EnviroScan της εταιρείας Sentek. Συγκριμένα στο λυσίμετρο 1 χρησιμοποιήθηκε το Diviner 2000, για τη μέτρηση της εδαφικής υγρασίας σε ημερήσιο χρονικό βήμα, ενώ στο λυσίμετρο 2, το EnviroScan για τη μέτρηση της εδαφικής υγρασίας σε ωριαίο χρονικό βήμα. Τα όργανα επιλέχθηκε να βαθμονομηθούν με τη λήψη δειγμάτων εδάφους σε διάφορες υγρασιακές καταστάσεις (ξηρή, μέση, υγρή) και προσδιορισμό της υγρασίας με τη βαρυμετρική μέθοδο. Η βαθμονόμηση βελτίωσε κατά πολύ τις μετρήσεις όπως αυτές παίρνονταν από τα όργανα. Περισσότερες πληροφορίες για τους παραπάνω αισθητήρες καθώς και για τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης παρουσιάζονται στις εργασίες των Παρασκευάς κ.άλ. (2011) και Paraskevas et al. (2012). Η καταγραφή της αύξησης του μήκους του ριζοστρώματος γινόταν μετά από προσεκτική εξαγωγή της ρίζας με εκσκαφή. Ακολουθούσε ξέπλυμά της με νερό και μέτρηση του μήκους της. Ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας (LAI) υπολογίστηκε με τη συσκευή SunScan Canopy Analysis System. Οι

μετρήσεις του LAI γίνονται κάθε φορά επί της κεντρικής γραμμής του λυσιμέτρου και σε 4 διαφορετικές θέσεις αυτού. Οι μέσοι όροι των τιμών αυτών αποτέλεσαν τις τελικές τιμές των μετρήσεων. Στο Σχήμα 1 φαίνεται η ημερήσια διακύμανση του LAI και του βάθους του ριζοστρώματος προσαρμόζοντας τις μετρήσεις σε δύο εξισώσεις.



Σχήμα 1. Ημερήσια διακύμανση του δείκτη φυλλικής επιφάνειας LAI και του βάθους του ριζοστρώματος

Στο λυσίμετρο 1 έγινε δειγματοληψία μέχρι το βάθος των 90 cm για τον προσδιορισμό των εδαφικών στρώσεων και της μηχανικής σύστασης. Για τον υπολογισμό του φαινόμενου ειδικού βάρους και τον προσδιορισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης εδαφικής υγρασίας, λήφθηκαν αδιατάρακτα δείγματα εδάφους από το μέσο κάθε εδαφικής στρώσης. Τα αποτελέσματα των εδαφολογικών αναλύσεων δίνονται στον Πίνακα 2. Επίσης, τα αποτελέσματα της προσαρμογής των ζευγών τιμών υγρασίας-πίεσης στην εξίσωση Van Genuchten (1980), για τον προσδιορισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης εδαφικής υγρασίας, δίνονται στον Πίνακα 3. Οι τιμές της υγρασίας κορεσμού θ_s αφορούν μετρημένες τιμές, ενώ οι τιμές της υπολειμματικής υγρασίας θ_r και των σταθερών α , n και m είναι υπολογισμένες με τη βοήθεια παλινδρόμησης.

Πίνακας 2. Μηχανική ανάλυση και φαινόμενο ειδικό βάρος ρ_b λυσιμέτρου 1

Βάθος (cm)	Άμμος (%)	Ίλος (%)	Άργιλος (%)	ρ_b (gr/cm ³)	Χαρακτηρισμός
0-30	31.2	40.8	28	1.043	Clay Loam
30-60	35.6	38.4	26	1.220	Loam
60-90	43.2	32.4	24.4	1.228	Loam

Πίνακας 3. Παράμετροι της εξίσωσης Van Genuchten στο λυσίμετρο 1

Βάθος (cm)	θ_s (cm ³ cm ⁻³)	θ_r (cm ³ cm ⁻³)	α (m ⁻¹)	n	m (=1-1/n)
0-30	0.570	0.0	28.1110	1.2033	0.1689
30-60	0.508	0.0	7.5918	1.2225	0.1820
60-90	0.517	0.0	12.3349	1.2084	0.1725

2.2. ΜΟΝΤΕΛΟ SWBACROS

Η περιγραφή της μονοδιάστατης κίνησης του νερού στην ακόρεστη ζώνη του εδάφους γίνεται με την εξίσωση του Richards:

$$C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \left(\frac{\partial h}{\partial z} - 1 \right) \right] - S(h) \quad (2.1)$$

όπου: $C(h)$ ($=\partial\theta/\partial h$) η υδραυλική χωρητικότητα του εδάφους ($1/L$), h το ύψος πίεσης του εδαφικού νερού (L), $K(\theta)$ η ακόρεστη υδραυλική αγωγιμότητα (L/T), θ η εδαφική υγρασία κατ' όγκο (L^3/L^3), z η κατακόρυφη συντεταγμένη (με θετική φορά προς τα κάτω) (L), t ο χρόνος (T) και S η προσλαμβανόμενη ποσότητα νερού από το ριζικό σύστημα του φυτού ($1/T$).

Το μοντέλο SWBACROS βασίζεται στην αριθμητική επίλυση της Εξίσωσης (2.1) με τη μέθοδο Douglas-Jones (Douglas and Jones, 1963, Babajimopoulos, 1991, 2000) και παράλληλα συμπεριλαμβάνει και την πρόσληψη του εδαφικού νερού από τις ρίζες των φυτών. Η πρόσληψη του νερού από το ριζικό σύστημα $S(h)$, υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (Belmans et al., 1983):

$$S(h) = \alpha(h) S_{\max} \quad (2.2)$$

όπου: $\alpha(h)$ ένας περιοριστικός παράγοντας, ο οποίος είναι μία αδιάστατη συνάρτηση του ύψους πίεσης, S_{\max} η μέγιστη δυνατή πρόσληψη νερού από το ριζικό σύστημα.

Ο υπολογισμός του S_{\max} γίνεται με τη σχέση των Feddes et al. (1978):

$$S_{\max} = T_p / L \quad (2.3)$$

όπου: T_p η δυναμική διαπνοή και L το βάθος του ριζικού συστήματος.

Ο υπολογισμός της δυναμικής διαπνοής απαιτεί τον υπολογισμό της δυναμικής εξατμισοδιαπνοής, ο οποίος στο μοντέλο γίνεται με τη μέθοδο FAO Penman-Monteith (Allen et al., 1998), ενώ η δυναμική εξατμηση από την επιφάνεια του εδάφους γίνεται με τη βοήθεια των σχέσεων των Al-Kfafaf et al. (1978).

Τέλος, η χαρακτηριστική καμπύλη και η υδραυλική αγωγιμότητα περιγράφονται στο μοντέλο SWBACROS με τις εξισώσεις του Van Genuchten (1978, 1980).

Αναλυτική περιγραφή του μοντέλου SWBACROS δίνεται στην εργασία των Babajimopoulos et al. (1995), ενώ εφαρμογές του μοντέλου για διάφορες καλλιέργειες βρίσκονται στις εργασίες των Μπίλας (1995), Μπαμπατζιμόπουλος κ.άλ. (1995), Γούκος (1999), Μπαμπατζιμόπουλος και Πανώρας (2000) και Γεωργούσης (2007).

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

3.1 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΦΥΤΙΚΩΝ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΟΥ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ

Με τη βοήθεια των βαθμονομημένων αισθητήρων (Diviner 2000 και Enviroscan), γινόταν η παρακολούθηση της διακύμανσης της εδαφικής υγρασίας σε όλο το εδαφικό προφίλ και των δύο λυσιμέτρων. Η απόκριση του αισθητήρα ήταν πολύ καλή στις εισροές νερού (μέσω της βροχόπτωσης και της άρδευσης) (Paraskevas et al., 2012). Παρόλα αυτά υπήρχε ασυμφωνία ανάμεσα στις μετρήσεις εδαφικής υγρασίας και στην εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας, όπως αυτή υπολογιζόταν με τη βοήθεια της δυναμικής εξατμισοδιαπνοής (μέθοδος FAO Penman - Monteith) με τη χρήση βιβλιογραφικών φυτικών συντελεστών (Allen et al., 1998, Παπαζαφειρίου, 1999). Στον Πίνακα 4 δίνονται οι συνολικές ανάγκες σε νερό της καλλιέργειας του βαμβακιού, όπως

υπολογίστηκαν με τη μέθοδο FAO Penman - Monteith και τη χρήση των αντίστοιχων φυτικών συντελεστών.

Στον Πίνακα 5 παρουσιάζεται το υδατικό ισοζύγιο της βλαστικής περιόδου, το οποίο όπως φαίνεται στην δεύτερη γραμμή είναι ελλειμματικό ($\Delta\theta < 0$) παίρνοντας την διαφορά των υγρασιακών καταστάσεων στην αρχή του πειραματικού (16/05/07) και στο τέλος αυτού (25/09/07). Αυτό σημαίνει ότι οι βροχοπτώσεις και οι αρδεύσεις δεν επαρκούσαν για την κάλυψη των αναγκών της καλλιέργειας με αποτέλεσμα να χρησιμοποιηθεί μέρος του αποθηκευμένου νερού του εδάφους (για το λυσίμετρο 1 ίσο με 39.03 mm και για το λυσίμετρο 2 ίσο με 72.94 mm), αφού δεν απομακρύνθηκε νερό από το λυσίμετρο με βαθιά διήθηση. Οι ανάγκες της καλλιέργειας φαίνονται στην τελευταία γραμμή του Πίνακα 5, όπου υπολογίζεται το συνολικό ισοζύγιο νερού της καλλιεργητικής περιόδου σύμφωνα με τις συνολικές εισροές νερού και τη μεταβολή του αποθηκευμένου νερού στα λυσίμετρα.

Πίνακας 4. Συνολικές ανάγκες σε νερό της καλλιέργειας του βαμβακιού (mm) από τις 16/5 - 25/9 με τη χρήση βιβλιογραφικών φυτικών συντελεστών

Συνολικές ανάγκες σε νερό καλλιέργειας ($ET_c = \sum ET_r \cdot k_c$) (mm)	
Παπαζαφειρίου (1999)	497.9
Allen et al. (1998)	537.3

Πίνακας 5. Συνολικό ισοζύγιο νερού (mm) στα δύο λυσίμετρα κατά τη διάρκεια του πειραματικού

Ύψη νερού (mm)	Λυσίμετρο 1	Λυσίμετρο 2
$\Delta\theta = \Sigma\theta_{(0-90)(26/9)} - \Sigma\theta_{(0-90)(16/5)}$	-39.03	-72.94
Ωφέλιμη Βροχή (R)	200.82	200.82
Άρδευση (IR)	496.7	496.7
Στράγγιση (DP)	0.0	0.0
$ET_c = R + IR - \Delta\theta - DP$	736.55	770.46

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω, οι πραγματικές ανάγκες σε νερό της καλλιέργειας (ET_c) (Πίνακας 5), όπως υπολογίστηκαν με βάση τις μετρήσεις εισροών και εκροών ήταν κατά πολύ μεγαλύτερες από αυτές που υπολογίστηκαν με τη μέθοδο FAO Penman - Monteith και τη χρήση βιβλιογραφικών φυτικών συντελεστών (Πίνακας 4). Τα παραπάνω οδήγησαν στην αναζήτηση φυτικών συντελεστών, οι οποίοι θα αντικατόπτριζαν τις αυξημένες ημερήσιες ανάγκες σε νερό της καλλιέργειας του βαμβακιού στο πειραματικό των λυσιμέτρων. Η εκτίμηση των φυτικών συντελεστών για το λυσίμετρο 2 έγινε με τη μέθοδο του υδατικού ισοζυγίου. Ο υπολογισμός του ημερήσιου φυτικού συντελεστή έγινε με τη βοήθεια της σχέσης:

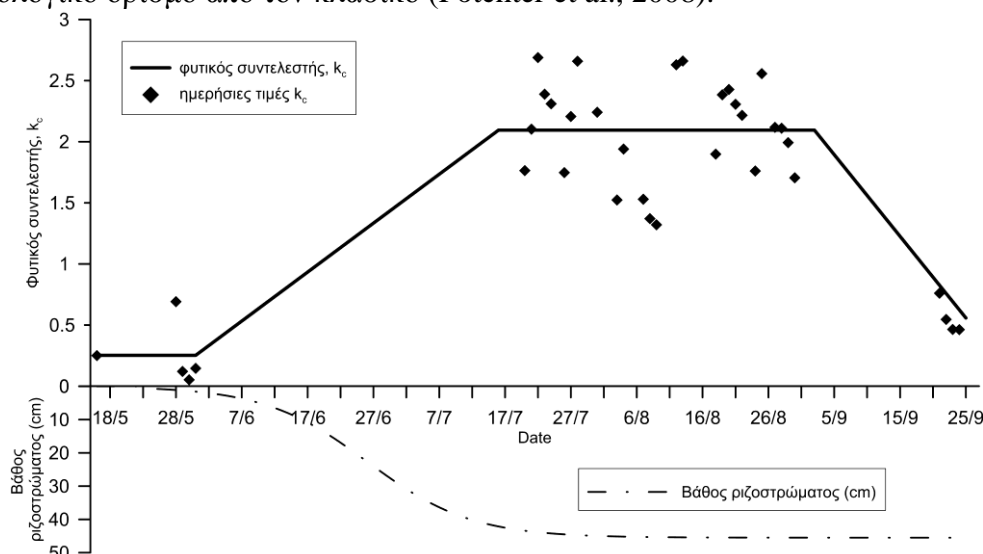
$$k_{c(t)} = \frac{Rain_{(t)} + Irrigation_{(t)} - \Delta S_{(t)}}{ET_{r(t)}} \quad (3.1)$$

όπου: $k_{c(t)}$ προσαρμοσμένος φυτικός συντελεστής ημέρας t , $Rain_{(t)}$ και $Irrigation_{(t)}$ βροχή και άρδευση την ημέρα t αντίστοιχα (mm), $\Delta S_{(t)}$ μεταβολή της αποθηκευμένης υγρασίας σε όλο το λυσίμετρο (mm) την ημέρα t , $ET_{r(t)}$ εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας αναφοράς την ημέρα t (mm/day) όπως αυτή υπολογίζεται με τη μέθοδο Penman - Monteith (Allen et al., 1998).

Οι ημερήσιες τιμές που προέκυψαν φαίνονται στο Σχήμα 2. Από τις τιμές αυτές

εξαιρέθηκαν αυτές που αναφέρονταν σε ημέρα με βροχόπτωση ή άρδευση. Στον Πίνακα 6 δίνονται οι μέσες τιμές των φυτικών συντελεστών που εκτιμήθηκαν με τη μέθοδο του υδατικού ισοζυγίου καθώς και οι αντίστοιχες βιβλιογραφικές τιμές.

Από τον Πίνακα 6 φαίνεται ότι οι τιμές των ισοζυγιακά εκτιμημένων φυτικών συντελεστών είναι ιδιαίτερα αυξημένες στο στάδιο της μέσης περιόδου. Η διαφορά είναι της τάξης των 75% περίπου, το οποίο οφείλεται στον φαινόμενο όασης (oasis effect) λόγω της ύπαρξης πολύ μικρού σε επιφάνεια και ακτίνα περιβάλλοντα χώρου. Οι τιμές των βιβλιογραφικών φυτικών συντελεστών έχουν προκύψει από πειραματισμούς σε μεγάλης έκτασης καλλιέργειες με όμοια φυσιολογικά χαρακτηριστικά. Υπάρχουν περιπτώσεις, που οι συνθήκες αυτές δεν υπάρχουν πάντα, όπως σε απομονωμένους αγρούς, μικρούς κήπους και μικρά αστικά πάρκα. Στις συγκεκριμένες περιπτώσεις παρατηρείται διαφορά στο ενεργειακό ισοζύγιο (μεταξύ του περιβάλλοντα χώρου και της καλλιεργούμενης έκτασης) προκαλώντας έτσι συνθήκες αυξημένης εξατμισοδιαπνοής. Συγκεκριμένα ο Oke (1987) παρατήρησε ότι, σε ένα αγρό βαμβακιού που παρουσιάζει το φαινόμενο όασης, η ενέργεια που απαιτείται για εξάτμιση μπορεί να φτάσει μέχρι 2.5 φορές παραπάνω από αυτή που δίνεται μέσω της ακτινοβολίας. Οι Spronken-Smith et al. (2000) παρατήρησαν σε αντίστοιχες συνθήκες, αυξημένες κατά 130% των αναμενόμενων τιμών εξάτμισης. Επίσης, οι Eigenmann et al. (2011) αναφέρουν αυξημένες τιμές εξατμισοδιαπνοής σε αγρούς καλαμποκιού στη Γερμανία λόγω του φαινομένου όασης. Το φαινόμενο όασης έχει παρατηρηθεί σε διάφορες κλιματολογικές συνθήκες καθώς και σε αγροτικά και αστικά περιβάλλοντα (Oke, 1987, Taha et al., 1991, Spronken-Smith et al., 2000, Jonsson, 2004, Potchter et al., 2008). Για τον λόγο αυτό ο όρος «φαινόμενο όασης» έχει ένα ευρύτερο εννοιολογικό ορισμό από τον κλασικό (Potchter et al., 2008).



Σχήμα 2. Εκτίμηση φυτικών συντελεστών για το λυσίμετρο 2 με τη μέθοδο του υδατικού ισοζυγίου

Πίνακας 6. Τιμές βιβλιογραφικών και ισοζυγιακά εκτιμημένων φυτικών συντελεστών καλλιέργειας βαμβακιού

	$k_{c(iini)}$	$k_{c(mid)}$	$k_{c(end)}$
Παπαζαφειρίου (1999)	0.45	1.05	0.60
Allen et al. (1998)	0.35	1.20	0.55
k_c λυσιμέτρου 2	0.35	2.10	0.50

Οι τιμές των φυτικών συντελεστών που υπολογίστηκαν στο λυσίμετρο 2, χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη της κίνησης του νερού στο έδαφος με το μοντέλο SWBACROS στο λυσίμετρο 1, όπως θα δοθεί στη συνέχεια.

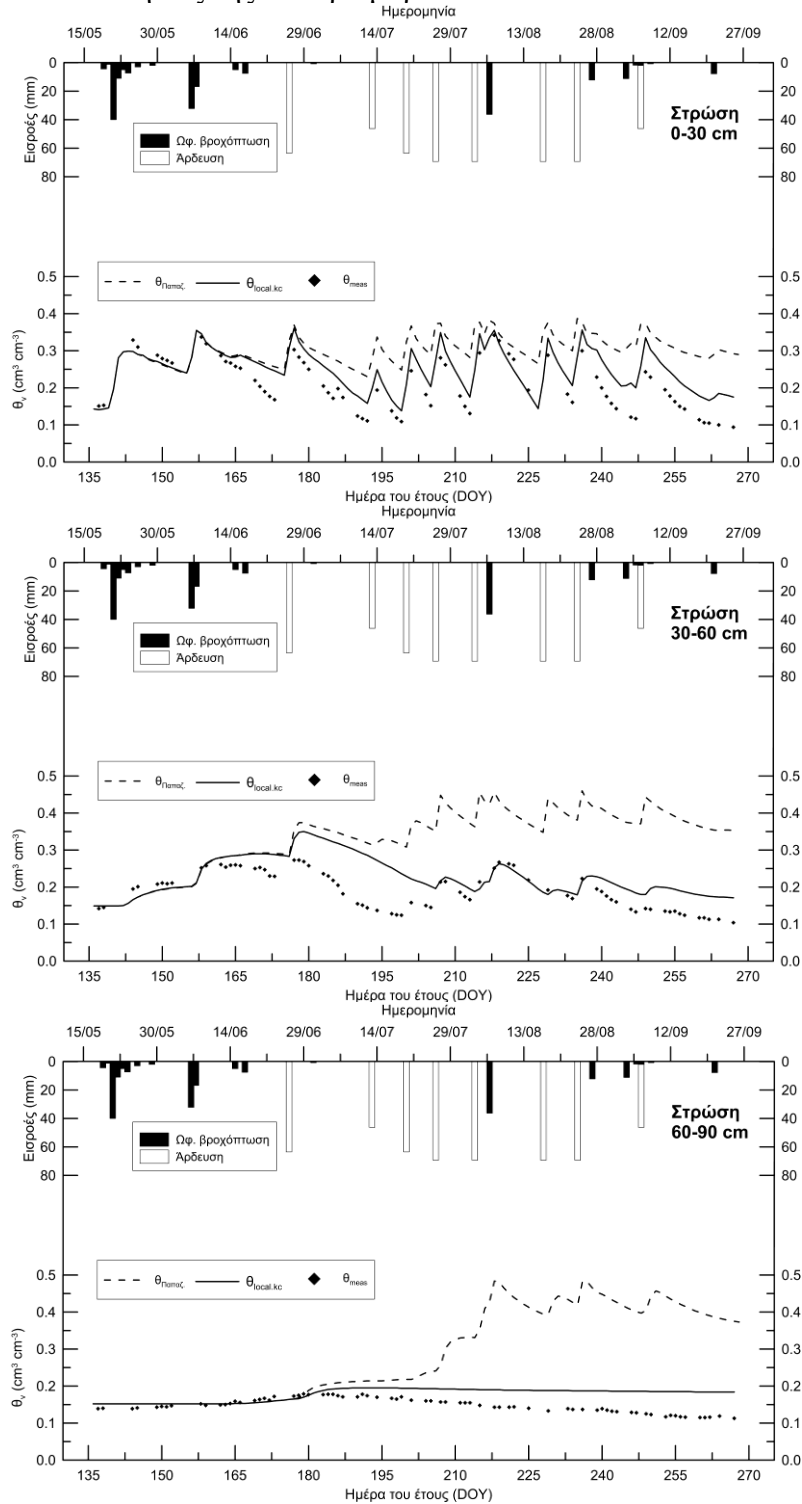
3.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΕΔΑΦΙΚΟΥ ΝΕΡΟΥ

Η προσομοίωση της δυναμικής του εδαφικού νερού με το μοντέλο SWBACROS έλαβε χώρα για τη χρονική περίοδο μεταξύ 16/5/07 έως 25/9/07 για το λυσίμετρο 1. Η επίλυση της εξίσωσης Richards (Εξίσωση (2.1)) στην εδαφική κατατομή, έγινε σε 16 κόμβους, πάχους 5 cm ο καθένας και μέχρι βάθους 80 cm. Το εδαφικό προφίλ χωρίστηκε σε τρεις στρώσεις ανάλογα με την κοκκομετρική σύσταση του καθενός. Ως κάτω οριακή συνθήκη επιλέχθηκε αυτή της ελεύθερης στράγγισης και ως αρχική συνθήκη πάρθηκε η μέτρηση στις 16/05/07. Τέλος, οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας στον κορεσμό υπολογίστηκαν μέσω της επιλογής που δίνει το μοντέλο για ρύθμιση με τη μέθοδο Rosenbrock (Kuester and Mize, 1973). Η ρύθμιση της κορεσμένης υδραυλικής αγωγιμότητας έγινε από την αρχή του πειραματικού 16/5 μέχρι και την ημέρα που ολοκληρώθηκε η φύτευση στα λυσίμετρα στις 24/5, μέρες στις οποίες η εξάτμιση από το έδαφος ήταν ο μοναδικός καταναλωτής νερού από το έδαφος.

Στη συνέχεια έγινε εφαρμογή του μοντέλου για δύο περιπτώσεις: Στην 1^η περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν οι φυτικοί συντελεστές όπως αυτοί υπολογίστηκαν με τη μέθοδο του υδατικού ισοζυγίου στην Παράγραφο 3.1 και στη 2^η περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν οι φυτικοί συντελεστές του Παπαζαφειρίου (1999). Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι έγινε και εφαρμογή του μοντέλου, με τη χρήση των φυτικών συντελεστών όπως αυτοί δίνονται από τους Allen et al. (1998) αλλά οι προσομοιώσεις δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερες διαφορές με αυτές με τη χρήση των φυτικών συντελεστών του Παπαζαφειρίου. Έτσι παρουσιάζονται οι προσομοιώσεις μόνο με τη χρήση των φυτικών συντελεστών του Παπαζαφειρίου (1999) για τον επιπλέον λόγο ότι αυτοί αναφέρονται στις Ελληνικές συνθήκες. Στο Σχήμα 3 φαίνονται οι μετρημένες και οι υπολογισμένες από το μοντέλο και για τις δύο περιπτώσεις τιμές υγρασίας και στις τρεις στρώσεις του λυσιμέτρου 1.

Επίσης, στον Πίνακα 7 δίνονται τα αντίστοιχα στατιστικά κριτήρια RMSE, ME και CRM (Loague and Green, 1991), για τις τρεις στρώσεις και στις δύο περιπτώσεις. Για την πρώτη στρώση (0-30 cm) η εκτέλεση με φυτικούς συντελεστές του Παπαζαφειρίου (1999) επιστρέφει RMSE ίσο με 63.99%, για την δεύτερη στρώση (30-60 cm) αυξάνεται και γίνεται ίσο με 97.66% και για την τρίτη στρώση οι τιμές του γίνονται αντίστοιχα 132.82%. Επίσης, το μέσο σφάλμα (ME) είναι 0.104 για την πρώτη στρώση, 0.152 και 0.141 για τη δεύτερη και τρίτη στρώση, αντίστοιχα. Τέλος, το CRM είναι -0.516, -0.815 και -0.952 για τις τρεις στρώσεις, αντίστοιχα. Είναι φανερό ότι η εκτέλεση με τη χρήση των βιβλιογραφικών φυτικών συντελεστών υπερεκτιμά κατά πολύ το υδατικό ισοζύγιο και στις τρεις στρώσεις, μέσω του οποίου δεν αντικατοπτρίζονται οι αυξημένες σε νερό ανάγκες της καλλιέργειας. Οι ανάγκες αυτές φαίνεται να ικανοποιούνται κατά πολύ περισσότερο με τη χρήση ισοζυγιακά εκτιμημένων φυτικών συντελεστών. Το RMSE μειώνεται στην τιμή του 25.34% για την πρώτη στρώση, για την δεύτερη στρώση στην τιμή του 33.29% και τέλος για την τελευταία στρώση στην τιμή του 26.75%. Ανάλογη βελτίωση παρουσιάζουν και τα άλλα στατιστικά κριτήρια. Βέβαια στην περίπτωση αυτή εξακολουθεί το υδατικό ισοζύγιο της βλαστικής περιόδου - σε μικρότερο βαθμό σε σχέση με την προηγούμενη - να υπερεκτιμά την περιεχόμενη εδαφική υγρασία.

Γενικά, στην εφαρμογή και των δύο περιπτώσεων φυτικών συντελεστών φαίνεται ότι υπερεκτιμάται η υγρασία του εδάφους ιδιαίτερα μετά την 162 ημέρα (DOY) (πρώτες ημέρες σταδίου ταχείας ανάπτυξης φυτού), το οποίο φαίνεται και από τις αρνητικές τιμές του CRM και τις θετικές του ΜΕ. Η υπερεκτίμηση αυτή μεγαλώνει και άλλο, ιδιαίτερα μετά τα μέσα Ιουλίου, όταν η καλλιέργεια φτάνει στο στάδιο μέσης ανάπτυξης και οι απαιτήσεις της σε νερό μεγιστοποιούνται.



Σχήμα 3. Σύγκριση υπολογισμένων από το μοντέλο υγρασιών θ_{comp} των τριών στρώσεων του λυσιμέτρου 1 με τις μετρημένες τιμές θ_{meas} , με φυτικούς συντελεστές ισοζυγιακά υπολογισμένους και με φυτικούς συντελεστές του Παπαζαφειρίου (1999).

Πίνακας 7. Στατιστικά κριτήρια εκτέλεσης του μοντέλου με τους φυτικούς συντελεστές Παπαζαφειρίου (1999) και τους ισοζυγιακά υπολογισμένους

	κ_c Παπαζαφειρίου			κ_c ισοζυγιακά υπολογισμένους		
	0-30	30-60	60-90	0-30	30-60	60-90
Στρώση (cm)						
RMSE (%)	63.99	97.66	132.82	25.34	33.29	26.75
ME (cm ³ cm ⁻³)	0.104	0.152	0.141	0.041	0.040	0.026
CRM	-0.516	-0.815	-0.952	-0.199	-0.234	-0.202

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η χρήση λυσιμέτρων αποτελεί ένα πολύ καλό εργαλείο για τη διερεύνηση της δυναμικής του εδαφικού νερού σε καλλιεργούμενους αγρούς με τη χρήση μαθηματικών μοντέλων. Η ευκολία που δίνει για ακριβή υπολογισμό φάσεων του υδρολογικού κύκλου δίνει τη δυνατότητα στον επιστήμονα να επικεντρωθεί και να διερευνήσει άλλους παράγοντες του υδατικού ισοζυγίου. Παράλληλα ένας συνδυασμός λυσιμέτρων με αισθητήρες μέτρησης της υγρασίας μπορεί να αποτελέσει ένας πολύ καλό συνδυασμό δίνοντας τη δυνατότητα για ακριβέστερες και ποιοτικότερες μετρήσεις. Στην εργασία αυτή έγινε η μελέτη της κίνησης του νερού σε έδαφος καλλιεργούμενο με βαμβάκι με χρήση δύο λυσιμέτρων στα οποία γινόταν συνεχής καταγραφή της εδαφικής υγρασίας και των άλλων συνιστωσών του υδατικού ισοζυγίου. Μέσω των μετρήσεων υγρασίας και της μεθόδου του υδατικού ισοζυγίου στο λυσίμετρο 2, προέκυψαν φυτικοί συντελεστές για την καλλιέργεια του βαμβακιού έντονα επηρεασμένων από το φαινόμενο όασης. Οι φυτικοί συντελεστές που εξήχθησαν ελέγχθηκαν μέσω εφαρμογής τους στο μοντέλο SWBACROS. Οι εκτελέσεις έγιναν με χρήση βιβλιογραφικών φυτικών συντελεστών και των ισοζυγιακά υπολογισμένων για τον έλεγχο και την επιβεβαίωσή τους. Η υπεροχή των αποτελεσμάτων με χρήση των ισοζυγιακά υπολογισμένων φυτικών συντελεστών ήταν ξεκάθαρη. Το γεγονός αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το φαινόμενο όασης πρέπει να λαμβάνεται πολύ σοβαρά υπόψη στη μελέτη του υδατικού ισοζυγίου καλλιεργούμενων εδαφών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Abdou, H.M. and Flury, M., 2004. *Simulation of water flow and solute transport in free-drainage lysimeters and field soils with heterogeneous structures*. European Journal of Soil Science, 55: 229-241.
- Al-Khafaf, S., Wierenga, P.J. and Williams, B.C., 1978. *Evaporative flux from irrigated cotton as related to leaf area index, soil water and evaporative demand*. Agronomy Journal, 70: 912-917.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M., 1998. *Crop Evapotranspiration : Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper, No 56.
- Babajimopoulos, C., 1991. *A Douglas-Jones Predictor-Corrector Program in Simulating One-Dimensional unsaturated flow in soil*. Ground Water, 29, 2: 271-286.
- Babajimopoulos, C., 2000. *Revisiting the Douglas-Jones method for modelling unsaturated flow in a cultivated soil*. Environmental Modelling & Software, 15: 303-312.
- Babajimopoulos, C., Budina, A. and Kalfountzos, D., 1995. *SWBACROS : A model for estimation of the water balance of a cropped soil*. Environmental Software, 10, 3: 211-220.
- Belmans, C., Wesseling, J.G. and Feddes, R.A., 1983. *Simulation model of the water*

- balance of a cropped soil. SWATRE. Journal of Hydrology, 63: 271-286.*
- Bergström, L.F. and Jarvis, N.J., 1993. *Leaching of dichlorprop, bentazon, and 36Cl in undistributed field lysimeters of different agricultural soils. Weed Science, 41: 251-261.*
- Bergström, L.F., 1990. *Use of lysimeters to estimate leaching of pesticides in agricultural soils. Environmental Pollution, 67: 325-347.*
- Douglas, J.J. and Jones, B.F., 1963. *One Predictor-Corrector Method for Non Linear Parabolic Differential Equations. Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics, 11: 195-204.*
- Eigenmann, R., Kalthoff, N., Foken, T., Dorninger, M., Kohler, M., Legain, D., Pigeon, G., Pignatelli, B., Schüttemeyer, D. and Traulle, O., 2011. *Surface energy balance and turbulence network during the Convective and Orographically-induced Precipitation Study (COPS). Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 137: 57-69.*
- Feddes, R.A., Kowalic, P.J. and Zaradny, H., 1978. *Simulation of field water use and crop yield. Simulation Monographs, PUDOC, Wageningen, Netherlands.*
- Flury, M., Yates, M.V. and Jury, W.A., 1999. *Numerical analysis of the effect of the lower boundary condition on solute transport in lysimeters. Soil Science Society of America Journal, 63: 1493-1499.*
- Jonsson, P., 2004. *Vegetation as an urban climate control in the subtropical city of Gaborone, Botswana. International Journal of Climatology, 24: 1307-1322.*
- Kuester, J.L. and Mize, J.H., 1973. *Optimization techniques with FORTRAN. McGraw-Hill Book Company.*
- Kutílek, M. and Nielsen, D.R., 1994. *Soil Hydrology - GeoEcology Textbook. Catena Verlag, Cremlingen-Destedt, Germany.*
- Lanthaler, C., 2004. *Lysimeter Stations and Soil Hydrology Measuring Sites in Europe - Purpose, Equipment, Research Results, Future Developments. Diploma Thesis, School of Natural Sciences, Karl-Franzens-University Graz.*
- Loague, K., Green, R., 1991. *Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models : Overview and applications. Journal of Contaminant Hydrology, 7: 51-73.*
- Oke, T.R., 1987. *Boundary Layer Climates, second ed. Methuen, London.*
- Paraskevas, C., Georgiou, P., Ilias, A., Panoras, A. and Babajimopoulos, C., 2012. *Calibration Equations for two Capacitance Water Content Probes in a Lysimeter Field. International Agrophysics, (In Printing) 10.2478/v10247-012-0013-y*
- Potchter, O., Goldman, D., Kadish, D. and Iluz, D., 2008. *The oasis effect in an extremely hot and arid climate: The case of Southern Israel. Journal of Arid Environments, 72: 1721-1733.*
- Simunek, J., Huang, K. and Van Genuchten, M.Th., 1998. *The HYDRUS code for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. Version 6.0, Research Report No. 144, U.S. Salinity Laboratory, U.S. Department of Agriculture (USDA), ARS, Riverside, California.*
- Spronker-Smith, R.A., Oke, T.R. and Lowry, W.P., 2000. *Advection and the surface energy balance across an irrigated urban park. International Journal of Climatology, 20: 1033-1047.*
- Taha, H., Akbari, H. and Rossenfeld, A., 1991. *Heat island and oasis effects of vegetative canopies: micrometeorological field measurements. Theoretical and Applied Climatology, 44: 123-138.*
- Van Genuchten, M.Th., 1978. *Calculating the unsaturated hydraulic conductivity with a*

- new, closed-form analytical model*. Research Report 78-WR-08, Water Resources Program, Department of Civil Engineering, Princeton University, Princeton New Jersey.
- Van Genuchten, M.Th., 1980. *A closed-form equation for prediction hydraulic conductivity of unsaturated soils*. Soil Science Society of America Journal, 44: 892-898.
- Zhou, Q., Kang, S., Zhang, L. and Li, F., 2007. *Comparison of APRI and Hydrus-2D models to simulate soil water dynamics in a vineyard under alternate partial root zone drip irrigation*. Plant Soil, 291: 211-223.
- Αντωνόπουλος, Β.Ζ., 1998. *W.A.NI.SIM. Μονοδιάστατο μαθηματικό μοντέλο προσομοίωσης της δυναμικής του νερού και του αζώτου στο έδαφος*. Μονογραφία, Τμήμα Γεωπονίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Αντωνόπουλος, Β.Ζ., 1999. *Υδρολογία της ακόρεστης ζώνης του εδάφους*. Έκδοση Υπηρεσίας Δημοσιευμάτων, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Γεωργούσης, Χ., 2007. *Προγραμματισμός των αρδεύσεων με εφαρμογή μαθηματικών μοντέλων και συστημάτων γεωγραφικών πληροφοριών*. Διδακτορική διατριβή, Γεωπονική Σχολή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Γούκος, Δ., 1999. *Εφαρμογή του μοντέλου S.W.BA.CRO.S. στη μελέτη του υδατικού ισοζυγίου ενός αγρού ζαχαρότευτλων - Διερεύνηση των σχέσεων πρόσληψης νερού από τα φυτά*. Μεταπτυχιακή διατριβή, Τμήμα Γεωπονίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Μπαμπατζιμόπουλος, Χ. και Πανώρας, Α., 2000. *Εφαρμογή της πληροφορικής στη μελέτη υδατικού ισοζυγίου του εδάφους ενός αγρού ζαχαρότευτλων*. Τελική έκθεση Ερευνητικού Προγράμματος, Εργαστήριο Γενικής και Γεωργικής Υδραυλικής και Βελτιώσεων Γεωπονική Σχολή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Μπαμπατζιμόπουλος, Χ., Πανώρας, Α., Μαυρουδής, Ι., Μπίλας, Γ. και Παπαγιαννακόπουλος, Ν., 1995. *Προγραμματισμός των αρδεύσεων με χρήση μαθηματικών μοντέλων*. Υπουργείο Βιομηχανίας, Ενέργειας και Τεχνολογίας, Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας, Διεύθυνση Υποστήριξης Ερευνητικών Προγραμμάτων, 91ΕΔ457, Τελική έκθεση.
- Μπίλας, Γ., 1995. *Εφαρμογή του μοντέλου S.W.BA.CRO.S. στην πρόβλεψη της παραγωγής και στον προγραμματισμό της άρδευσης του βαμβακιού*. Μεταπτυχιακή διατριβή, Τμήμα Γεωπονίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Παπαζαφειρίου, Ζ.Γ., 1999. *Οι ανάγκες σε νερό των καλλιεργειών*. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
- Παρασκευάς, Χ., Γεωργίου, Π., Ηλίας, Α., Πανώρας, Α. και Μπαμπατζιμόπουλος, Χ., 2011. *Εξισώσεις βαθμονόμησης δύο αισθητήρων μέτρησης εδαφικής υγρασίας σε λυσίμετρα*. 7^ο Πανελλήνιο Συνέδριο της Εταιρείας Γεωργικών Μηχανικών Ελλάδας (Ε.Γ.Μ.Ε.), 24-27 Νοεμβρίου 2011, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών.

**ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΑΡΔΕΥΤΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ
ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΚΑΙ
ΤΗΣ ΑΠΛΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ.
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΑΡΔΕΥΤΙΚΟ ΕΡΓΟ ΛΑΜΑΡΗΣ ΠΡΕΒΕΖΑΣ
Μ. Ε. Θεοχάρης¹, Α. Δ. Σιάνου¹**

¹ΤΕΙ Ηπείρου, Τμήμα Φυτικής Παραγωγής, 471 00 Άρτα, Ελλάδα.
theochar@teiep.gr, natasa_sianou@yahoo.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία υπολογίζονται οι οικονομικές διάμετροι του αρδευτικού δικτύου χαμηλής ζώνης Λάμαρης Πρέβεζας, με τη γραμμική μέθοδο βελτιστοποίησης καθώς και με την απλοποιημένη μέθοδο του Μ. Θεοχάρη που αναπτύχθηκε στο Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης το 2004. Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι η απλοποιημένη μέθοδος δίνει αποτελέσματα ανάλογης ακρίβειας με αυτά της γραμμικής μεθόδου βελτιστοποίησης σε πολύ μικρότερο χρόνο υπολογισμού. Επομένως μπορεί να χρησιμοποιείται αντί της γραμμικής μεθόδου βελτιστοποίησης.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Άρδευση, βελτιστοποίηση, οικονομικές διάμετροι, γραμμική μέθοδος, απλοποιημένη μέθοδος.

**IRRIGATION NETWORKS OPTIMISATION
USING THE LINEAR PROGRAMMING METHOD AND
THE M. THEOXARIS' SIMPLIFIED METHOD.
APPLICATION IN IRRIGATION NETWORK OF LAMARI – PREVEZA**

M. E. Theocharis¹, A. D. Sianou¹

TEI of Epirus, Dep. of Crop Production 47100 Arta, Greece.
theochar@teiep.gr , natasa_sianou@yahoo.gr

ABSTRACT

In this paper an application and comparative evaluation of the optimal pipe diameters in the irrigation network of low zone of Lamari Preveza's area has been performed, using the linear programming optimization method and the M. Theocharis's simplified method, that was developed in the Aristotle University of Thessaloniki in 2004. The results of this comparison show that the simplified method gives results of similar accuracy to the ones of the classic linear optimization method and therefore can be applied with no distinction in the studying of the irrigation networks.

KEY WORDS: Irrigation, optimization, economic diameter, linear method, simplified method.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η βελτιστοποίηση των αρδευτικών δικτύων αποτελεί ένα σημαντικότατο εργαλείο κατά τη μελέτη των αρδευτικών έργων, καθώς με αυτή προσδιορίζεται ο βέλτιστος συνδυασμός διαμέτρων που οδηγεί στην ελαχιστοποίηση του κόστους των αρδευτικών δικτύων. Η γνώση της υπολογιστικής διαδικασίας για την ελαχιστοποίηση του κόστους αποτελεί επομένως καθοριστικό παράγοντα στο σχεδιασμό των αρδευτικών δικτύων και στη διαχείριση των υδατικών πόρων μιας περιοχής.

Οι κλασικές μέθοδοι βελτιστοποίησης δικτύων είναι η ασυνεχής μέθοδος γραμμικού προγραμματισμού, η συνεχής μέθοδος μη γραμμικού προγραμματισμού, η ασυνεχής μέθοδος δυναμικού προγραμματισμού, και η ασυνεχής μέθοδος του Labye. Το κοινό χαρακτηριστικό όλων των παραπάνω τεχνικών μεθόδων είναι ότι εισάγεται μια αντικειμενική συνάρτηση (objective function), η οποία περιλαμβάνει το ολικό κόστος των αγωγών του δικτύου, υποκειμένη σε περιορισμούς δομής (constraints) που ορίζουν το πλαίσιο μέσα στο οποίο πρέπει να βελτιστοποιηθεί.

Ο Μ. Θεοχάρης (2004) ανέπτυξε δύο μεθόδους, την απλοποιημένη μη γραμμική μέθοδο βελτιστοποίησης και την τροποποιημένη απλοποιημένη μη γραμμική μέθοδο βελτιστοποίησης.

Στην παρούσα μελέτη γίνεται συγκριτική αξιολόγηση της γραμμικής μεθόδου βελτιστοποίησης και της τροποποιημένης απλοποιημένης μεθόδου βελτιστοποίησης στο αρδευτικό δίκτυο χαμηλής ζώνης Λάμαρης Πρέβεζας.

2. ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1. Η ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Ο κάθε αγωγός του δικτύου διαιρείται σε τόσα τμήματα όσες είναι οι τεχνικώς αποδεκτές τυποποιημένες διάμετροι του εμπορίου και τα μήκη αυτών των τμημάτων είναι οι μεταβλητές απόφασης. Το ελάχιστο κόστος του δικτύου, προκύπτει από την ελαχιστοποιημένη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης όταν ισχύουν οι συγκεκριμένοι περιορισμοί μήκους, απωλειών φορτίου και μη αρνητικότητας.

Η αντικειμενική συνάρτηση εκφράζεται (Θεοχάρης, 2004, 2009) από τη σχέση:

$$f(\vec{X}) = \vec{C} \cdot \vec{X} \quad (2.1)$$

όπου το \vec{C} είναι το διάνυσμα του κόστους των σωλήνων σε €/m και \vec{X} είναι το διάνυσμα των μηκών των τμημάτων των σωλήνων σε m. Τα διανύσματα \vec{C} και \vec{X} υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$\vec{C} = (C_1 \dots C_i \dots C_n) \quad (2.2)$$

$$\vec{X} = (X_1 \dots X_i \dots X_n)^T \quad (2.3)$$

όπου:

$$C_i = (\delta_{i1} \dots \delta_{ij} \dots \delta_{ik}) \quad (2.4)$$

$$X_i = (x_{i1} \dots x_{ij} \dots x_{ik})^T \quad (2.5)$$

για $i = 1, 2, \dots, n$ και $j = 1, 2, \dots, k$.

Στις παραπάνω σχέσεις $x_{11}, x_{12}, \dots, x_{nk}$, είναι οι μεταβλητές απόφασης σε m (= τα τμήματα στα οποία διαιρείται ο αγωγός ij) και τα δ_{ij} είναι το κόστος του j -στού τμήματος του ιστού σωλήνα σε €/m, n είναι ο συνολικός αριθμός αγωγών του δικτύου και k είναι ο συνολικός αριθμός αποδεκτών διαμέτρων για τον κάθε αγωγό.

Οι περιορισμοί μήκους πρέπει να πληρούν τη σχέση:

$$L_i = \sum_{j=1}^k x_{ij}, \quad i = 1 \dots n \quad (2.6)$$

όπου L_i είναι το συνολικό μήκος του i -στού αγωγού.

Οι περιορισμοί απωλειών φορτίου εκφράζονται ως:

$$\sum_{i=1}^i \Delta h_i \leq H_A - h_i \quad (2.7)$$

για όλους του κόμβους i , όπου H_A είναι το πιεζομετρικό φορτίο κεφαλής του δικτύου, h_i είναι το ελάχιστο απαιτούμενο πιεζομετρικό φορτίο του κόμβου i και το άθροισμα των απωλειών φορτίου $\sum_{i=1}^i \Delta h_i$ νοείται κατά μήκος της κάθε διαδρομής κατανάλωσης i . Η σχέση (2.6) σημαίνει ότι η πιεζομετρική γραμμή βρίσκεται υπεράνω του απαιτούμενου πιεζομετρικού φορτίου στον κόμβο i .

Οι περιορισμοί μη αρνητικότητας εκφράζονται με τη μορφή:

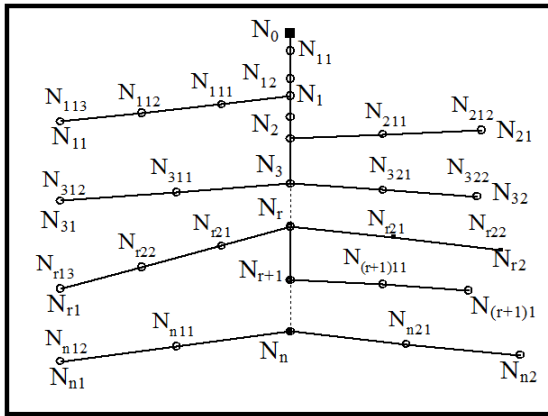
$$x_{ij} \geq 0 \quad (2.8)$$

Η βελτιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης, επιτυγχάνεται με τη μέθοδο Simplex και είναι αναγκαία η χρήση H/Y.

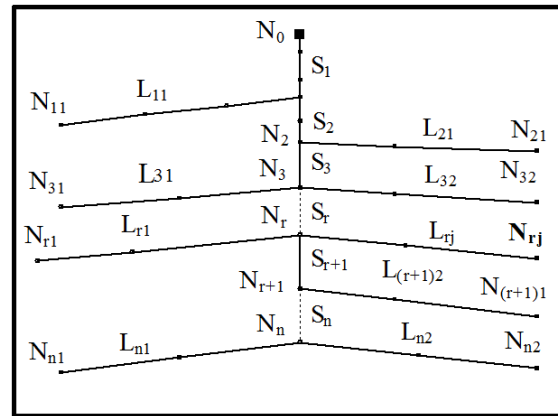
2.2 Η ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΑΠΛΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΟΥ Μ. ΘΕΟΧΑΡΗ

Για την επεξεργασία του προβλήματος μορφώνεται το ιδεατό δίκτυο το οποίο αποτελείται μόνο από κλάδους και προκύπτει από το πραγματικό δίκτυο αφού παραληφθούν οι απλοί κόμβοι και διατηρηθούν μόνο οι κόμβοι διακλαδώσεων όπως φαίνεται στα σχήματα 1 και 2 (Θεοχάρης, 2004, Theocharis, et al., 2006, 2009). Κάθε κόμβος διακλάδωσης συμβολίζεται με N_i όπου $i = 1, 2, \dots, r, \dots, n$ και n είναι ο συνολικός αριθμός των κόμβων διακλάδωσης του δικτύου. Κάθε πέρασ συμβολίζεται με N_{rj} όπου $r = 1, 2, \dots, n$ είναι ο κόμβος διακλάδωσης από τον οποίο τροφοδοτείται ο κλάδος και $j = 1, 2, \dots, k$ είναι ο αριθμός των τροφοδοτούμενων κλάδων που ξεκινούν από τον κόμβο διακλάδωσης, r . Κάθε τροφοδοτών κλάδος συμβολίζεται με S_i και κάθε τροφοδοτούμενος κλάδος συμβολίζεται με L_{rj} . Κάθε αγωγός του κλάδου S_i συμβολίζεται με s_{it} και κάθε αγωγός του κλάδου L_{rj} συμβολίζεται με l_{rjq} όπου $t = 1, 2, \dots, v$ αντίστοιχα ο συνολικός αριθμός των αγωγών των κλάδων S_i και L_{rj} .

Το ελάχιστο κόστος του δικτύου, προκύπτει, σύμφωνα με την κλασσική συνεχή μη γραμμική μέθοδο βελτιστοποίησης, από την ελαχιστοποιημένη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης όταν ισχύουν οι συγκεκριμένοι περιορισμοί μήκους, απωλειών φορτίου και μη αρνητικότητας.



Σχήμα 1: Πραγματικό ακτινωτό δίκτυο.



Σχήμα 2: Ιδεατό ακτινωτό δίκτυο.

Η αντικειμενική συνάρτηση εκφράζεται από τη σχέση (Theocharis, et al., 2006, 2009):

$$Z = \sum_{i=1}^n \left[\frac{\Phi_{S_i}^\omega}{\Delta H_{S_i}^{\omega-1}} \right] + \sum_{r=1}^n \sum_{j=1}^k \left[\frac{\Phi_{L_{rj}}^\omega}{\Delta H_{L_{rj}}^{\omega-1}} \right] \tag{2.9}$$

Οι περιορισμοί δομής του προβλήματος εκφράζονται για όλα τα r και j από τη σχέση:

$$\sum_{i=1}^r \Delta H_{S_i} + \Delta H_{L_{rj}} = h_{N_0} - h_{N_{rj}} \tag{2.10}$$

όπου ΔH_{S_i} και $\Delta H_{L_{rj}}$ είναι οι απώλειες στους κλάδους S_i και L_{rj} , h_{N_0} και $h_{N_{rj}}$ είναι αντιστοίχως το φορτίο στην κεφαλή και στο πέρας r_j του δικτύου.

Οι περιορισμοί μη αρνητικότητας εκφράζονται από τις σχέσεις: $\Delta H_{S_i} > 0$ και $\Delta H_{L_{rj}} > 0$.

Η βελτιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης, η οποία επιτυγχάνεται με τη μέθοδο των πολλαπλασιαστών του Lagrange (Νουτσόπουλος, 1969, Τζιμόπουλος, 1982, Θεοχάρης, 2004, Theocharis, et al., 2006), ανάγεται στην επίλυση του μη γραμμικού συστήματος n+k εξισώσεων:

$$\left[\frac{\Phi_{S_i}^\omega}{\Delta H_{S_i}} \right]^\omega = \sum_{r=1}^n \sum_{j=1}^k \left[\frac{\Phi_{L_{rj}}^\omega}{\Delta H_{L_{rj}}} \right]^\omega \tag{2.11}$$

και

$$\Delta H_{L_{rj}} = (h_{N_0} - h_{L_{rj}}) - \sum_{i=1}^r \Delta H_{S_i} \tag{2.12}$$

Στις σχέσεις αυτές είναι:

$$\Phi_i = \sum_{t=1}^v \Phi_{i=1} = \sum_{t=1}^v \left[\frac{A}{1,6465^v} f^{\frac{v\omega}{v+5}} L_{it} Q_{it}^{0,4v} \right]^{\frac{1}{\omega}} \tag{2.13}$$

$$\Phi_{\pi_{ij}} = \sum_{b=1}^{\tau} \Phi_{\tau_{jb}} = \sum_{q=1}^{\tau} \left[\frac{A}{1,6465^v} f^{\frac{v\omega}{v+5}} L_{\tau_{jb}} Q_{\tau_{jb}}^{0,4v} \right]^{\frac{1}{\omega}} \quad (2.14)$$

$\omega = 1 + 0,2v$, f ο συντελεστής τριβών των Colebrook–White και A και v είναι παράμετροι της συνάρτησης κόστους (Mandry, 1967) του Mandry $\delta = A.D^v$. Το σύστημα επιλύεται επακριβώς μόνο για την περίπτωση δικτύου με αγωγούς στη σειρά (Τζιμόπουλος, 1982). Για κάθε δίκτυο με διακλαδώσεις το σύστημα αποτελείται από $n + k$ εξισώσεις, [k είναι ο συνολικός αριθμός των περάτων του δικτύου].

Ο Μ. Θεοχάρης το 2004 επέλυσε το πρόβλημα στηριζόμενος στην παρατήρηση ότι ο κάθε τροφοδοτούμενος κλάδος ενός ακτινωτού δικτύου τείνει να ανυψώσει την οικονομική πιεζομετρική γραμμή στους κόμβους διακλάδωσης, πάνω από την οικονομική πιεζομετρική γραμμή του δικτύου το οποίο δεν περιλαμβάνει τον κλάδο αυτό (Θεοχάρης, 2004). Έτσι εάν εκλεγεί η πλήρης διαδρομή του δικτύου, $N_0-N_{\tau_j}$, η οποία παρουσιάζει την ελάχιστη μέση κλίση, η οικονομική πιεζομετρική γραμμή που αντιστοιχεί σε αυτή (με την προϋπόθεση ότι οι υπόλοιπες διαδρομές αγνοούνται) υπό την επίδραση των υπόλοιπων πλήρων διαδρομών ανυψώνεται και τείνει να συναντήσει την πραγματική οικονομική πιεζομετρική γραμμή του δικτύου. Τα διαθέσιμα πιεζομετρικά φορτία, $\Delta H'_{S_i}$, των κλάδων οι οποίοι ανήκουν σε αυτή την πλήρη διαδρομή υπολογίζονται από τη σχέση:

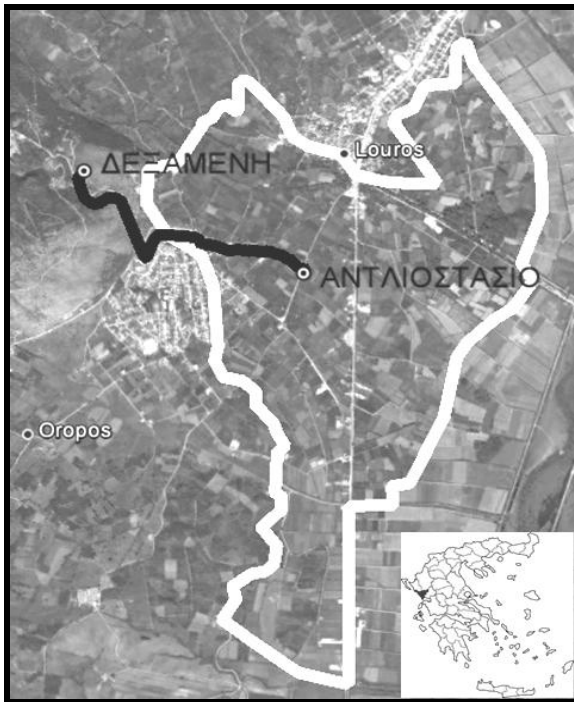
$$\Delta H'_{S_i} = \frac{\Phi_{S_i}}{\sum_{i=1}^{\tau} \Phi_{S_i} + \Phi_{L_{\tau_j}}} \cdot (h_{N_0} - h_{N_{\tau_j}}) \quad (2.15)$$

Τα πιεζομετρικά φορτία των κόμβων διακλάδωσης, που υπολογίζονται με την παραπάνω διαδικασία, χρησιμοποιούνται ως φορτία κεφαλής των τροφοδοτούμενων κλάδων του δικτύου και υπολογίζονται στη συνέχεια οι απώλειες και οι διάμετροι των αγωγών των κλάδων αυτών. Με την παράλειψη των τροφοδοτούμενων κλάδων (Θεοχάρης, 2004, Theocharis, et al., 2006), πρέπει συγχρόνως να παραλειφθούν και οι παροχές αυτών, δηλαδή να αντικατασταθούν οι Φ_{S_i} από τις Φ'_{S_i} , που θα προέκυπταν αν δεν υπήρχαν οι καταργούμενοι τροφοδοτούμενοι κλάδοι. Από τα $\Delta H'_{S_i}$, που υπολογίζονται κατ' αυτό τον τρόπο, και τις πραγματικές παροχές των αγωγών υπολογίζονται οι διάμετροι των αγωγών.

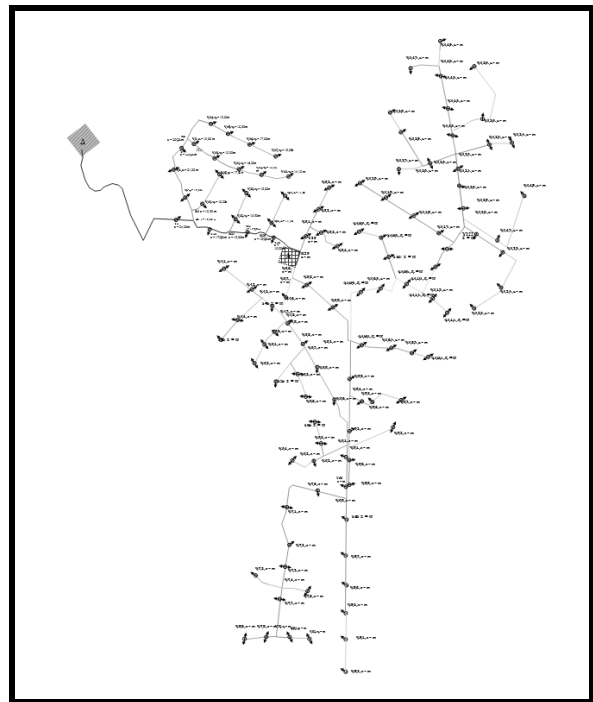
3. ΕΦΑΡΜΟΓΗ

Η περιοχή του αρδευτικού έργου αποτελεί τμήμα της κοιλάδας της Λάμαρης του Νομού Πρέβεζας, της Περιφέρειας Ηπείρου και έχει συντεταγμένες $39^{\circ} 7' B$ έως $39^{\circ} 10' B$ και $20^{\circ} 44' A$ έως $20^{\circ} 46' A$.

Πρόκειται να αρδευτεί έκταση περίπου 6300 στρεμμάτων (Σχήματα 3 και 4) με δίκτυο κλειστών αγωγών υπό πίεση, από σωλήνες PVC 12,5 atm και χαλυβδοσωλήνες. Το υπόψη έργο αποτελεί αυτοτελές τμήμα μείζονος αρδευτικού δικτύου ανοικτών αγωγών και η τροφοδοσία του γίνεται από ένα αντλητικό συγκρότημα και μια αναρρυθμιστική δεξαμενή.



Σχήμα 3: Η περιοχή του έργου.



Σχήμα 4: Η οριζοντιογραφία του δικτύου.

Η παροχή των ακροστομιών είναι $Q = 729 \text{ l/s}$ και προέκυψε από την εφαρμογή της τροποποιημένης μεθόδου Penman (FAO 24). (Σιάνου, 2012). Η λειτουργία των υδροστομιών γίνεται με ελεύθερη ζήτηση. Η παροχή των αγωγών για ποιότητα λειτουργίας 95 % υπολογίστηκε με τον τύπο του Clément (Σιάνου, 2012).

Στο σχήμα 3 φαίνεται η αρδευόμενη έκταση που έχει ληφθεί από το Google earth και στο σχήμα 4 η οριζοντιογραφία του. Με λευκό χρώμα σημειώνονται τα όρια που καταλαμβάνει το δίκτυο και με μαύρο χρώμα ο αγωγός που ενώνει το αντλιοστάσιο με τη δεξαμενή αναρρύθμισης. Στα σχήματα 5α, 5β και 5γ παρουσιάζεται η οριζοντιογραφία του δικτύου κατά τμήματα, λόγω του μεγάλου μεγέθους του, το οποίο αποτελείται από 119 υδροληψίες και 29 κόμβους διακλάδωσης.

Ο υπολογισμός του ελαχίστου κόστους του δικτύου και η εύρεση των οικονομικών διαμέτρων των αγωγών του πραγματοποιήθηκε για υψόμετρο δεξαμενής $H_{\Delta} = 91,39 \text{ m}$.

4. ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ

4.1. ΕΠΙΛΥΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟ

Αναπτύχθηκε η αντικειμενική συνάρτηση η οποία έχει 821 μεταβλητές αποφάσεων. Η ελαχιστοποιημένη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης πρέπει να υπολογιστεί όταν ισχύουν 148 περιορισμοί μήκους, 821 περιορισμοί απωλειών φορτίου και 148 περιορισμοί μη αρνητικότητας. Η βελτιστοποίηση έγινε με τη μέθοδο SIMPLEX και το λογισμικό MATLAB.

Από την επίλυση προέκυψε ότι για τους 162 αγωγούς του δικτύου θα χρησιμοποιηθούν 18 διάμετροι και το βέλτιστο κόστος του θα είναι $P_{\Delta} = 2.300.218,60 \text{ €}$.

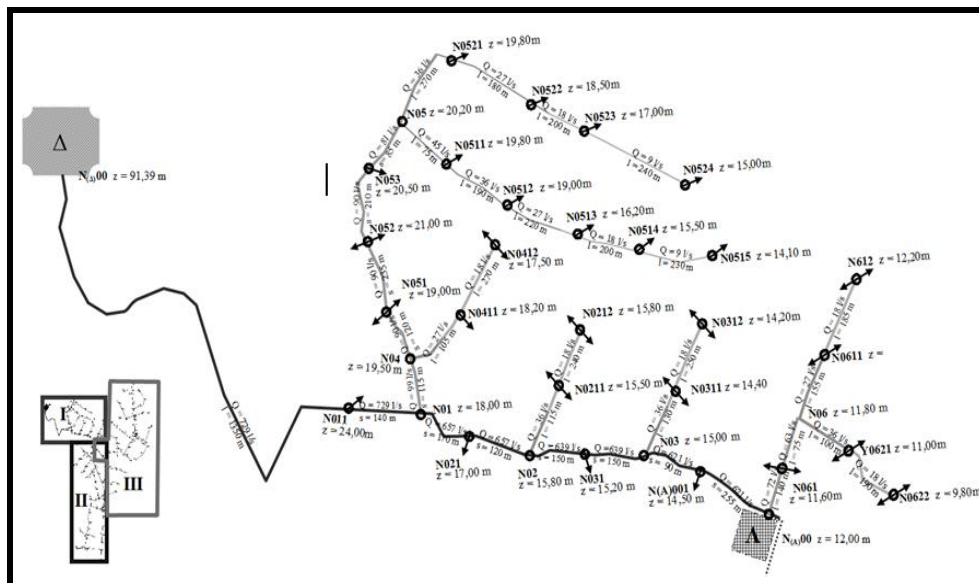
4.2. ΕΠΙΛΥΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΑΠΛΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΟΥ Μ. ΘΕΟΧΑΡΗ

Εκλέχτηκε η πλήρης διαδρομή του δικτύου η οποία παρουσιάζει την ελάχιστη μέση κλίση, και υπολογίστηκαν τα διαθέσιμα πιεζομετρικά φορτία των κλάδων οι οποίοι ανήκουν

σε αυτή την πλήρη διαδρομή από την εξίσωση (2.13) όπου τα Φ_{s_i} αντικαταστάθηκαν από τα Φ'_{s_i} όπως περιγράφεται στην παράγραφο 2.2.

Τα πιεζομετρικά φορτία των κόμβων διακλάδωσης, που υπολογίστηκαν με την παραπάνω διαδικασία, χρησιμοποιήθηκαν ως φορτία κεφαλής των τροφοδοτούμενων κλάδων του δικτύου και έτσι υπολογίστηκαν στη συνέχεια οι απώλειες και οι διάμετροι των αγωγών των κλάδων αυτών. Από τα $\Delta H'_{s_i}$, που υπολογίστηκαν κατ' αυτό τον τρόπο και τις πραγματικές παροχές των αγωγών, υπολογίστηκαν οι διάμετροι των αγωγών.

Από τις ανά μέτρο μήκους τιμές των αγωγών ανάλογα με τις υπολογισθείσες διαμέτρους αυτών και από τα μήκη των αγωγών, προέκυψε το ελάχιστο κόστος δικτύου $P_{\Delta}=2.315.164,92 \text{ €}$.



Σχήμα 5α: Η οριζοντιογραφία του δικτύου, Τμήμα Ι.

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ

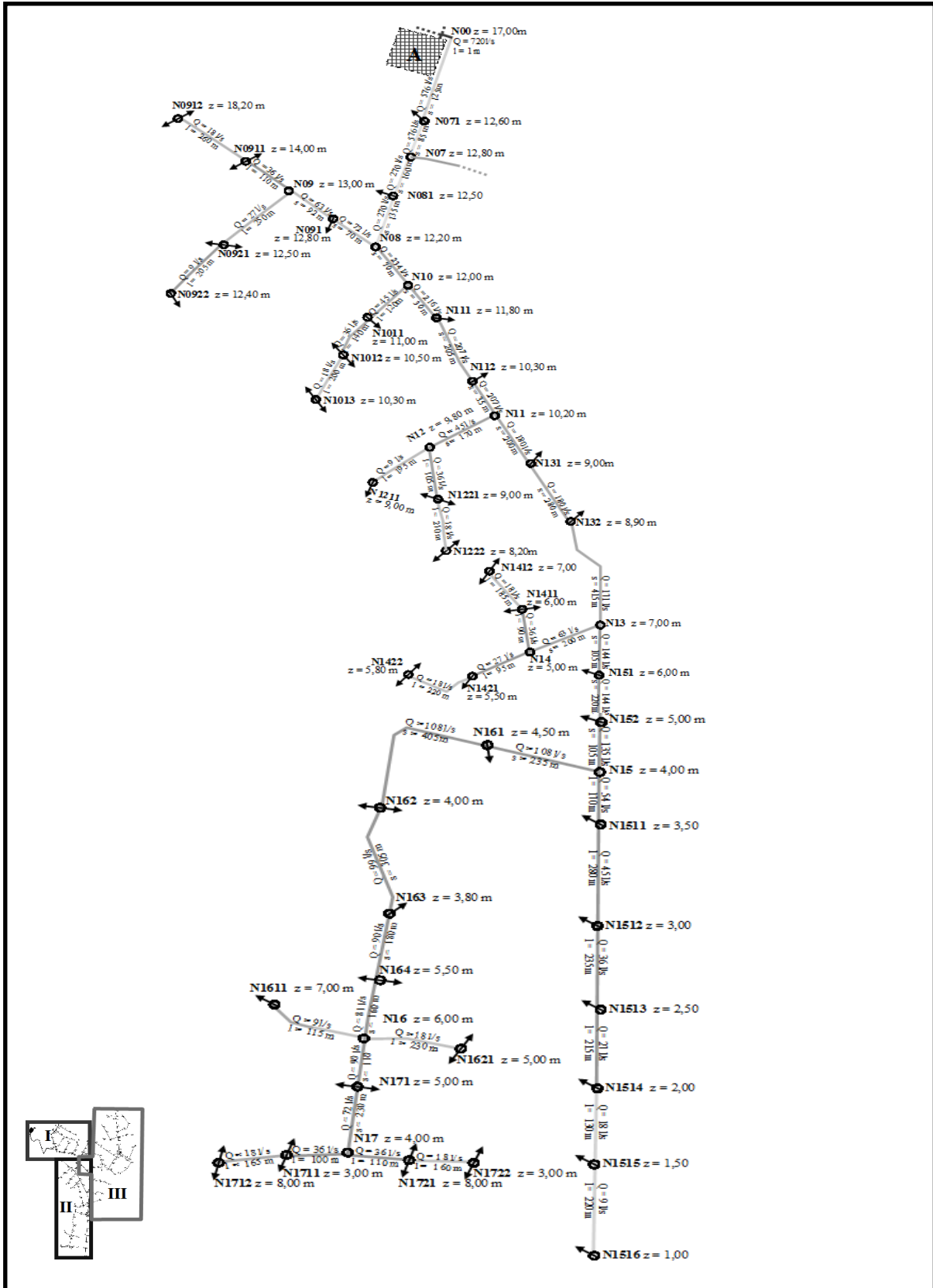
Η σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την εφαρμογή των μεθόδων βελτιστοποίησης του γραμμικού προγραμματισμού, και της τροποποιημένης μεθόδου του Μ. Θεοχάρη στο δίκτυο χαμηλής ζώνης Λάμαρης του νομού Πρέβεζας, έγινε με επεξεργασμένες τις τελικές τιμές, καθώς η μεν γραμμική μέθοδος δίνει τυχαία μήκη τμημάτων των αγωγών, τα οποία πρέπει να στρογγυλοποιηθούν σε ακέραια πολλαπλάσια του 6, η δε τροποποιημένη μέθοδος δίνει τυχαίες τιμές των διαμέτρων των αγωγών και χρειάζεται από αυτές να επιλεγούν τυποποιημένες τιμές εμπορίου.

Από τις συγκρίσεις των επεξεργασμένων αποτελεσμάτων προέκυψαν τα ακόλουθα:

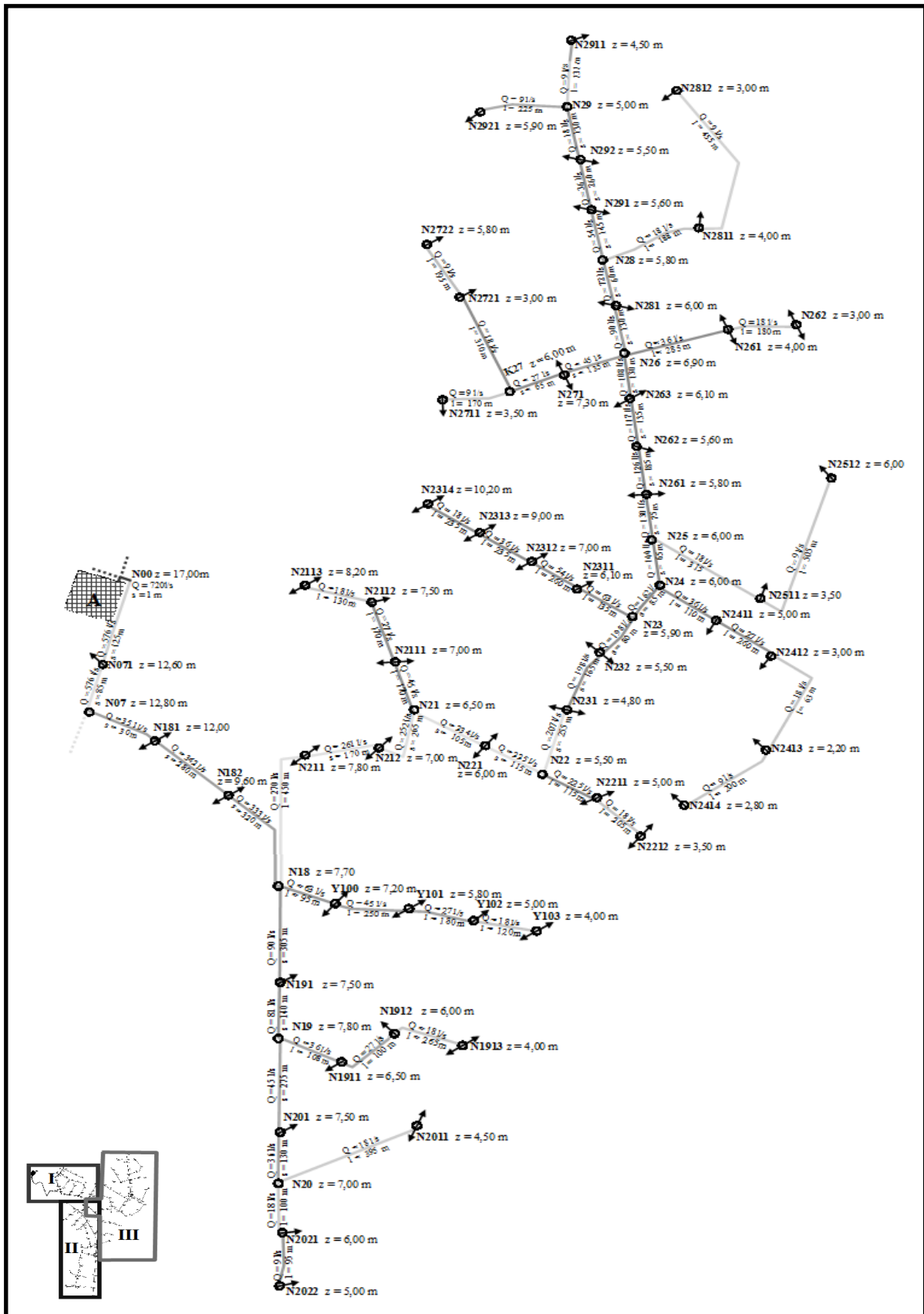
5.1 ΤΟ ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ

Το συνολικό κόστος κατασκευής του δικτύου σύμφωνα με την μέθοδο του γραμμικού προγραμματισμού είναι $P_{\Delta} = 2.300.218,60 \text{ €}$ και με την με την τροποποιημένη απλοποιημένη μέθοδο είναι $P_{\Delta} = 2.315.164,92 \text{ €}$ (Σιάνου, 2012).

Παρατηρείται ότι οι διαφορές στο συνολικό κόστος είναι 0,6 % και τα οικονομικότερα αποτελέσματα προκύπτουν από την εφαρμογή της γραμμικής μεθόδου.



Σχήμα 5β: Η οριζοντιογραφία του δικτύου, Τμήμα II.



Σχήμα 5γ: Η οριζοντιογραφία του δικτύου, Τμήμα III.

5.2 ΤΟ ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΕΤΗΣΙΟ ΚΟΣΤΟΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ

Το συνολικό ετήσιο κόστος για την κατασκευή και λειτουργία του δικτύου είναι $P_{ET} = 381.114,42$ € με τη γραμμική μέθοδο και με την με την τροποποιημένη απλοποιημένη μέθοδο είναι $P_{ET} = 382.713,21$ € δηλαδή τα δύο κόστη διαφέρουν κατά 0,4 %. (Σιάνου, 2012).

5.3 ΟΙ ΔΙΑΜΕΤΡΟΙ ΤΩΝ ΑΓΩΓΩΝ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ

Οι διάμετροι των αγωγών που υπολογίστηκαν με την τροποποιημένη μέθοδο ταυτίζονται απολύτως με το 59 % των διαμέτρων που υπολογίστηκαν κατά τη γραμμική μέθοδο και για τους υπόλοιπους αγωγούς οι διαφορές δεν είναι σημαντικές (Σιάνου, 2012).

5.4 ΤΟ ΎψΟΣ ΠΙΕΣΗΣ ΤΩΝ ΚΟΜΒΩΝ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ

Οι ακραίες τιμές του ύψους πίεσης p/γ του κάθε κόμβου είναι με τη μέθοδο του γραμμικού προγραμματισμού $\min \frac{p}{\gamma} = 58,00$ m και $\max \frac{p}{\gamma} = 74,63$ m και με την τροποποιημένη μέθοδο του

M. Θεοχάρη $\min \frac{p}{\gamma} = 58,00$ m και $\max \frac{p}{\gamma} = 75,05$ m, και οι τιμές τους ταυτίζονται στους περισσότερους κόμβους (Σιάνου, 2012).

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

1. Η απαιτούμενη υπολογιστική διαδικασία για την εφαρμογή της γραμμικής μεθόδου είναι τεράστια αφού:
 - α) Για την προετοιμασία της αντικειμενικής συνάρτησης και των περιορισμών δομής απαιτείται αρκετά μεγάλος όγκος δεδομένων και υπολογισμών για κάθε αγωγό χωριστά.
 - β) Η αντικειμενική συνάρτηση έχει στην προκειμένη περίπτωση 821 μεταβλητές αποφάσεων και περιορισμοί δομής είναι 296 ανισότητες.
 - γ) Για την αναγραφή και μόνο της αντικειμενικής συνάρτησης και των περιορισμών δομής απαιτούνται 41 δακτυλογραφημένες σελίδες (3 σελίδες για την αντικειμενική συνάρτηση, 3 σελίδες για τους περιορισμούς μήκους και 35 σελίδες για τους περιορισμούς απωλειών).
 - δ) Η βελτιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης επιτυγχάνεται μόνο με ηλεκτρονικό υπολογιστή και μόνο με τη χρήση ειδικού προγράμματος π.χ. του LINDO ή του MATLAB (στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε MATLAB).

Επομένως η εφαρμογή της γραμμικής μεθόδου είναι επίπονη και πολύ δύσκολη ενώ παράλληλα υπάρχει μεγάλος κίνδυνος λογιστικών λαθών αφού ο μελετητής δεν έχει άμεση εποπτεία της εκτελούμενης διαδικασίας.
2. *Η απαιτούμενη υπολογιστική διαδικασία για την εφαρμογή της απλοποιημένης μεθόδου είναι πολύ μικρότερη από την αντίστοιχη της γραμμικής μεθόδου και η εφαρμογή της είναι εύκολη αφού δεν υπάρχει σύστημα εξισώσεων αλλά απλές εξισώσεις για την επίλυση των οποίων απαιτείται μόνο μια απλή υπολογιστική μηχανή των τεσσάρων πράξεων.*

Επομένως η εφαρμογή των απλοποιημένων μεθόδων δίνει γρήγορα αποτελέσματα, τυχόν δε λογιστικό σφάλμα αφ ενός μεν εντοπίζεται αμέσως, αφ ετέρου δε δεν επηρεάζει την ορθότητα των υπολογισμών του υπολοίπου δικτύου.
3. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή της απλοποιημένης μεθόδου, ταυτίζονται απολύτως με τα αποτελέσματα της γραμμικής μεθόδου. Στο συμπέρασμα αυτό οδήγησαν και τα αποτελέσματα άλλων μελετών που διεξήχθησαν: α) σε περιοχή

της Δράμας (Μ. Θεοχάρης, 2002, 2003, 2004, 2005, 2009, 2010), β) στα Καβάσιλα Ημαθίας (Σ. Χονδρογιάννης, 2005, 2006) και γ) στη Βαλανιδοράχη Πρέβεζας (Γιαννέλος, 2007, Karantounias et. Al., 2005).

Επομένως μπορεί να χρησιμοποιείται η μέθοδος αυτή ισότιμα με τη γραμμική μέθοδο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Γιαννέλος, Α., 2007. *Διερεύνηση καθορισμού βέλτιστων διαμέτρων αρδευτικών δικτύων υπό πίεση με χρησιμοποίηση διαφόρων μεθόδων υπολογισμού*. Μεταπτυχιακή Διατριβή, σελ. 32, 57-63, 64-79, 132-140, 141-149 και 150-151, Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής, Γεωπ. Παν/μιο Αθηνών.
- Θεοχάρης, Μ., 2004. *Βελτιστοποίηση των Αρδευτικών Δικτύων. Εύρεση των Οικονομικών Διαμετρών*. Διδακτορική Διατριβή. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης Πολυτεχνική Σχολή.
- Θεοχάρης, Μ., 2009. *Συγκριτική αξιολόγηση των μεθόδων βελτιστοποίησης των αρδευτικών δικτύων*. ΥΔΡΟΓΑΙΑ. Τιμητικός Τόμος στον Καθηγητή Χρήστο Τζιμόπουλο (Επιμέλεια έκδοσης: Σταύρος Γιαννόπουλος), Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή Α.Π.Θ., σελ. 73-86, Έκδοση Α.Π.Θ., ISBN: 978 - 960-243-659-2, Παραγωγή Π. Ζήτη & Σια ΟΕ, Θεσσαλονίκη.
- Νουτσόπουλος, Γ., 1969. *Το πρόβλημα της οικονομικής πιεζομετρικής γραμμής ακτινωτών δικτύων βαρύτητας*. Τεχνικά Χρονικά, Οκτ, 1969 σελ. 661 – 676.
- Σιάνου Αναστασία, 2012. *Συγκριτική μελέτη βελτιστοποίησης του αρδευτικού δικτύου Λάμαρης – Πρέβεζας με εφαρμογή της μεθόδου του Labye, της γραμμικής μεθόδου, της απλοποιημένης και τροποποιημένης μη γραμμικής μεθόδου του Μ. Θεοχαρη*. Μεταπτυχιακή Διατριβή, Τμήμα Χημείας, Παν/μιο Ιωαννίνων.
- Τζιμόπουλος, Χ., 1982. *Γεωργική υδραυλική-Συλλογικά αρδευτικά δίκτυα με καταιονισμό*, Τόμοι Ι, ΙΙ, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
- Χονδρογιάννης, Σ., 2005. *Απλοποιημένη μη γραμμική μέθοδος βελτιστοποίησης του κόστους ενός αρδευτικού δικτύου υπό πίεση. Σύγκριση με τη μέθοδο του γραμμικού προγραμματισμού. Εφαρμογή στο αρδευτικό δίκτυο Καβασιλών*. Μεταπτυχιακή Διατριβή, σελ. 20-22, 39-40, 41-59, 72-83, 96 – 106 και 120-121, Τμήμα Αγρ. και Τοπ. Μηχ. Α.Π.Θ. Θεσσαλονίκη.
- Χονδρογιάννης Σωκράτης, Τζιμόπουλος Χρήστος, Ευαγγελίδης Χρήστος, 2006. *Εφαρμογή μιας απλοποιημένης μη γραμμικής μεθόδου βελτιστοποίησης του κόστους ενός αρδευτικού δικτύου υπό πίεση*. Πρακτικά 10ου Πανελληνίου Συνεδρίου της Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης, Ε.Υ.Ε, σελ. 801- 807. Δεκέμβριος 2006, Ξάνθη.
- Karantounias, G., Giannelos, A., Tzimopoulos C. and Sakellariou – Makrantonaki, M., 2005. *Comparative calculation of optimal diameters in irrigation networks using the nonlinear programming optimization method and a simplified optimization method*. Proc. 6th Int. Conf. EWRA 2005, paper No 157, p. 44, September 2005, Menton, France.
- Mandry, J.E., 1967. *Design of pipe distribution for sprinkler and drainage*. Proc. A.S.C.E. Journal of the irrigation and Drainage, Div. Vol. 93 Sept. 1967.
- Menelaos E. Theocharis, Christos D. Tzimopoulos, Stavros I. Yannopoulos and Maria A. Sakellariou-Makrantonaki, 2006. *Design of optimal irrigation networks*. Jour. Irrigation and Drainage. Vol. 55, Issue 1, February 2006, pp. 21-32.

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΣΤΑΘΕΡΗ
ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΚΑΙ ΥΠΟΓΕΙΑ ΕΙΣΡΟΗ ΣΕ ΣΥΝΘΗΚΕΣ
ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΚΑΙ ΑΣΤΑΘΟΥΣ ΣΤΡΑΓΓΙΣΗΣ**

Δ.Ν. Καραμούζης¹, Π.Ε. Γεωργίου², Δ.Κ. Καρπούζος³

Τομέας Εγγείων Βελτιώσεων, Εδαφολογίας και Γεωργικής Μηχανικής
Γεωπονική Σχολή Α.Π.Θ., 54124 Θεσσαλονίκη
E-mail: ¹kardia@agro.auth.gr, ²pantaz@agro.auth.gr, ³dimkarp@agro.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή εξετάζεται η στράγγιση ενός εδάφους που δέχεται δυναμικά επιφανειακές επαναπληρώσεις από βροχόπτωση ή άρδευση, διαφορετικές κατά τη σταθερή και την ασταθή περίοδο καθώς επίσης και μία σταθερή παροχή επαναπλήρωσης από τον υποκείμενο ημίκλειστο υδροφορέα. Το πρόβλημα αυτό περιγράφεται από τη μη ομογενή μη γραμμική μερική διαφορική εξίσωση του Boussinesq, κατάλληλα διαμορφωμένη για να συμπεριλάβει τις παραπάνω παραμέτρους. Η γενική αναλυτική λύση αυτού του προβλήματος δίνει, σε οποιαδήποτε θέση και χρόνο, το ύψος της στάθμης του υπόγειου νερού από το ημιδιαπερατό υπόστρωμα καθώς και την παροχή των σωλήνων του στραγγιζόμενου νερού. Επίσης, γίνεται διερεύνηση του προβλήματος για διάφορους συνδυασμούς των παραμέτρων επαναπλήρωσης και δίνονται οι αντίστοιχες αναλυτικές λύσεις. Τέλος, παρουσιάζονται αριθμητικές εφαρμογές οι οποίες συγκρίνονται με τις λύσεις που προκύπτουν με τις μεθόδους των πεπερασμένων διαφορών και πεπερασμένων στοιχείων.

**INVESTIGATION OF THE SOIL DRAINAGE PROBLEM WITH
CONSTANT SURFACE AND GROUNDWATER INFLOW UNDER
STEADY AND UNSTEADY CONDITIONS**

D.N. Karamouzis¹, P.E. Georgiou², D.K. Karpouzos³

Department of Hydraulics, Soil Science and Agricultural Engineering
Faculty of Agriculture, A.U.Th., 54124 Thessaloniki
E-mail: ¹kardia@agro.auth.gr, ²pantaz@agro.auth.gr, ³dimkarp@agro.auth.gr

ABSTRACT

In this paper, the analytical solution for the drainage problem, with an upward recharge through a semi-impermeable layer and downward uniform recharges from rainfall or irrigation during the steady as well as the unsteady state conditions, is presented. The rates of the recharges are considered to be constant. This problem is described by the non homogenous nonlinear partial differential Boussinesq equation, including all these parameters. The general analytical solution of this problem gives the values of the height of the soil water table and the discharge of the drains. This solution for different combinations of the recharge parameters is explored and the respected solutions are given for the unsteady falling as well as rising water table. Finally, applications are presented, which are compared with the respective numerical results, applying the numerical Finite Difference Method (FDM) or the Finite Element Method (FEM).

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η στράγγιση των εδαφών είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας για τη γεωργία διότι με την απομάκρυνση του πλεονάζοντος νερού από την εδαφική ζώνη του ριζοστρώματος των φυτών εξασφαλίζεται καλός αερισμός, αποφεύγεται η κατάκλυση και επιτυγχάνεται η απομάκρυνση των αλάτων. Η γνώση του μηχανισμού και η προσομοίωση της κίνησης του νερού στο έδαφος, δίνει τη δυνατότητα στον καλύτερο οικονομικοτεχνικό σχεδιασμό των μεθόδων στράγγισης και στην καλύτερη διαχείριση του στραγγιστικού δικτύου.

Η κίνηση του εδαφικού νερού προς τους στραγγιστικούς αγωγούς γεωργικών εκτάσεων, που δέχονται κατακόρυφη εισροή από βροχόπτωση ή άρδευση, καθώς και η εισροή ή διαρροή μέσα από ένα ημιδιαπερατό υπόστρωμα, είναι στη γενική περίπτωση τρισδιάστατη και περιγράφεται από μη γραμμικές, μη ομογενείς μερικές διαφορικές εξισώσεις (Terzidis, 1968; van Beers, 1969; Τερζίδης και Καραμούζης, 1986; Ζήσης κ. άλ., 1995; Teloglou et al., 1998; Ζήσης, 2001; Καραμούζης, 2012).

Το πρόβλημα της ασταθούς στράγγισης έχει μελετηθεί από πολλούς ερευνητές, οι οποίοι εφάρμοσαν αναλυτικές ή αριθμητικές μεθόδους. Αναλυτικές λύσεις της γραμμικοποιημένης εξίσωσης Boussinesq έχουν δοθεί για τη στράγγιση ομογενούς ισότροπου εδάφους που εδράζεται σε ένα οριζόντιο αδιαπέρατο υπόστρωμα και δέχεται μία σταθερή επαναπλήρωση από άρδευση ή βροχόπτωση από τους Kraijenhoff van de Leur (1958), Maasland (1959), Wesseling (1974) και Marino (1974 a,b). Στην περίπτωση της στράγγισης ενός εδάφους που εδράζεται πάνω σε μία ημιδιαπερατή στρώση, η επαναπλήρωση μπορεί να οφείλεται όχι μόνο στη βαθειά διήθηση του νερού προερχόμενου από άρδευση ή βροχόπτωση, αλλά και στην προς τα επάνω εισροή νερού, από υποκείμενο ημίκλειστο υδροφορέα προς το έδαφος. Αναλυτικές λύσεις της εξίσωσης Boussinesq για τέτοιου είδους προβλήματα, έχουν δοθεί από τους Karamouzis et al. (1988), Karamouzis (1991) και Karamouzis and Teloglou (1993).

Στην εργασία αυτή εξετάζεται η στράγγιση ενός εδάφους που δέχεται επιφανειακές επαναπληρώσεις από βροχόπτωση ή άρδευση, διαφορετικές κατά τη σταθερή και την ασταθή περίοδο στράγγισης. Μέσα από ένα ημιδιαπερατό υπόστρωμα μπορεί να εισέρχεται και μια σταθερή παροχή επαναπλήρωσης. Το πρόβλημα αυτό περιγράφεται από τη μη ομογενή μη γραμμική μερική διαφορική εξίσωση του Boussinesq. Η γενική αναλυτική λύση αυτού του προβλήματος δίνει, για οποιεσδήποτε τιμές των x και t , το ύψος της στάθμης του υπόγειου νερού από το ημιδιαπερατό υπόστρωμα καθώς και την παροχή σωλήνων του στραγγιζόμενου νερού. Στο μεσοδιάστημα της ισαποχής των στραγγιστικών σωλήνων οι παραπάνω λύσεις δίνονται ως συναρτήσεις του αδιάστατου χρόνου και παρουσιάζονται και σε διαγραμματική μορφή. Η θέση της υπόγειας στάθμης περιγράφεται κατά την περίοδο της σταθερής στράγγισης από μια ελλειπτική καμπύλη, που είναι αποτέλεσμα των εισροών και κατά την περίοδο της ασταθούς στράγγισης περιγράφεται από μια παραβολική καμπύλη. Στην περίπτωση που η επιφανειακή εισροή κατά την ασταθή περίοδο, είναι μεγαλύτερη από την επιφανειακή εισροή της σταθερής περιόδου, τότε θα λαμβάνει χώρα μία ανύψωση της υπόγειας στάθμης καθώς και μία αύξηση της στραγγιζόμενης παροχής με το χρόνο. Στην αντίθετη περίπτωση θα λαμβάνει χώρα μία πτώση της υπόγειας στάθμης και μία μείωση της στραγγιζόμενης παροχής με το χρόνο. Το πρόβλημα αυτό λύνεται και αριθμητικά τόσο με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών, όσο και με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Τα λαμβανόμενα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε μορφή διαγραμμάτων, από τα οποία φαίνεται και η σύγκλιση των τιμών των τριών μεθόδων.

2. ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΚΑΙ ΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Ας θεωρήσουμε την ασταθή στράγγιση ενός εδάφους που μπορεί να δέχεται μία επιφανειακή επαναπλήρωση από βροχόπτωση ή άρδευση, κατά τη σταθερή περίοδο στράγγισης I_0 και κατά την ασταθή περίοδο I_t . Επιπρόσθετα το έδαφος αυτό βρίσκεται πάνω σε ένα οριζόντιο ημιδιαπερατό υπόστρωμα, μέσα από το οποίο μπορεί να εισέρχεται μια σταθερή παροχή επαναπλήρωσης q_0 , όπως φαίνεται στο Σχήμα 1. Η ασταθής στράγγιση περιγράφεται από τη μη ομογενή μη γραμμική μερική διαφορική εξίσωση του Boussinesq που μπορεί να γραφεί και με τη μορφή της εξίσωσης:

$$\frac{\partial^2 h^2}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial h^2}{\partial t} - 2 \frac{q_0 + I_t}{K} \quad (2.1)$$

όπου $\alpha = KB/S$ και $B = \bar{h}$ είναι ένα σταθμισμένο μέσο βάθος της στάθμης του υπόγειου νερού, το οποίο θεωρείται σταθερό κατά βήματα.

Επιπρόσθετα η μαθηματική περιγραφή του προβλήματος γίνεται και από τις οριακές συνθήκες:

$$h(0, t) = h(L, t) = 0 \quad (2.2\alpha, \beta)$$

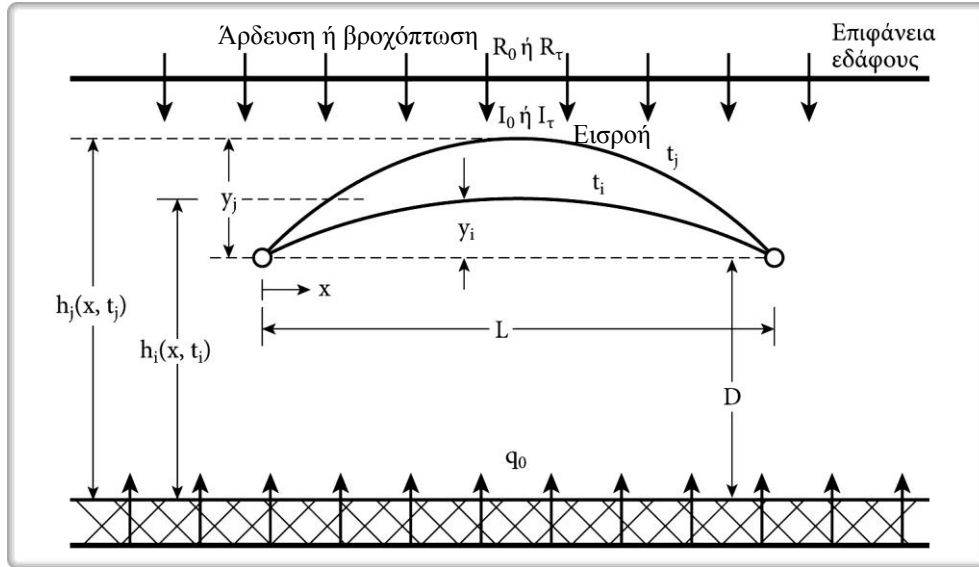
καθώς και από την αρχική συνθήκη:

$$h^2(x, 0) = D^2 + \frac{(q_0 + I_0)}{K} L^2 \left[\frac{x}{L} - \left(\frac{x}{L} \right)^2 \right] \quad (2.3\alpha)$$

Ή

$$h^2(x, 0) = D^2 + 4y_0(y_0 + 2D) \left[\frac{x}{L} - \left(\frac{x}{L} \right)^2 \right] \quad (2.3\beta)$$

όπου οι διάφοροι συμβολισμοί φαίνονται στο Σχήμα 1. Οι τιμές των I_0 , I_t και q_0 είναι διάφορες ή ίσες του μηδενός.



Σχήμα 1. Πρόβλημα με εισροή κατά τη σταθερή και την ασταθή στράγγιση ($q_0 \neq 0$, $I_0 \neq 0$, $I_t \neq 0$, $I_0 \neq I_t$).

Για τη λύση του προβλήματος των εξισώσεων (2.1), (2.2) και (2.3) εφαρμόζεται είτε η μέθοδος διαχωρισμού των μεταβλητών είτε η μέθοδος των μετασχηματισμών του Laplace. Επειδή τόσο η διαφορική εξίσωση όσο και η αρχική συνθήκη είναι μη ομογενείς, η λύση του προβλήματος αυτού θα είναι (Καραμούζης, 2012):

$$h^2(x, t) - D^2 = \frac{(I_t + q_0)L^2}{K} \left[\frac{x}{L} - \left(\frac{x}{L} \right)^2 \right] - \frac{(I_t - I_0)L^2}{4K} \frac{32}{\pi^3} \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{1}{n^3} e^{-n^2 \pi^2 at/L^2} \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \quad (2.4)$$

Η εξίσωση αυτή δίνει, για οποιοσδήποτε τιμές των x και t , το ύψος της στάθμης του υπόγειου νερού από το ημιδιαπερατό υπόστρωμα, μέσα από το οποίο εισέρχεται, με ανοδική κίνηση στο έδαφος που στραγγίζεται, μια σταθερή παροχή επαναπλήρωσης q_0 , όταν επιπλέον υπάρχει και μια επιφανειακή επαναπλήρωση από βροχόπτωση και άρδευση ίση με το I_0 κατά την σταθερή και I_t κατά την ασταθή στράγγιση.

Στο μεσοδιάστημα των στραγγιστικών σωλήνων, όπου είναι $x=L/2$, η εξίσωση (2.4) δίνει:

$$\frac{4K}{(I_t - I_0)L^2} (h_t^2 - D^2) - \frac{I_0 + q_0}{I_t - I_0} = 1 - F_t \quad (2.5\alpha)$$

ή

$$\frac{4K}{(I_t - I_0)L^2} [h_t^2 - D^2 - y_0(y_0 + 2D)] = 1 - F_t \quad (2.5\beta)$$

όπου $I_t \neq 0$ και F_t είναι μία συνάρτηση του αδιάστατου χρόνου $\tau = at/L^2$ και δίνεται από τη σχέση:

$$F_{\tau} = \frac{32}{\pi^3} \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{1}{n^3} e^{-n^2\pi^2\alpha t/L^2} \quad (2.6)$$

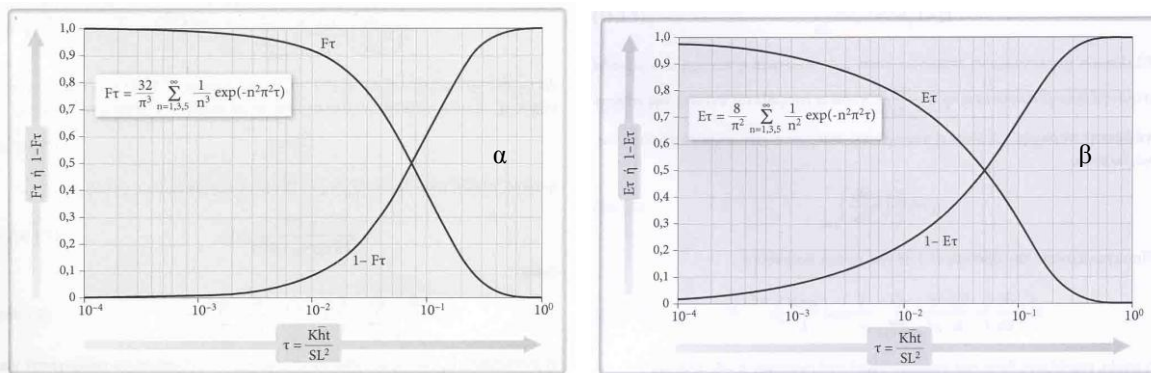
Οι τιμές της συνάρτησης $F_{\tau}(t)$ για $\tau=\alpha t/L^2$ παίρνονται είτε από πίνακες, είτε από ειδικά κατασκευασμένα διαγράμματα (Καραμούζης, 2012).

Παίρνοντας υπόψη ότι για μεγάλες τιμές του D είναι $y+2D \approx y_0+2D=2B$ οι εξισώσεις (2.5α,β) γίνονται, αντίστοιχα:

$$\frac{8KB}{(I_{\tau} - I_0)L^2} y_t - \frac{I_0 + q_0}{I_{\tau} - I_0} = 1 - F_{\tau} \quad (2.7\alpha)$$

$$\frac{8KB}{(I_{\tau} - I_0)L^2} y_t - \frac{4Ky_0(y_0 + 2D)}{(I_{\tau} - I_0)L^2} = 1 - F_{\tau} \quad (2.7\beta)$$

Στο διάγραμμα του Σχήματος 2α παρουσιάζονται οι καμπύλες F_{τ} και $1-F_{\tau}$ για κάθε τιμή του αδιάστατου χρόνου τ . Το διάγραμμα αυτό χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του ύψους της στάθμης του υπόγειου νερού στο μεσοδιάστημα των στραγγιστικών σωλήνων, για οποιοδήποτε χρόνο t , εφαρμόζοντας είτε μια από τις σχέσεις (2.5α,β), οπότε υπολογίζεται στο h_t , είτε μία από τις σχέσεις (2.7α,β) οπότε υπολογίζεται το y_t . Εδώ πρέπει να σημειωθεί, όπως άλλωστε είναι προφανές, ότι οι σχέσεις (2.5α) και (2.7α) θα εφαρμοστούν όταν είναι γνωστές τιμές των παροχών q_0 και I_0 που εισέρχονται μέσα από το ημιδιαπερατό υπόστρωμα και από την επιφανειακή βροχόπτωση ή άρδευση, αντίστοιχα, ενώ οι σχέσεις (2.5β) και (2.7β) θα εφαρμοστούν, όταν είναι γνωστές οι τιμές του ύψους της στάθμης του υπόγειου νερού h_0 ή y_0 , το οποίο αναφέρεται στο μεσοδιάστημά τους και στην αρχική συνθήκη.



Σχήμα 2. (α) Καμπύλη $1-F_{\tau}$ για κάθε τιμή του αδιάστατου χρόνου τ και (β) Καμπύλη $1-E_{\tau}$ για κάθε τιμή του αδιάστατου χρόνου τ .

Για τον υπολογισμό της έντασης της παροχής q_t , η οποία είναι η παροχή του νερού ανά μονάδα στραγγιζόμενης επιφάνειας, που εισέρχεται στο στραγγιστικό σωλήνα, όπου είναι $x=0$, με τη βοήθεια του νόμου του Darcy και τη λύση (2.4), γίνεται (Καραμούζης, 2012):

$$\frac{q_t - I_o - q_o}{I_\tau - I_o} = 1 - E_\tau, \quad (2.8\alpha)$$

ή επειδή είναι

$$I_o + q_o = \frac{4Ky_o(y_o + 2D)}{L^2} = \frac{8Ky_oB}{L^2}, \quad (2.9)$$

η σχέση (2.8α) γράφεται και με τη μορφή:

$$\frac{q_t}{I_\tau - I_o} - \frac{4Ky_o(y_o + 2D)}{(I_\tau - I_o)L^2} = 1 - E_\tau \quad (2.8\beta)$$

όπου E_τ είναι μία συνάρτηση του αδιάστατου χρόνου που δίνεται από τη σχέση:

$$E_\tau = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{1}{n^2} e^{-n^2\pi^2\alpha t/L^2} \quad (2.10)$$

Οι τιμές της συνάρτησης $E_\tau(\tau)$ και $1 - E_\tau$, για $\tau = \alpha t/L^2$ παίρνονται είτε από πίνακες, είτε από ειδικά κατασκευασμένα διαγράμματα (Καραμούζης, 2012).

Στο διάγραμμα του Σχήματος 2β παρουσιάζεται η καμπύλη $1 - E_\tau$ για κάθε τιμή του αδιάστατου χρόνου τ . Το διάγραμμα αυτό χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της έντασης της παροχής q_t , η οποία εισέρχεται το στραγγιστικό σωλήνα, με την βοήθεια της εξίσωσης (2.8α), όταν κατά την περίοδο της σταθερής στράγγισης λαμβάνει χώρα μια επιφανειακή επαναπλήρωση I_o , κατά την περίοδο της ασταθούς στράγγισης μια επιφανειακή επαναπλήρωση $I_\tau \neq I_o$, ενώ καθόλη την περίοδο της στράγγισης λαμβάνει χώρα και μια υπόγεια επαναπλήρωση από το ημιδιαπερατό υπόστρωμα ίση με q_o .

3. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Η λύση που δόθηκε στην προηγούμενη παράγραφο περιγράφει το πρόβλημα της ασταθούς στράγγισης ενός ομογενούς και ισοτρόπου εδάφους, που βρίσκεται πάνω σε ένα οριζόντιο ημιδιαπερατό υπόστρωμα, μέσα από το οποίο μπορεί να εισέρχεται, με ανοδική κίνηση, μία σταθερή επαναπλήρωση q_o . Το έδαφος μπορεί να δέχεται επίσης και μία αρχική επαναπλήρωση από βροχόπτωση ή άρδευση I_o . Αν ο χρόνος t της συνολικής επαναπλήρωσης ($I_o + q_o$) είναι ικανοποιητικά μεγάλος η στράγγιση γίνεται σταθερή. Σε κάποια χρονική στιγμή η επαναπλήρωση που εισέρχεται από την επιφάνεια του εδάφους παίρνει την τιμή $I_\tau \neq I_o$ προσθέτοντας ή αφαιρώντας μια επαναπλήρωση $I = I_\tau - I_o$, οπότε η στράγγιση γίνεται ασταθής ή μη μόνιμη.

Το στραγγιστικό δίκτυο του εδάφους αποτελείται από στραγγιστικούς σωλήνες, οι οποίοι έχουν εγκατασταθεί σε ένα ύψος D πάνω από το ημιδιαπερατό υπόστρωμα και ισαπέχουν απόσταση L .

Οι λύσεις του προβλήματος αυτού που δόθηκε προηγουμένως και οι σχέσεις μεταξύ των I_o , q_o , I_τ ή $I = I_\tau - I_o$ και του ύψους h_b της υπόγειας στάθμης στο μεσοδιάστημα των στραγγιστικών σωλήνων από το ημιδιαπερατό υπόστρωμα στο χρόνο t δίνονται από τις

εξισώσεις (2.5α,β) ή (2.7α,β). Οι σχέσεις μεταξύ των I_0 , q_0 , I_t , ή $I = I_t - I_0$ και της παροχής ανά μονάδα στραγγιζόμενης επιφάνειας, q_t , που εισέρχεται στο στραγγιστικό σωλήνα στο χρόνο t και δίνονται από τις εξισώσεις (2.8α,β).

Το **πρώτο πρόβλημα** που διερευνάται αφορά το πρόβλημα της ασταθούς στράγγισης, όταν στο έδαφος λαμβάνει χώρα μόνο επιφανειακή ή και υπόγεια εισροή και μόνο κατά τη σταθερή περίοδο. Ας θεωρήσουμε λοιπόν, ότι στις σχέσεις (2.5α) και (2.8α) είναι $q_0=0$, $I_t=0$ και $I_0 \neq 0$. Αυτό σημαίνει ότι η αρχική υπόγεια στάθμη είναι καμπύλη εξαιτίας της αρχικής επαναπλήρωσης I_0 . Μόλις η I_0 μηδενιστεί θα αρχίσει η πτώση της υπόγειας στάθμης, καθώς οι q_0 και I_t έχουν μηδενικές τιμές. Το πρόβλημα αυτό περιγράφηκε και λύθηκε από τον Glover, ο οποίος όμως χρησιμοποίησε, για την περιγραφή της αρχικής υπόγειας στάθμης, μια παραβολική σχέση τετάρτου βαθμού. Με τις παραπάνω τιμές $I_0 \neq 0$, $q_0=0$ και $I_t=0$ οι εξισώσεις (2.5α) και (2.8α) γίνονται αντίστοιχα:

$$\frac{4K}{I_0 L^2} [h_t^2 - D^2] = F_t \quad (3.1)$$

$$\frac{q_t}{I_0} = E_t \quad (3.2)$$

Οι σχέσεις (3.1) και (3.2) είναι οι λύσεις του προβλήματος της ασταθούς στράγγισης χωρίς επαναπλήρωση κατά την ασταθή περίοδο, η λύση του οποίου παρουσιάστηκε παλαιότερα από πολλούς ερευνητές. Το ίδιο πρόβλημα λύθηκε, στη γραμμική του όμως μορφή, αρχικά από τον Glover το 1954 (Dumm, 1954). Επειδή από το διάγραμμα του Σχήματος 2α φαίνεται ότι οι τιμές της συνάρτησης F_t μειώνονται με την αύξηση του αδιάστατου χρόνου τ , συνεπάγεται ότι και η μεταβλητή h_t της εξίσωσης (3.1) θα μειώνεται με την αύξηση του χρόνου t . Αυτό σημαίνει ότι στο πρόβλημα αυτό λαμβάνεται χώρα πτώση της υπόγειας στάθμης με το χρόνο. Επειδή για $\tau \rightarrow \infty$ η συνάρτηση F_t μηδενίζεται, άρα από την εξίσωση (3.1) θα γίνει $h_t=D$, δηλαδή η υπόγεια στάθμη θα κατέλθει στο επίπεδο των στραγγιστικών σωλήνων. Επιπρόσθετα, επειδή από το διάγραμμα του Σχήματος 2β φαίνεται ότι οι τιμές της συνάρτησης E_t μειώνονται, άρα και οι τιμές της στραγγιζόμενης παροχής ανά μονάδα επιφάνειας, q_t μειώνονται με την αύξηση του χρόνου t .

Το **δεύτερο πρόβλημα** αφορά το πρόβλημα της ασταθούς στράγγισης, όταν στο έδαφος λαμβάνει χώρα μόνο επιφανειακή εισροή και μόνο κατά τη σταθερή περίοδο. Οπότε στις λύσεις (2.5α) και (2.8α) είναι $I_0=0$, $q_0=0$ και $I_t \neq 0$. Σ' αυτήν την περίπτωση οι σχέσεις αυτές γίνονται, αντίστοιχα:

$$\frac{4K}{I_t L^2} (h_t^2 - D^2) = 1 - F_t \quad (3.3)$$

Και

$$\frac{q_t}{I_t} = 1 - E_t \quad (3.4)$$

Οι σχέσεις αυτές είναι οι λύσεις του προβλήματος της ασταθούς στράγγισης με επαναπλήρωση μόνο κατά την ασταθή περίοδο και μόνο από βροχόπτωση ή άρδευση, δηλαδή του μη γραμμικού προβλήματος του van de Leur και Maasland που παρουσιάστηκε από πολλούς ερευνητές. Από τα διαγράμματα των Σχημάτων 2α και 2β φαίνεται ότι οι όροι $(1-F_\tau)$ ή και $(1-E_\tau)$ αυξάνουν με την αύξηση του αδιάστατου χρόνου τ . Αυτό σημαίνει ότι και οι όροι (h_t-D) και q_t των λύσεων (3.3) και (3.4) αυξάνουν με την αύξηση του χρόνου t . Από αυτό συνεπάγεται ότι στο πρόβλημα αυτό της ασταθούς στράγγισης λαμβάνει χώρα ανύψωση της υπόγειας στάθμης και αύξηση της στραγγιζόμενης παροχής με την πάροδο του χρόνου t .

Το **τρίτο πρόβλημα** αφορά το πρόβλημα της ασταθούς στράγγισης, όταν στο έδαφος λαμβάνει χώρα επιφανειακή εισροή μόνο κατά τη σταθερή περίοδο, καθώς επίσης και υπόγεια εισροή μέσα από το ημιδιαπερατό υπόστρωμα, τόσο κατά τη σταθερή όσο και κατά την ασταθή περίοδο. Σ' αυτήν την περίπτωση στις λύσεις (2.5α) και (2.8α) είναι $I_0 \neq 0$, $q_0 \neq 0$, και $I_\tau = 0$, και οι παραπάνω σχέσεις γίνονται, αντίστοιχα:

$$\frac{4K}{I_0 L^2} (h_t^2 - D^2) - \frac{q_0}{I_0} = F_\tau \quad (3.5)$$

Και

$$\frac{q_t - q_0}{I_0} = E_\tau \quad (3.6)$$

Οι σχέσεις αυτές είναι οι λύσεις του προβλήματος της ασταθούς στράγγισης με επαναπλήρωση μόνο κατά τη σταθερή περίοδο, τόσο από βροχόπτωση ή άρδευση, όσο και από το ημιδιαπερατό υπόστρωμα. Κατά την περίοδο της ασταθούς στράγγισης το έδαφος δε δέχεται κάποια επιφανειακή εισροή. Επειδή οι συναρτήσεις F_τ και E_τ μειώνονται με τον αδιάστατο χρόνο τ , συνεπάγεται ότι και οι μεταβλητές h_t και q_t θα μειώνονται με το χρόνο t . Από αυτό συνεπάγεται ότι στο πρόβλημα αυτό θα λαμβάνει χώρα πτώση της υπόγειας στάθμης και μείωση της στραγγιζόμενης παροχής με την πάροδο του χρόνου t .

Το **τέταρτο πρόβλημα** αφορά το πρόβλημα της ασταθούς στράγγισης, όταν στο έδαφος λαμβάνει χώρα αρχικά μόνο υπόγεια εισροή τόσο κατά τη σταθερή όσο και κατά την ασταθή περίοδο, στην οποία όμως προστίθεται και επιφανειακή εισροή, αποτέλεσμα της οποίας είναι η ασταθής στράγγιση του εδάφους. Θεωρούμε δηλαδή ότι στις λύσεις (2.5α) και (2.8α) είναι $I_0 = 0$, $q_0 \neq 0$, και $I_\tau \neq 0$. Τότε οι παραπάνω σχέσεις γίνονται αντίστοιχα:

$$\frac{4K}{I_\tau L^2} (h_t^2 - D^2) - \frac{q_0}{I_\tau} = 1 - F_\tau \quad (3.7)$$

Και

$$\frac{q_t - q_0}{I_\tau} = 1 - E_\tau \quad (3.8)$$

Οι σχέσεις αυτές είναι οι λύσεις του προβλήματος της ασταθούς στράγγισης ενός εδάφους το οποίο δέχεται μια επιφανειακή επαναπλήρωση I_t μόνο κατά την ασταθή περίοδο καθώς και μια επαναπλήρωση q_0 από το ημιδιαπερατό υπόστρωμα.

Επειδή οι συναρτήσεις F_t και E_t μειώνονται με την αύξηση του αδιάστατου χρόνου τ , οι όροι $1-F_t$ και $1-E_t$ θα αυξάνονται, οπότε και οι τιμές της υπόγειας στάθμης h_t και της απομακρυνόμενης με την στράγγιση παροχής q_t θα αυξάνονται με το χρόνο t . Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι οι λύσεις (3.7) και (3.8) περιγράφουν την ανύψωση της υπόγειας στάθμης από μια αρχική καμπύλη επιφάνεια σε μία άλλη υψηλότερη θέση με την πάροδο του χρόνου.

Το **πέμπτο πρόβλημα** αφορά το πρόβλημα της ασταθούς στράγγισης, όταν στο έδαφος λαμβάνει χώρα αρχικά τόσο επιφανειακή όσο και υπόγεια εισροή κατά την σταθερή περίοδο. Κατά την ασταθή περίοδο συνεχίζεται η ίδια υπόγεια εισροή ενώ η επιφανειακή παίρνει μια νέα διαφορετική τιμή $I_t \neq 0$. Συνεπώς στην περίπτωση αυτή στις λύσεις (2.5α) και (2.8α) είναι $I_0 \neq 0$, $q_0 \neq 0$, και $I_t \neq 0$, όπου όμως είναι $I_t \neq I_0$. Τότε στο πρόβλημα της ασταθούς στράγγισης το στραγγιζόμενο έδαφος δέχεται σταθερές, κατά παραδοχή επαναπληρώσεις, οι οποίες κατά την μόνιμη ή σταθερή στράγγιση είναι οι I_0 και q_0 και κατά τη μη μόνιμη ή ασταθή στράγγιση είναι οι I_t και q_0 . Από αυτά συνεπάγεται ότι η θέση της υπόγειας στάθμης περιγράφεται κατά την περίοδο της σταθερής στράγγισης από μια ελλειπτική καμπύλη, που είναι αποτέλεσμα των εισροών I_0 και q_0 , και στη γραμμική μορφή της παίρνει μια παραβολική μορφή. Κατά την περίοδο της ασταθούς στράγγισης η θέση της υπόγειας στάθμης περιγράφεται από μια παραβολική καμπύλη, η οποία είναι αποτέλεσμα κυρίως των εισροών q_0 και I_t . Εξάλλου από τα διαγράμματα των Σχημάτων 2α και 2β φαίνεται ότι, οι τιμές των συναρτήσεων $1-F_t$ και $1-E_t$ αυξάνονται με την αύξηση του αδιάστατου χρόνου τ . Έτσι στην περίπτωση που η επιφανειακή εισροή I_t κατά την ασταθή περίοδο, είναι μεγαλύτερη από την επιφανειακή εισροή κατά την σταθερή περίοδο, δηλαδή αν $I_t > I_0$, τότε θα λαμβάνει χώρα μια ανύψωση της υπόγειας στάθμης από τη θέση $h_i = h_0$ στη θέση $h_j = h_t$, καθώς και μια αύξηση της στραγγιζόμενης παροχής q_t με τον χρόνο t . Στην περίπτωση που είναι $I_t < I_0$, θα λαμβάνει χώρα μία πτώση της υπόγειας στάθμης από τη θέση $h_j = h_0$ στη θέση $h_i = h_t$, και μία μείωση της στραγγιζόμενης παροχής q_t με το χρόνο. Στην περίπτωση που είναι $I_t - I_0 = 0$, οι όροι που περιέχουν το χρόνο στη λύση είναι ίσοι με μηδέν. Έτσι για $I_t - I_0 = 0$ οι λύσεις (2.5α) και (2.8α) δεν ισχύουν.

Από τη σχέση (2.4) για $I_t = I_0$ προκύπτει ότι η στράγγιση θα είναι σταθερή ή μόνιμη και η συνολική εισερχόμενη παροχή επαναπλήρωσης θα είναι:

$$I_0 + q_0 = 4K \frac{h_0^2 + D^2}{L^2} \quad \text{ή} \quad I_0 + q_0 = 4K \frac{y_0 (y_0 + 2D)}{L^2} \quad (3.9)$$

Τέλος από την ίδια σχέση (2.4) για $I_t = I_0$ η απομακρυνόμενη από ένα στραγγιστικό σωλήνα παροχή ανά μονάδα στραγγιζόμενης εδαφικής επιφάνειας q_t θα είναι:

$$q_t = I_0 + q_0 \quad (3.10)$$

Για πολύ μεγάλο χρόνο ($t \rightarrow \infty$) η γενική λύση (2.4) γίνεται:

$$h^2(x, \infty) - D^2 = \frac{(I_t + q_0)L^2}{K} \left[\frac{x}{L} - \left(\frac{x}{L} \right)^2 \right] \quad (3.11)$$

Αυτή η σχέση υποδηλώνει ότι έχουμε μία νέα περίοδο σταθερής στράγγισης. Επειδή δε για $t \rightarrow \infty$ η συνάρτηση $E \rightarrow 0$ άρα από την εξίσωση (2.8α) προκύπτει η σχέση:

$$q_t(t \rightarrow \infty) = I_t + q_o \quad (3.12)$$

η οποία είναι η νέα σταθερή απομακρυνόμενη παροχή από το στραγγιστικό σωλήνα.

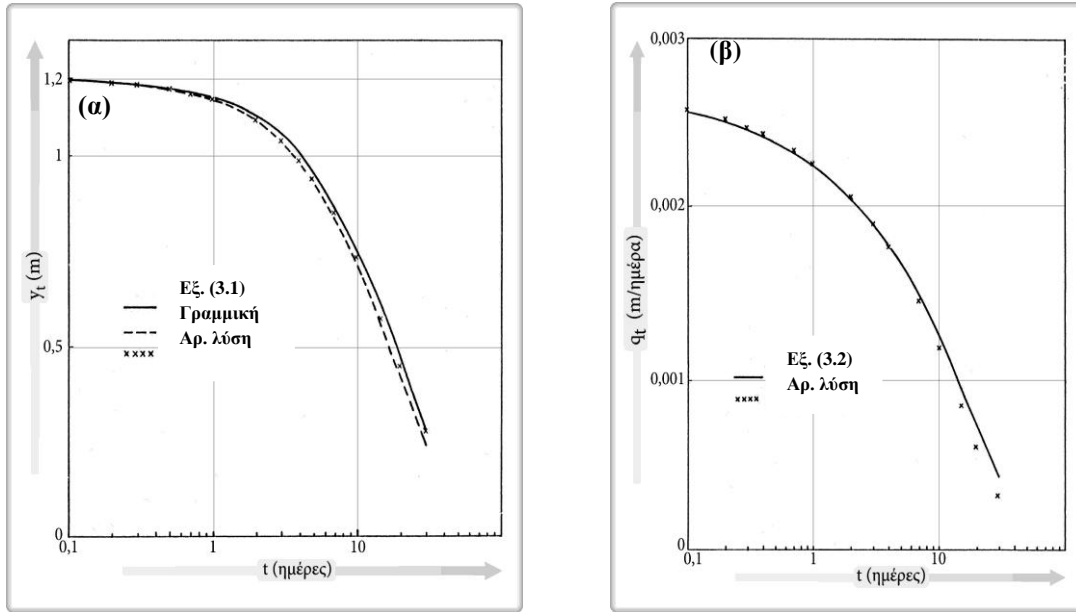
4. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται η συγκριτική αναλυτική και αριθμητική επίλυση των παραπάνω προβλημάτων διερεύνησης. Συγκεκριμένα δίνονται τρεις εφαρμογές των οποίων οι λύσεις που δίνονται από τις αναλυτικές εξισώσεις συγκρίνονται με τις αριθμητικές λύσεις της μη γραμμικής εξίσωσης του Boussinesq με μεθόδους πεπερασμένων διαφορών και πεπερασμένων στοιχείων. Το πεπλεγμένης μορφής υπολογιστικό σχήμα του τύπου του Laasonen εφαρμόστηκε για την επίλυση με πεπερασμένες διαφορές, ενώ για την αριθμητική επίλυση με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Galerkin, σε συνδυασμό με την προσέγγιση της πρόβλεψης – διόρθωσης. Τα αποτελέσματα και των δύο αριθμητικών λύσεων σχεδόν συμπίπτουν (Karamouzis et al., 1988).

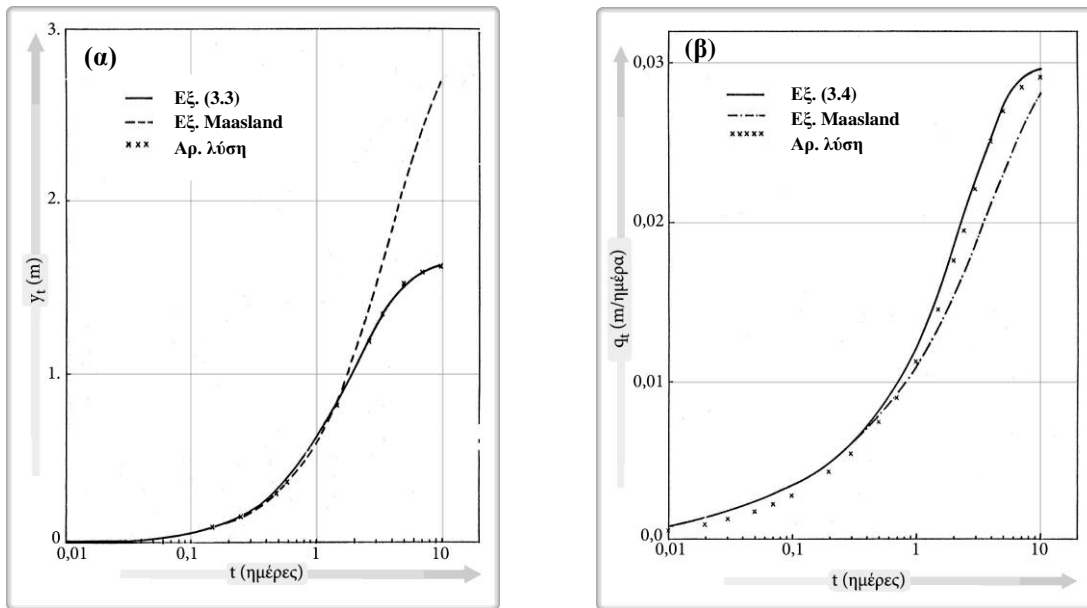
Η **πρώτη εφαρμογή** αφορά το πρόβλημα της ασταθούς στράγγισης χωρίς επαναπλήρωση κατά την ασταθή περίοδο ($I_o \neq 0$, $q_o = 0$ και $I_t = 0$) με τα αριθμητικά δεδομένα $K = 0.25$ m/ημέρα, $S = 0.05$, $L = 58$ m, $D = 3.2$ m και $I_o = 2.71$ mm/ημέρα από όπου προκύπτει $y_o = 1.2$ m. Αρχικά η υπόγεια στάθμη θεωρήθηκε ότι είχε το σχήμα που δίνεται από την εξίσωση (2.3α). Στο Σχήμα 3α παρουσιάζονται οι τιμές y_t που υπολογίστηκαν από την αναλυτική λύση που δίνεται από την εξίσωση (3.1) για $\bar{h} = B = D + y_o/2$, καθώς και από τις αριθμητικές λύσεις της εξίσωσης (2.1). Επίσης στο Σχήμα 3β παρουσιάζονται οι τιμές των q_t που υπολογίστηκαν από την αναλυτική λύση της εξίσωσης (3.2) καθώς και από τις αριθμητικές λύσεις.

Στη **δεύτερη εφαρμογή** για το πρόβλημα της ασταθούς στράγγισης με επαναπλήρωση μόνο από την βροχόπτωση ή την άρδευση κατά την ασταθή περίοδο ($I_o = 0$, $q_o = 0$ και $I_t \neq 0$), οι αριθμητικές τιμές των παραμέτρων είναι $K = 0.5$ m/ημέρα, $S = 0.05$, $L = 20$ m, $D = 1.024$ m $I_o = 0$ και $I_t = 0.03$ m/ημέρα. Από τα στοιχεία αυτά και επειδή είναι $y_\infty (y_\infty + 2D) = I_t L^2 / 4K$, προκύπτει ότι η μέγιστη για $t \rightarrow \infty$ τιμή της y_t , η οποία θα είναι η τιμή της σταθερής στράγγισης στο τέλος της ασταθούς θα είναι $y_\infty = 1.63$ m. Αρχικά η υπόγεια στάθμη ήταν οριζόντια στο $D = 1.024$ m. Στο Σχήμα 4α παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της y_t που υπολογίστηκαν από την αναλυτική λύση (3.3). Στην περίπτωση αυτή για τον υπολογισμό των τιμών αυτών έγιναν δύο επαναλήψεις με σκοπό να χρησιμοποιηθεί μια καλύτερη τιμή για το μέσο πιεζομετρικό φορτίο $\bar{h} = B$. Στην πρώτη επανάληψη χρησιμοποιήθηκε $B = D + y_o/2$ ενώ στη δεύτερη $B = D + y_t/2$, με αποτέλεσμα τη σημαντική βελτίωση των αποτελεσμάτων της αναλυτικής λύσης και πολύ ικανοποιητική προσέγγιση προς τα αποτελέσματα των αριθμητικών λύσεων της μη γραμμικής εξίσωσης (2.1). Η σημαντική απόκλιση της λύσης του Maasland οφείλεται στη γραμμικοποίηση της εξίσωσης (2.1) καθώς και στην προσέγγιση του μέσου φορτίου με $\bar{h} = D$. Στο Σχήμα 4β

παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της έντασης της παροχής q_t , που παίρνονται τόσο με την αναλυτική λύση (3.4) όσο και με τις αριθμητικές λύσεις.



Σχήμα 3. Έδαφος με $I_0 \neq 0$, $q_0 = 0$ και $I_\tau = 0$ (α) Μεταβολή της y_t σε (πτώση υπόγειας στάθμης), (β) Ένταση της στραγγιζόμενης παροχής q_t (μειούμενη παροχή στράγγισης).



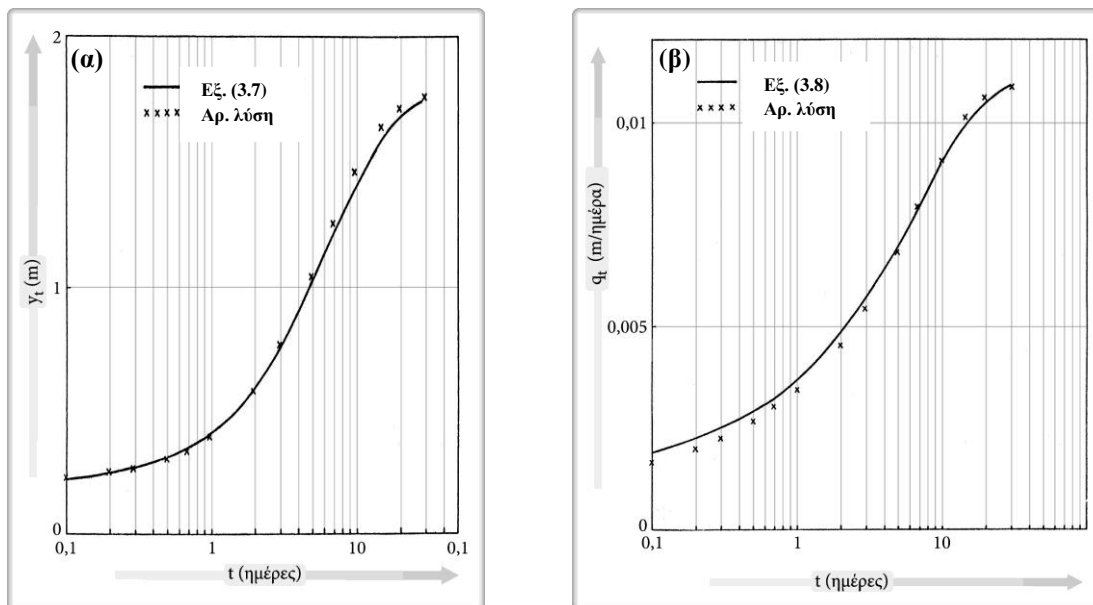
Σχήμα 4. Έδαφος με $I_0 = 0$, $q_0 = 0$ και $I_\tau \neq 0$ (α) Μεταβολή της y_t σε (ανύψωση υπόγειας στάθμης), (β) Ένταση της στραγγιζόμενης παροχής q_t (αυξανόμενη παροχή στράγγισης).

Η **τρίτη εφαρμογή** αφορά το τέταρτο πρόβλημα της ασταθούς στράγγισης με μηδενική αρχική επιφανειακή εισροή, οπότε θα είναι $I_0 = 0$, αλλά με υπόγεια εισροή q_0 και επιφανειακή εισροή I_τ για κάποιο χρόνο $t > 0$, οπότε θα είναι $q_0 \neq 0$ και $I_\tau \neq 0$. Η ασταθής κατάσταση οφείλεται στην επιφανειακή εισροή I_τ . Τα δεδομένα της περίπτωσης αυτής είναι κατά την ασταθή περίοδο ($I_0 = 0$, $q_0 = 0$ και $I_\tau \neq 0$), οι αριθμητικές τιμές των παραμέτρων

είναι $K=0.5$ m/ημέρα, $S=0.05$, $L=50$ m, $D=3.02$ m, $I_r=0.01$ m/ημέρα και $q_0=0.001$ m/ημέρα. Από τα στοιχεία αυτά προκύπτει ότι, επειδή είναι:

$$h_0^2 - D^2 = \frac{q_0 L^2}{4K} \quad \text{και} \quad h_\infty^2 - D^2 = \frac{(q_0 + I_r) L^2}{4K}$$

θα είναι $h_0=3.22$ m και $h_\infty=4.78$ m. Από τις τιμές αυτές προκύπτει ότι είναι $y_0=0.20$ m και $y_\infty=1.76$ m. Στο Σχήμα 5α παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των τιμών των y_t των αριθμητικών λύσεων της εξίσωσης (2.1) μαζί με τα αποτελέσματα της αναλυτικής λύσης (3.7). Η τιμή του μέσου βάθους $\bar{h} = B$, που χρησιμοποιήθηκε στην εξίσωση (2.1), υπολογίστηκε από τη σχέση $B = D + (y_t + y_\infty) / 4 = 3.51$ m. Στο Σχήμα 5β παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αριθμητικών λύσεων για την παροχή q_t καθώς και της αναλυτικής λύσης που δίνεται από την εξίσωση (3.8).



Σχήμα 5. Έδαφος με $I_0=0$, $q_0 \neq 0$ και $I_r \neq 0$ (α) Μεταβολή της y_t σε (άνυψωση υπόγειας στάθμης), (β) Ένταση της στραγγιζόμενης παροχής q_t (αυξανόμενη παροχή στράγγισης).

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή μελετήθηκε η στράγγιση ενός εδάφους που δέχεται επιφανειακές επαναπληρώσεις από βροχόπτωση ή άρδευση, διαφορετικές κατά τη σταθερή και την ασταθή περίοδο και στο οποίο μέσα από ένα ημιδιαπερατό υπόστρωμα εισέρχεται επιπρόσθετα και μια σταθερή παροχή επαναπλήρωσης. Παρουσιάζεται η αναλυτική λύση της μη γραμμικής μη ομογενούς μερικής διαφορικής εξίσωσης του Boussinesq, κατάλληλα διαμορφωμένης για να συμπεριλάβει τις παραπάνω παραμέτρους. Διερευνήθηκαν οι πιθανοί συνδυασμοί των παραμέτρων του προβλήματος και η επίδρασή τους στην άνυψωση ή την πτώση της υπόγειας στάθμης του στραγγιζόμενου εδάφους και στη στραγγιζόμενη παροχή. Η συγκριμένη αναλυτική λύση έχει γενική μορφή δίνοντας έτσι τη δυνατότητα να περιγράψει την πλειονότητα των προβλημάτων των στραγγίσεων των εδαφών και είναι πολύ εύκολη στην εφαρμογή της. Τέλος, εξετάστηκαν αριθμητικές

εφαρμογές της αναλυτικής λύσης και συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα αριθμητικών λύσεων, τα οποία και επιβεβαίωσαν την ορθότητά της.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Dumm, L.D., 1954. *New formula for determining depth and spacing of subsurface drains in irrigated lands*. Agricultural Engineering, 35: 726-730.
- Karamouzis, D., Zissis, T. and Terzidis, G., 1988. *Non-dimensional diagrams for unsteady drainage problems with or without recharge*. Agricultural Water Management, 13: 145-156.
- Karamouzis, D.N. and Teloglou, E.S., 1993. *Drainage of soils recharged from underlying semi-confined aquifers*. Water Resources Management, 7: 153-168.
- Karamouzis, D.N., 1991. *Unsteady drainage problems for soils laying on semi-confined aquifers*. Advances in water resources technology, (Editor G. Tsakiris), Published for Ecowarm, A.A. Balkema, Rotterdam, 225-234.
- Krajenhof van de Leur, D.A., 1958. *A study of non-steady groundwater flow with special reference to a reservoir-coefficient*. De Ingenieur, 40: 87-94.
- Maasland, M., 1959. *Water table fluctuation induced by intrermittent recharge*. Journal of Geophysical Research, 64: 549-559.
- Marino, M., 1974a. *Rise and decline of the water table induced by vertical recharge*. Journal of Hydrology, 23: 289-298.
- Marino, M., 1974b. *Water-table fluctuation in response to recharge* Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 100: 117-125.
- Teloglou, I.S., Zissis, T.S. and Karamouzis, D.N., 1998. *Water table fluctuation in soils overlying semi-confined aquifers in response to time-varying replenishment*. Journal of Hydrology, 202: 78-94.
- Terzidis, G., 1968. *Failling water table between tile drains*. Discussion, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 94: 159-165.
- van Beers, W.F.J., 1969. *Einige nomogramme fur die Berechnung von Dran-und Grabenabstanden*. Int. Inst. fur Landgewinnung und Kulturtechnik, Wageningen.
- Wesseling, J., 1974. *Subsurface flow into drains*. Chapter 8 in Drainage Principles and Applications II. Theory of Field Drainage and Watershed Runoff, Int. Inst. Land Reclamation and Improvement, Wageningen, The Netherlands.
- Ζήσης, Θ., 2001. *Αριθμητικές λύσεις προβλημάτων στράγγισης*. Μονογραφία, Θεσσαλονίκη.
- Ζήσης, Θ., Καλαϊτζίδου-Πάϊκου, Ν. και Καραμούζης, Δ., 1995. *Ασταθής στράγγιση πάνω από ένα ημίκλειστο υδροφορέα σε περιοδικά πλημμυρισμένο στραγγιστικό δίκτυο*. Πρακτικά 6^{ου} Συνεδρίου Ε.Υ.Ε., Θεσσαλονίκη, 473-481.
- Καραμούζης, Δ., 2012. *Στραγγίσεις εδαφών*. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη (υπό εκτύπωση).
- Τερζίδης, Γ. και Καραμούζης, Δ., 1986. *Στραγγίσεις γεωργικών εδαφών*. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.

**ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΡΔΕΥΤΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΜΕ ΤΗ ΒΟΗΘΕΙΑ ΤΟΥ
ΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ – ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ
ΑΡΔΕΥΤΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ ΤΟΥ Τ.Ο.Ε.Β. ΠΗΝΕΙΟΥ
Μ. Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη¹, Χ. Τζιμόπουλος², Β. Γιουβάνης¹**

¹Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Σχολή Γεωπονικών Επιστημών, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής & Αγροτικού περιβάλλοντος, 38446, Ν. Ιωνία, Βόλος.
e-mail: msak@uth.gr, vgiouvannis@uth.gr

²Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Πολυτεχνική Σχολή, Εργαστήριο Υδραυλικών Έργων και Διαχείρισης Περιβάλλοντος, Τμήμα Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών, 54124, Θεσσαλονίκη. e-mail: tzimop@eng.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός αυτής της έρευνας είναι η βέλτιστη οικονομική οργάνωση της γεωργικής παραγωγής, περιορίζοντας στο ελάχιστο τη χρήση των διαθέσιμων υδατικών πόρων. Για την έρευνα αυτή επιλέχτηκε η περιοχή του Τ.Ο.Ε.Β. Πηνειού και για τη βελτιστοποίηση της γεωργικής παραγωγής χρησιμοποιείται η μέθοδος του Γραμμικού Προγραμματισμού. Τα αποτελέσματα οδηγούν στην αναδιάρθρωση των καλλιεργειών και πιο συγκεκριμένα στην επιλογή της μονοκαλλιέργειας (της Βιομ. Τομάτας), με το οικονομικό κέρδος να αυξάνεται έως και 511,8% και η εξοικονόμηση νερού να φτάνει το 30%. Βεβαίως το σενάριο αυτό είναι υποθετικό, διότι προϋποθέτει ότι το προϊόν αυτό μπορεί να απορροφηθεί από τις αγορές. Για το λόγο αυτό, η έρευνα συνεχίζεται με εφαρμογή της μεθόδου της πολυκριτηριακής ανάλυσης με επιλογή εναλλακτικών σεναρίων για τον προσδιορισμό της σχετικά βέλτιστης λύσης.

**LINEAR PROGRAMMING APPLICATION FOR IRRIGATION
NETWORK MANAGEMENT - IMPLEMENTATION OF THE
IRRIGATION NETWORK REGION OF PINIOS**

M. Sakellariou-Makrantonaki¹, C. Tzimopoulos², V. Giouvanis¹

¹University of Thessaly, School of Agriculture Science, Dept. of Agriculture, Crop Production and Rural Environment, Fytokou Str., 38446 Nea Ionia, Volos, Greece. E-mail: msak@uth.gr, vgiouvannis@uth.gr

²Department of Transportation and Hydraulic Engineering, School of Rural & Surveying Engineering, Faculty of Engineering, A.U.TH., Thessaloniki 54124, Greece. E-mail: tzimop@eng.auth.gr

ABSTRACT

The aim of this project is the optimal economic organization of agricultural production and the minimizing use of available water resources. The study area was the irrigation network region of Pinios and the linear programming method was used to optimize the agricultural production. The Results showed the restructuring of crops by selecting only one crop (the industrial tomato), with the economic profit to rise up to 511.8% and water saving to reach 30%. Certainly this scenario is hypothetical because it assumes that this product can be absorbed by the markets. To continue this research a step further, a multi-criteria analysis will be used to estimate the optimal solution, using alternative scenarios.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η άρδευση στην Ελλάδα και διεθνώς καταναλώνει τη μεγαλύτερη ποσότητα νερού, σε σχέση με τις άλλες χρήσεις του, που κυμαίνεται από 70~80%. Οι αρδευόμενες εκτάσεις του πλανήτη αν και καταλαμβάνουν το 17% περίπου των καλλιεργούμενων εκτάσεων, καταναλώνουν το 70% περίπου των παγκοσμίων αποθεμάτων νερού (Wolff, 1999, FAO, 2007).

Η κάλυψη της αυξανόμενης ζήτησης νερού προς άρδευση μας φέρνει αντιμέτωπους με το λογικό δίλημμα: ή θα πρέπει να εξευρεθούν νέες πηγές (π.χ. με την κατασκευή φραγμάτων, ταμιευτήρων, με εκτροπές ποταμών, με ανόρυξη νέων γεωτρήσεων, εργοστασίων αφαλάτωσης κ.λ.π.) ή οι απαιτούμενες ποσότητες θα εξοικονομηθούν μέσω αποδοτικότερης χρήσης των υπαρχόντων υδατικών πόρων. Είναι φανερό είτε με περιβαλλοντικούς, είτε με οικονομικούς όρους πως η υιοθέτηση πρακτικών εξοικονόμησης είναι συμφερότερη της «δημιουργίας» νέων πόρων (George et al., 2000). Από τη γεωργική πρακτική μπορούν να εξοικονομηθούν μέσω του ορθολογικού προγραμματισμού των αρδεύσεων σημαντικές ποσότητες.

Η εφαρμογή των μαθηματικών μεθόδων στην ανάλυση και οργάνωση των τεχνικοοικονομικών μονάδων (κλάδων γεωργικής παραγωγής, εκμεταλλεύσεων, γεωργικών περιοχών) αποτελεί το σπουδαιότερο χαρακτηριστικό της Γεωργικής Οικονομικής Έρευνας των τελευταίων ετών (Κιτσοπανίδης, 1998).

Μεταξύ των μαθηματικών μεθόδων, που έχουν χρησιμοποιηθεί πολύ την τελευταία κυρίως εικοσαετία στην οργάνωση της γεωργικής παραγωγής, εξέχουσα θέση έχουν οι διάφορες μέθοδοι του Μαθηματικού Προγραμματισμού, που επιτρέπουν τη συστηματική και ορθολογιστική οργάνωση και αναδιοργάνωση των τεχνικοοικονομικών μονάδων (Μπαλιώτη, 2009).

Ο Μαθηματικός Προγραμματισμός είναι κλάδος των εφαρμοσμένων μαθηματικών που ασχολείται με την εύρεση της βέλτιστης τιμής (μέγιστο ή ελάχιστο) πραγματικών συναρτήσεων κάτω από ορισμένες συνθήκες (Μπότσαρης κ.α., 2004).

Για την έρευνα αυτή, εφαρμόστηκε το μοντέλο του γραμμικού προγραμματισμού και επιλέχθηκε η περιοχή του Τοπικού Οργανισμού Εγγείων Βελτιώσεων (Τ.Ο.Ε.Β.) Πηνειού (≈150.000στρ.), που αποτελεί αντιπροσωπευτικό κομμάτι της ευρύτερης Θεσσαλικής πεδιάδας και τα αποτελέσματα της έρευνας μπορούν να συμβάλλουν στη διαμόρφωση της συνολικής ακαθάριστης αξίας παραγωγής της περιοχής.

Σκοπός της παρούσας διατριβής είναι η βέλτιστη οικονομική οργάνωση της γεωργικής παραγωγής, περιορίζοντας στο ελάχιστο τη χρήση των διαθέσιμων υδατικών πόρων. Ο σκοπός αυτός δύναται να επιτευχθεί με συνδυασμό της οικονομικής επιστήμης και της υδρολογίας για την ανάπτυξη της κατάλληλης μεθοδολογίας. Το αποτέλεσμα που προκύπτει αποτελεί ένα εργαλείο που, χρησιμοποιούμενο από ένα συλλογικό φορέα, θα βοηθήσει στον ορθολογικό προγραμματισμό των αρδεύσεων εξοικονομώντας μεγάλες ποσότητες νερού.

2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Ο ΤΟΕΒ Πηνειού, με περίπου 3.000 μέλη (αρδευτές), έχει μία αρδευσιμη έκταση, όσο αναφορά τα χρόνια μελέτης της περιοχής (2001 – 2010), περίπου ίση με 150.000 στρέμματα. Από αυτή, τα 125.000 στρέμματα περίπου καταλαμβάνονται από αρδευόμενες καλλιέργειες, περίπου 10.000 στρ. κάθε χρόνο καταλαμβάνουν οι ξερικές καλλιέργειες (κυρίως σιτάρι), και η υπόλοιπη είναι χέρσα και εκτάσεις σε αγρανάπαυση (πηγή: ΤΟΕΒ Πηνειού).

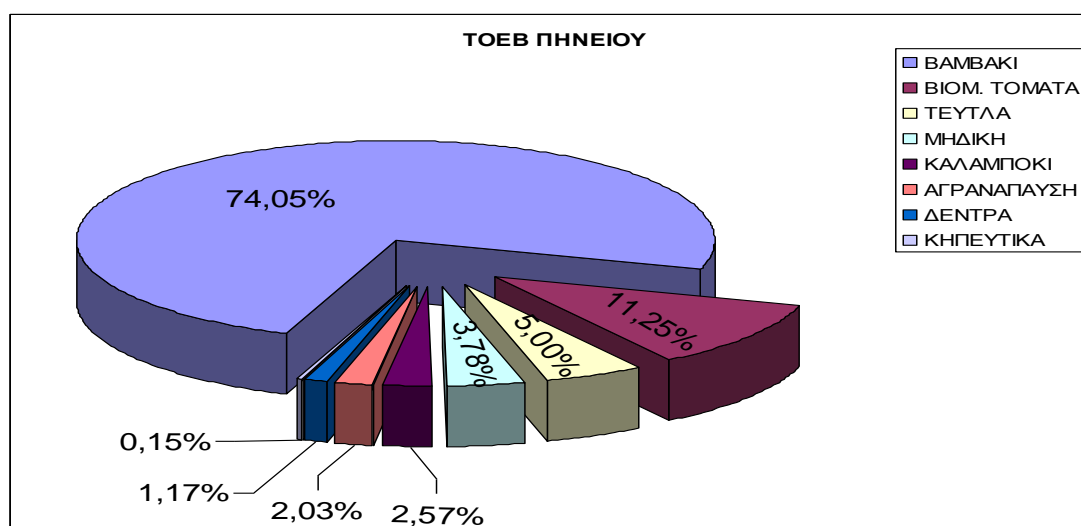
Παρακάτω θα παρουσιαστούν αναλυτικά τα στοιχεία του Τ.Ο.Ε.Β. Πηνηιού (δεδομένα) που χρησιμοποιήθηκαν για την εφαρμογή του μοντέλου του γραμμικού προγραμματισμού.

2.1 ΑΝΑΛΥΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΟΕΒ ΠΗΝΕΙΟΥ

2.1.1 Αρδευόμενες Εκτάσεις Καλλιεργειών

Στο αρδευτικό δίκτυο του ΤΟΕΒ Πηνηιού, που όπως προείπαμε αποτελεί αντιπροσωπευτικό κομμάτι της ευρύτερης Θεσσαλικής πεδιάδας, συναντώνται κυρίως 7 καλλιεργούμενα είδη, που η ποσοστιαία αναλογία τους παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.

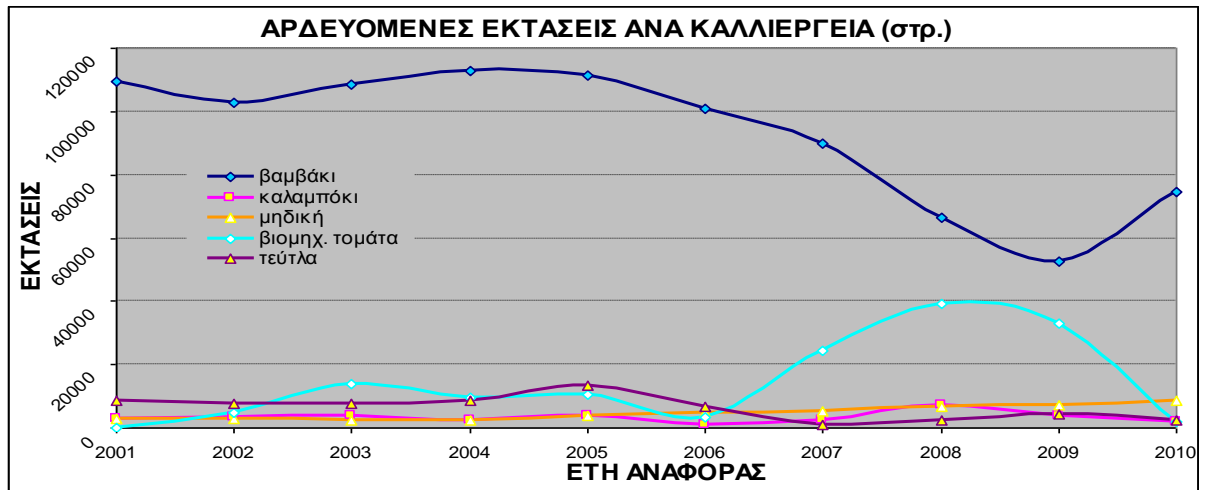
Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα δεδομένα και τα αποτελέσματα των υπολογισμών που θα παρουσιαστούν παρακάτω, αποτελούν έρευνα από πραγματικά στοιχεία της υπό μελέτη περιοχής για την 10ετία αναφοράς και έχουν προκύψει από στοιχεία που συγκεντρώθηκαν από: α) την Δ/ση Αγροτικής Ανάπτυξης Λάρισας, β) τον ΤΟΕΒ Πηνηιού, γ) την Ένωση Γεωργικών Συνεταιρισμών Λάρισας και δ) από προσωπικές συνεντεύξεις με παραγωγούς της περιοχής.



Σχήμα 1. Μέσος όρος 10ετίας μελέτης της ποσοστιαίας αναλογίας των καλλιεργούμενων ειδών στον ΤΟΕΒ Πηνηιού (Πηγή: ΤΟΕΒ Πηνηιού).

Τα δεδομένα μιας 10ετίας (περίοδος 2001-2010), παρουσιάζουν μία αρδευθείσα έκταση 125.000στρ. περίπου, στην οποία παρατηρούνται κυρίως οι εξής καλλιέργειες: α) βαμβάκι, β) βιομηχανική ντομάτα, γ) τεύτλα, δ) μηδική και ε) καλαμπόκι. Με αυτές λοιπόν τις 5 καλλιέργειες θα ασχοληθούμε, μιας και οι υπόλοιπες δύο συναντώνται σε πολύ μικρά ποσοστά, μικρότερα και από το μέσο όρο της 10ετίας του ποσοστού αγρανάπαυσης (Σχήμα 1).

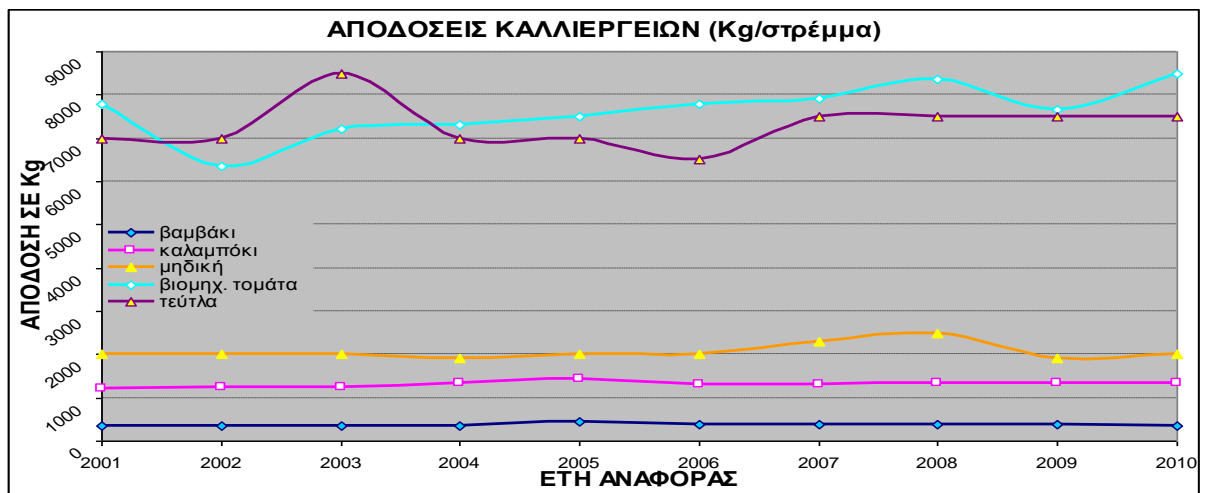
Οι αρδευόμενες εκτάσεις των παραπάνω καλλιεργειών (σε στρέμματα) παρουσιάζονται αναλυτικά στο Σχήμα 2. Παρατηρούμε, όπως και στο Σχήμα 1, την μεγάλη υπεροχή της καλλιέργειας του βαμβακιού που καταλαμβάνει σχεδόν τα $\frac{3}{4}$ της έκτασης του αρδευτικού δικτύου, φαινόμενο που παρατηρείτε και στο σύνολο του θεσσαλικού κάμπου. Αυτό που μας κάνει εδώ εντύπωση είναι, που στα τέλη της δεκαετίας παρατηρείτε μία μείωση της καλλιέργειας του βαμβακιού με παράλληλη αύξηση της βιομηχανικής τομάτας, που όπως θα αποδειχθεί παρακάτω είναι μία πολύ σωστή επιλογή.



Σχήμα 2. Αρδευόμενες εκτάσεις ανά καλλιέργεια για την 10ετία αναφοράς (Πηγή: ΤΟΕΒ Πηγειού).

2.1.2 Αποδόσεις Καλλιεργειών

Στο Σχήμα 3 παρουσιάζονται οι αποδόσεις των καλλιεργειών μελέτης μας (σε Kg/στρ). Με εξαίρεση τις καλλιέργειες της βιομηχανικής τομάτας και των τεύτλων που η απόδοσή τους ανά στρέμμα έχει μια σημαντική διακύμανση από χρονιά σε χρονιά, οι υπόλοιπες καλλιέργειες παρουσιάζουν μια ομοιομορφία στην απόδοσή τους. Η απόδοση των τεύτλων και της βιομηχανικής τομάτας αγγίζει τους 8,5 τόνους, το βαμβάκι δίνει σταθερά 300 με 350 Kg., το καλαμπόκι 1,2 έως 1,5 τόνους και η απόδοση της μηδικής κυμαίνεται από 1,9 έως 2,5 τόνων ανά στρέμμα.

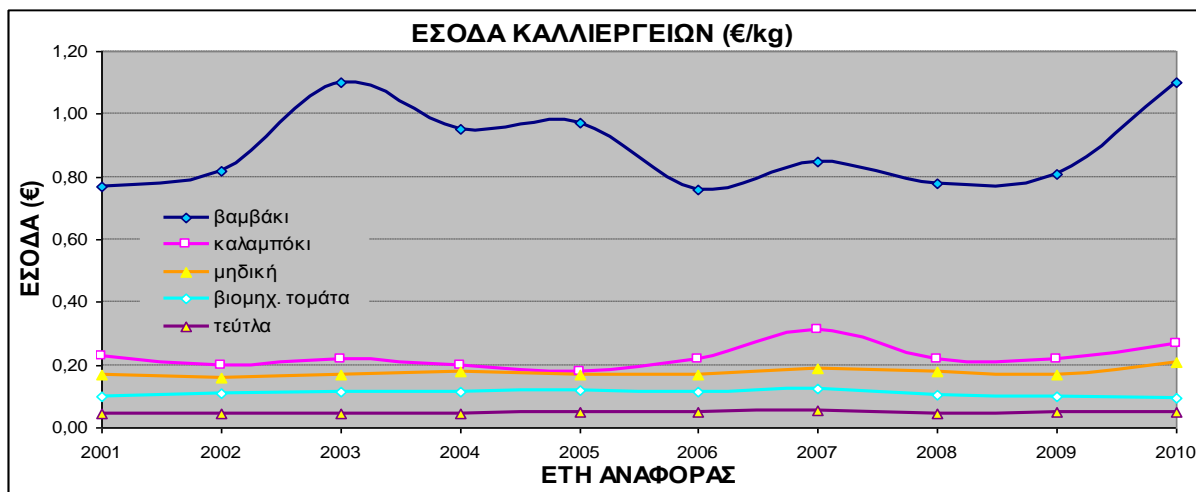


Σχήμα 3. Αποδόσεις σε Kg/στρ. ανά καλλιέργεια για την 10ετία αναφοράς (Πηγή: ΤΟΕΒ Πηγειού).

2.1.3 Έσοδα Καλλιεργειών

Ως έσοδα ανά κιλό παραγωγής (Σχήμα 4), ορίστηκαν τα κοινά στοιχεία εσόδων για όλες τις καλλιέργειες που ήταν: α) τιμή πώλησης ανά κιλό παραγωγής, β) επιδοτήσεις εκφρασμένες ανά κιλό παραγωγής και γ) επιστροφές Φ.Π.Α. ανά κιλό πώλησης. Η πηγή πληροφόρησης αυτών των στοιχείων ήταν το Δικτύο Γεωργικής Λογιστικής Πληροφόρησης (ΔΙ.ΓΕ.Λ.Π.) ή γνωστό σε κοινοτικό επίπεδο ως RICA

(Reseau d' Information Comptable Agricole) της Ε.Ε. με βάση τον Κανονισμό (ΕΚ) 79/65 και προσωπικών συνεντεύξεων με τους παραγωγούς της περιοχής μελέτης.



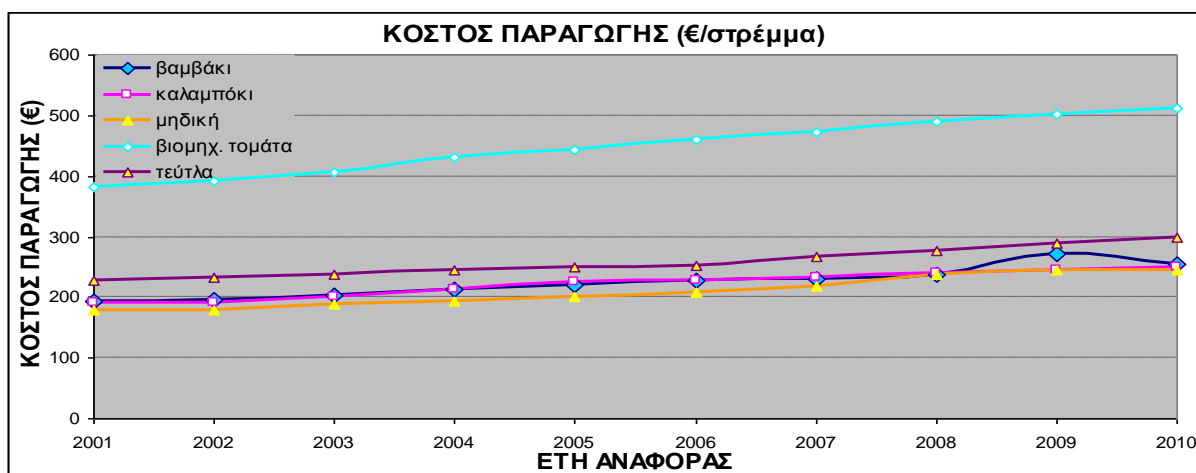
Σχήμα 4. Έσοδα σε €/kg ανά καλλιέργεια για την 10ετία αναφοράς.

Οι αποδόσεις των καλλιεργειών σε κιλά/στρ. πολλαπλασιασμένες με τα αντίστοιχα έσοδα ανά κιλό παραγωγής (σε €), μας δίνουν την συνολική ακαθάριστη πρόσοδο της παραγωγής εκφρασμένη σε €/στρ. (Παπαναγιώτου Ε. κ.α., 1999).

2.1.4 Κόστος Παραγωγής Αγροτικών Προϊόντων

Στο Σχήμα 5 παρουσιάζονται τα κόστη παραγωγής των πέντε κύριων καλλιεργειών του ΤΟΕΒ Πηγειού, όπως προέκυψαν μετά από υπολογισμό σύμφωνα με το πρόγραμμα ΚΟΠΑΠ (Κόστος Παραγωγής Αγροτικών Προϊόντων) (Χρησιτίδης κ.α., 1988) χρησιμοποιώντας στοιχεία από το πρόγραμμα ΔΙ.Γ.Ε.Λ.Π., που συνεχίζει να εφαρμόζεται έως και σήμερα, και χρησιμοποιώντας στοιχεία από προσωπικές συνεντεύξεις με παραγωγούς τις περιοχής.

Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι το κόστος παραγωγής των αγροτικών προϊόντων υπολογίστηκε ανά στρέμμα και στο “χωράφι”, αυτό σημαίνει ότι δεν υπολογίστηκαν ως έξοδα τα όποια μεταφορικά του προϊόντος παραγωγής στα σημεία διάθεσής του.



Σχήμα 5. Κόστος Παραγωγής σε €/στρ. ανά καλλιέργεια για την 10ετία αναφοράς.

Παρατηρούμε (Σχήμα 5), την ομοιόμορφη αλλά συνεχώς αυξανόμενη, όπως είναι φυσικό, αύξηση του κόστους παραγωγής των αγροτικών προϊόντων από χρονιά σε χρονιά που οφείλετε κυρίως λόγω της αύξησης της τιμής του DIESEL, όλων των αναλώσιμων που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή προϊόντος (φυτοπροστατευτικά, λιπάσματα, κλπ.), του ημερομισθίου των εργατών, η τιμή της γης και των κατ' αποκοπή εργασιών.

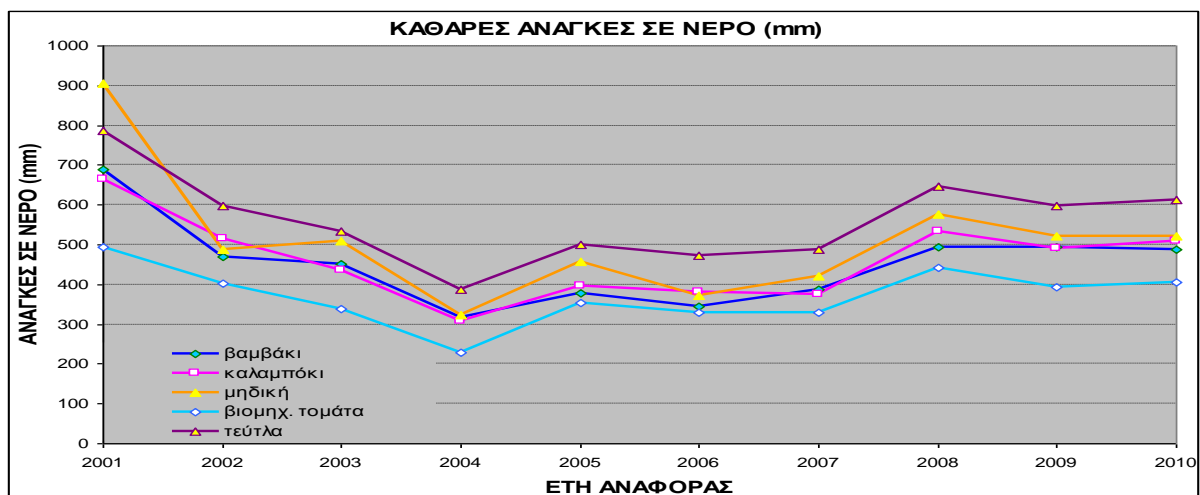
2.1.5 Εδαφολογική Ανάλυση

Για την εφαρμογή του μοντέλου είναι σκόπιμο να ελέγξουμε τα εδαφολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης μας και να ορίσουμε, αν αυτό χρειάζεται, περιορισμούς όσο αναφορά την καταλληλότητα του εδάφους για κάθε καλλιέργεια. Σύμφωνα λοιπόν με την εδαφολογική μελέτη για τη συγκεκριμένη περιοχή, του Εθνικού Ιδρύματος Αγροτικής Έρευνας του Ινστιτούτου Χαρτογράφησης και Ταξινόμησης Εδαφών Λάρισας (Ι.Χ.Τ.Ε.Λ./ ΕΘ.Ι.ΑΓ.Ε. 1990), μπορούμε να αποφανθούμε θετικά για την καταλληλότητα του εδάφους να φιλοξενήσει όλες τις καλλιέργειες της περιοχής μας.

2.1.6 Υδατικές Ανάγκες των καλλιεργειών

Οι ανάγκες των καλλιεργειών σε νερό προσδιορίζονται από την πραγματική εξατμισοδιαπνοή ΕΤc, για τον υπολογισμό της οποίας από το σύνολο των μεθόδων (Penman, Penman - Monteith, κ.λ.π., (Theocharis, 2009)) χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Penman – Monteith κατά FAO, που επιλέχθηκε ως η καλύτερη μέθοδος υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής, σε σχέση με τις άλλες έμμεσες μεθόδους υπολογισμού κυρίως λόγω του ότι είναι πιο ακριβής (Bos, G.M.et al. 2009, Allen, G.R. et al. 1998, Παπαζαφειρίου, 1999), με τη χρήση του προγράμματος CropWat v.8.0 και παρουσιάζονται στο Σχήμα 6 (FAO, 2009).

Παρατηρούμε μία συνεχή διακύμανση στις απαιτήσεις των καλλιεργειών σε αρδευτικό νερό από χρονιά σε χρονιά, πράγμα απολύτως φυσιολογικό λόγω τις διακύμανσης των μετεωρολογικών φαινομένων για κάθε χρονιά. Όμως αυτό που πρέπει να τονιστεί εδώ είναι η ομοιομορφία στις αρδευτικές ανάγκες της κάθε καλλιέργειας σε σχέση με τις υπόλοιπες για κάθε χρονιά. Αυτό πρακτικά σημαίνει, όπως και ήταν αναμενόμενο, πως σχεδόν σταθερά κάποιες καλλιέργειες έχουν μεγαλύτερες αρδευτικές απαιτήσεις από τις υπόλοιπες που μελετάμε, και το αντίστροφο.



Σχήμα 6. Καθαρές Ανάγκες σε νερό ανά καλλιέργεια για την 10ετία αναφοράς

Για την καλλιέργεια του βαμβακιού απαιτούνται λοιπόν κατά μέσο όρο 450mm αρδευτικού νερού, για το καλαμπόκι 470mm, για τη μηδική 510mm, για τη βιομηχανική τομάτα 370mm και για την καλλιέργεια των τεύτλων 560mm. Αξιοσημείωτο εδώ, είναι οι μικρές απαιτήσεις σε αρδευτικό νερό, για την περιοχή μελέτης, της καλλιέργειας της βιομηχανικής τομάτας.

3. ΜΟΝΤΕΛΟ ΟΡΓΑΝΩΣΗΣ ΤΗΣ ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

3.1 ΜΟΝΤΕΛΟ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ

Με τη χρησιμοποίηση των μαθηματικών μεθόδων στην οργάνωση της γεωργικής παραγωγής είναι δυνατή η εύρεση ορθολογιστικών λύσεων: α) στα προβλήματα της κατανομής των διαθέσιμων συντελεστών παραγωγής τόσο σε επίπεδο εκμετάλλευσης, όσο και στον ευρύτερο γεωργικό χώρο, β) της ανταγωνιστικότητας των γεωργικών προϊόντων που επηρεάζουν αποφασιστικά το γεωργικό και συνεπώς το εθνικό εισόδημα, γ) γενικότερα της οικονομικής πολιτικής, με τον προγραμματισμό της γεωργικής παραγωγής μιας χώρας, δ) της εύρεσης γενικής ισόρροπης ανάπτυξης του αγροτικού τομέα, ε) της αξιολόγησης γεωργικών επενδύσεων κ.λ.π. (Chavez – Morales et al., 1987, Salman et al., 2001).

Το προτεινόμενο μοντέλο γραμμικού προγραμματισμού καταλήγει στην εύρεση της βέλτιστης διάταξης καλλιεργειών (ποσοστιαία αναλογία) με σκοπό τη μεγιστοποίηση των ωφελειών (οικονομικά) για τον παραγωγό και τη βέλτιστη διαχείριση του διαθέσιμου αρδευτικού νερού. Παρόμοια μοντέλα εφαρμόστηκαν και στις περιοχές Σονόρα του Μεξικού (Chavez- Morales et al., 1987), σε τοποθεσία της Βόρειας Ταϊλάνδης (Anongrit et al., 2008), στη λεκάνη του ποταμού Τίναο στο Νεπάλ (Gurta and Pauydal, 1990) και στο αρδευτικό δίκτυο Γέφυρας (ΤΟΕΒ Αγ. Αθανασίου) στην περιοχή της Θεσσαλονίκης (Τζιμόπουλος κ.α., 2011). Η αντικειμενική συνάρτηση του μοντέλου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εποχιακό σχεδιασμό και περιγράφεται ως εξής (Anongrit et al., 2008):

$$\text{Max } Z_j = \sum_{k=1}^K (Y_k P_k - C_k) X_{jk} \quad (3.1)$$

Z_j = ακαθάριστο κέρδος κατά την χρονική περίοδο του έτους j

j= έτος αναφοράς

k= είδος καλλιέργειας (k= 1,2,3...K)

Y_k = απόδοση της καλλιέργειας k (kg/στρ.)

P_k = η τιμή της καλλιέργειας k (€/kg)

C_k = κόστος παραγωγής της καλλιέργειας k (€/στρ.)

X_{kj} = αρδευόμενη έκταση της καλλιέργειας k την εποχή j (στρ.)

Οι περιορισμοί του μοντέλου είναι τριών κατηγοριών: I) οι περιορισμοί νερού, II) οι περιορισμοί εδάφους και οι περιορισμοί μη αρνητικότητας (Singh et al.,2001).

I) Περιορισμοί νερού

Ο περιορισμός αυτός περιγράφει την απαίτηση για λιγότερο νερό από αυτό που ήδη καταναλώνεται στο δίκτυο, δηλαδή:

$$\sum_{k=1}^K \sigma_{jk} X_{jk} \leq Vd_j \quad (3.2)$$

όπου: σ_{jk} = απαιτήσεις σε νερό της σοδειάς k, την εποχή j (mm/στρ.),

Vd_j =συνολική κατανάλωση νερού του αρδευτικού συστήματος την εποχή j,

II) Περιορισμοί εδάφους

Το σύνολο της έκτασης όλων των καλλιεργειών δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερο από τη συνολική επιφάνεια του δικτύου για την εποχή j , δηλαδή:

$$\sum_{k=1}^K X_{kj} \leq T_j \quad (3.3)$$

όπου T_j η συνολική επιφάνεια του δικτύου.

III) Περιορισμοί μη αρνητικότητας

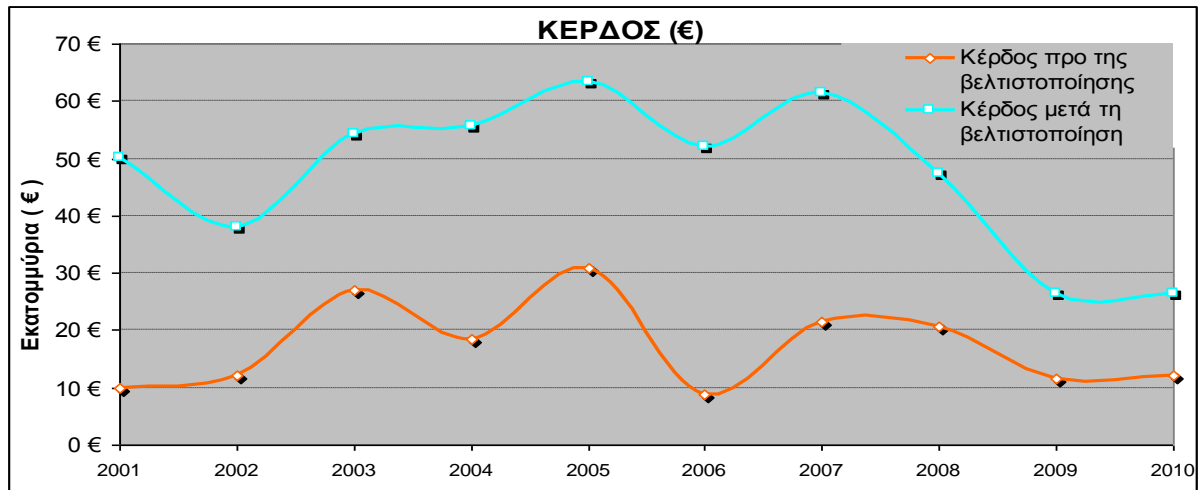
$$X_{jk} \geq 0 \quad (3.4)$$

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η δημιουργία και εκτέλεση του προγράμματος έγινε σε περιβάλλον Microsoft Excel με τη βοήθεια της «εντολής» της «επίλυσης – solver». Η «επίλυση» είναι μέρος μιας ακολουθίας εντολών που ορισμένες φορές ονομάζονται εργαλεία υποθετικής ανάλυσης. Με την «επίλυση», μπορεί να βρεθεί η βέλτιστη τιμή για έναν τύπο. Λειτουργεί με μια ομάδα κελιών, τα οποία σχετίζονται είτε άμεσα, είτε έμμεσα με τον τύπο του κελιού προορισμού και μπορούν να εφαρμοστούν περιορισμοί που τίθενται σε ένα ζήτημα επίλυσης.

Τα δεδομένα εισαγωγής στο μοντέλο είναι η απόδοση της καλλιέργειας, η τιμή του προϊόντος της καλλιέργειας, το κόστος παραγωγής της και το σύνολο της αρδευόμενης έκτασης. Ως μεταβλητές θεωρούνται οι επί μέρους εκτάσεις που καταλαμβάνουν οι καλλιέργειες.

Οι περιορισμοί που λήφθηκαν υπόψη αφορούν τις υδατικές ανάγκες των καλλιεργειών και την συνολική τους έκταση. Δηλαδή, εκτός από τον περιορισμό μη αρνητικότητας, έπρεπε στο βελτιστοποιημένο σενάριο να μεγιστοποιείτε το κέρδος των παραγωγών της περιοχής μελέτης, έχοντας καταλάβει οι καλλιέργειες ως μέγιστη έκταση το σύνολο της έκτασης του αρδευτικού δικτύου και έχοντας καταναλώσει (αρδευτικές ανάγκες) μικρότερη ποσότητα νερού από αυτή που καταναλώναν προ της βελτιστοποίησης.



Σχήμα 7. Οικονομικό κέρδος κατά την υφιστάμενη και την προτεινόμενη κατάσταση.

Από οικονομικής σκοπιάς το κέρδος υπολογίζεται περί τα 47.500.000€ ανά έτος όπως εμφανίζεται και στο Σχήμα 7., ενώ εξοικονομούνται κατά μέσο όρο περί τα 10.000.000m³ νερού ετησίως (Πίνακας 1).

Πίνακας 1. Νερό που χορηγείται στο δίκτυο κατά την υφιστάμενη και την προτεινόμενη κατάσταση.

Έτος	Νερό που χορηγείται στο δίκτυο		Εξοικονόμηση ύδατος (m ³)	Εξοικονόμηση ύδατος (%)
	προ της βελτιστοποίησης (m ³)	μετά τη βελτιστοποίηση (m ³)		
2001	87.032.547,6	61.389.257,4	25.643.290,20	29,46%
2002	57.961.078,4	49.089.608,25	8.871.470,10	15,31%
2003	60.888.522,1	46.279.600,00	14.608.922,10	23,99%
2004	43.060.079,6	31.278.465,60	11.781.614,00	27,36%
2005	55.850.945,9	50.456.909,30	5.394.036,55	9,66%
2006	41.214.925,3	38.620.577,50	2.594.347,80	6,29%
2007	46.500.900,6	40.639.767,25	5.861.133,35	12,60%
2008	59.372.979,4	53.837.137,20	5.535.842,20	9,32%
2009	47.125.585,2	39.787.912,60	7.337.672,60	15,57%
2010	43.940.290,0	36.137.155,95	7.803.134,00	17,76%
M.O.	54.294.785	44.751.639	9.543.146	16,73%

Η καλλιέργεια της βιομηχανικής τομάτας θεωρείται η περισσότερο αποδοτική (μεγαλύτερο οικονομικό όφελος για τον παραγωγό) και σε συνδυασμό ότι καταναλώνει και το λιγότερο νερό σε σχέση με τις υπόλοιπες καλλιέργειες της μελέτης μας, είναι το μόνο φυτό για το οποίο προτείνεται αύξηση της έκτασης που καταλαμβάνει. Βεβαίως το σενάριο αυτό είναι υποθετικό, διότι δεν είναι δυνατό μία έκταση 150.000 στρ. να καλλιεργηθεί μόνο με ντομάτα και να προκύπτει παραγωγή σε ετήσια βάση 1.145.250 τόνους. Τούτο προϋποθέτει ότι το προϊόν αυτό μπορεί:

α) Να απορροφηθεί σε γειτονικές αγορές ή αγορές του εξωτερικού. Επομένως προϋποθέτει τη βασική οργάνωση της διάθεσης του προϊόντος αυτού, που δεν υπάρχει.

β) Τη δημιουργία βιομηχανικής υποδομής για επεξεργασία προϊόντων από την ντομάτα και στη συνέχεια διάθεσης του προϊόντος, που επίσης δεν υπάρχουν.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σύμφωνα με όσα εξετέθησαν παραπάνω, το αποτέλεσμα του Γραμμικού Προγραμματισμού, όσο αφορά την αναδιάρθρωση των καλλιεργειών του αρδευτικού μας δικτύου (διαχείριση αρδευτικού δικτύου) με σκοπό το μέγιστο οικονομικό όφελος για τους παραγωγούς της περιοχής και σύγχρονος τη βέλτιστη διαχείριση των υδατικών πόρων, οδήγησε στη λύση της μονοκαλλιέργειας που όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, δεν δύναται να πραγματοποιηθεί παρά μόνο εάν ληφθούν μέτρα ώστε η αγορά να είναι σε θέση να απορροφήσει το συγκεκριμένο προϊόν (Βιομηχανική Τομάτα). Το οικονομικό κέρδος κατά τη λύση αυτή υπολογίστηκε κατά μέσο όρο σε 47.500.000€, αύξηση περί του 308% και εξοικονόμηση υδάτων περί του 17%.

Για το λόγο αυτό θα πρέπει να δημιουργηθούν νέα σενάρια με περισσότερους περιορισμούς, π.χ. ποσοστά συμμετοχής καλλιεργειών, για την εύρεση της βέλτιστης ρεαλιστικής λύσης.

Τη λύση σε αυτό το πρόβλημα, δηλαδή την δημιουργία νέων σεναρίων για την εύρεση της βέλτιστης ρεαλιστικής λύσης, έρχεται να δώσει η εφαρμογή της μεθόδου της πολυκριτηριακής ανάλυσης.

Έτσι, η έρευνα συνεχίζεται στο επόμενο στάδιο της, με εφαρμογή της μεθόδου της πολυκριτηριακής ανάλυσης με επιλογή εναλλακτικών σεναρίων για τον προσδιορισμό της σχετικά βέλτιστης λύσης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Allen, G.R., Pereira, S.L., Dirk, R. and Martin, S. 1998. *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56*, FAO Rome. pp. 1-194.
- Anongrit K., P. Anujit, C. Chavalit, 2008. *Optimization Model for Irrigation Planning in Heterogenous Area*. Journal of Applied Sciences. Vol. 8, Issue: 4, 666-671.
- Bos, G.M., Kselik, L.A.R., Allen, G.R. and Molden, J.D. 2009. *Water Requirements for Irrigation and the Environment*. Springer, Dordrecht, ISBN 978-1-4020-8947-3. pp. 13-142.
- Chavez – Morales, J., E. Holzapfel, M. Marino, 1987. *Planning model of irrigation district*. Vol. 113, No 4, 549-564
- FAO 2009. *CROPWAT 8.0 has been developed by Joss Swennenhuis for the Water Resources Development and Management Service of FAO*. Procedures, algorithms and documentation were developed and/or tested by Martin Smith, Gerardo Van Halsema, Florent Maraux, Gabriella Izzi, Robina Wahaj and Giovanni Munoz. http://www.fao.org/nr/water/infores_databases_cropwat.html
- FAO, 2007. *Coping with water scarcity. Challenge of the 21st century*. Available on line: <http://www.fao.org/nr/water/docs/escarcity.pdf>
- George, B.A., Shende, S.A. and N.S. Raghuwanshi, 2000. *Development and testing of an irrigation scheduling model*. Agric. Water Manage., 46, 121–136 pp.
- Gupta, A., Paudyal, G., 1990. *Planning model of irrigation district*. Vol. 116, No 2, 273-298.
- Salman A.Z., Al-Krablieh E.K. and Fisher F.M., 2001. *An inter- seasonal agricultural water allocation system (SAWAS)*. Agricultural Systems 68: 233-252.

- Singh D.K., Jaiswal C.S., Reddy K.S., Singh R.M. and Bhandarkar D.M., 2001, *Optimal cropping pattern in a canal command area*. Agriculture Water Management 50: 1-8.
- Theocharis M., 2009. *A computer system of estimating reference crop evapotranspiration using the modified Penman's method*. Proc. EWRA 7th Water Resources Conservancy and Risk Reduction Under Climatic Instability, pp.215-222, Limassol, Cyprus
- Wolff, P., 1999. *On the sustainability of water use*. Natural Resources and Development, 49/50, Tübingen, 9–28 pp.
- Εθνικό Ίδρυμα Αγροτικής Έρευνας και Ινστιτούτο Χαρτογράφησης και Ταξινόμησης Εδαφών Λάρισας 1990. *Εδαφολογική Μελέτη Βορίου Τμήματος Ζώνης Ζ – Έργων Εκτροπής Αχελώου*. Λάρισα 1990
- Κιτσοπανίδης, Γ., 1998. *Γεωργική οικονομική έρευνα*. Εκδόσεις Ζήτη.
- Μπαλιώτη Β. 2009. *Διαχείριση αρδευτικών Δικτύων με τη Βοήθεια του Γραμμικού Προγραμματισμού – Εφαρμογή στο Αρδευτικό Δίκτυο Γέφυρας*. Μεταπτυχιακή Διατριβή. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών. Θεσσαλονίκη 2009. σελ 44.
- Μπότσαρης Χ., Τσάντας Ν. και Γεωργίου Α., 2004. *Σημειώσεις Γραμμικού προγραμματισμού*. Πρόγραμμα Σπουδών: Διοίκηση Επιχειρήσεων και Οργανισμών. Θεματική Ενότητα: ΔΕΟ-13- Ποσοτικές Μέθοδοι. σελ 3.
- Παπαζαφειρίου, Γ.Ζ. 1999. *Οι ανάγκες των καλλιεργειών σε νερό*. Εκδόσεις ΖΗΤΗ. Θεσσαλονίκη. σελ. 347.
- Παπαναγιώτου. Ε., Φωτόπουλος Χρ., Ανδρεάκος, Ι. και Ευλιάτου -Μπαρόνου, Σ., 1999, «*Η εξέλιξη του κόστους παραγωγής αγροτικών προϊόντων φυτικής προέλευσης (1983 -1991)*», ISBN: 960-86160-4-2, Εκδοσεις: ΕΘΙΑΓΕ, σελ. 238
- Τζιμόπουλος Χ., Μπαλιώτη Β., Ευαγγελίδης Χ. και Γιαννόπουλος Σ. 2011. *Διαχείριση Αρδευτικών Δικτύων με τη Βοήθεια του Γραμμικού Προγραμματισμού – Εφαρμογή στο Αρδευτικό Δίκτυο Γέφυρας (Περιοχή Αγίου Αθανασίου)*. Πρακτικά 7ο Πανελλήνιο Συνέδριο της Εταιρείας Γεωργικών Μηχανικών Ελλάδος. Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών . Αθήνα, Νοεμβρίου 2011, (4-1-61).
- Χρηστίδης Χ., Ανδεάκου Ι. και Γκιζιάκη Ε., 1988. *Πρόγραμμα Κόστους Παραγωγής Αγροτικών Προϊόντων*. Υπουργείο Γεωργίας, Αθήνα 1988.

ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΑΡΔΕΥΣΗΣ

**Μ. Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, Χ. Τζιμόπουλος, Χ. Νάκας, Ε.
Καρατάσιου, Χ. Παπανικολάου**

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τμήμα Γεωπονίας, Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος
Εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής, E-mail: msak@uth.gr, Τηλ. 2421093059

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Πραγματοποιήθηκε έρευνα που αφορούσε την επίδραση διαφορετικών μεθόδων αυτόματης άρδευσης στη παραγωγή βιομάζας από την καλλιέργεια του ενεργειακού φυτού ηλίανθου. Οργανώθηκαν τέσσερις μεταχειρίσεις: η επιφανειακή στάγδην άρδευση στην οποία εφαρμόστηκε η μέθοδος του εξατμισόμετρου τύπου Α για τον προγραμματισμό των αρδεύσεων (ΑΕ), η επιφανειακή στάγδην άρδευση στην οποία εφαρμόστηκε η μέθοδος Penman – Monteith (P-M) και η επιφανειακή (AUTO(E)) και υπόγεια (AUTO(Y)) στάγδην άρδευση, στις οποίες η άρδευση προγραμματίζεται βάσει του αυτόματου εξατμισόμετρου. Η δόση άρδευσης που εφαρμόστηκε σε όλες τις μεταχειρίσεις ήταν ίση με το 100% των αναγκών της καλλιέργειας. Τα αποτελέσματα έδειξαν υπεροχή της επιφανειακής στάγδην άρδευσης με τη χρήση του εξατμισόμετρου τύπου Α.

COMPARATIVE ANALYSIS OF AUTOMATED IRRIGATION METHODS

**M. Sakellariou-Makrntonaki, Ch. Tzimopoulos, Ch. Nakas, E. Karatasiou,
Ch. Papanikolaou**

University of Thessaly

School of Agricultural Sciences, Dept. of Agriculture, Crop Production and Rural
Environment, Volos, E – mail: msak@uth.gr, Tel: 2421093059

ABSTRACT

A research was contacted in order to study the effect of different automatic irrigation methods in biomass production by cultivating the energy plant sunflower. Four treatments were organized: surface drip irrigation by using the method of evaporation pan class A (AE), surface drip irrigation using the method Penman – Monteith (P.-M.) and surface (AUTO(E)) and subsurface (AUTO(Y)) drip irrigation, where the irrigation was scheduled by automated evaporation pan. The amount of water was equal to the 100% of crop needs, for al treatments. The results showed that surface drip irrigation (AE) was superior.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Έχει καταστεί πλέον επιτακτική η ανάγκη χρήσης εναλλακτικών πηγών ενέργειας εξαιτίας της συνεχούς αύξησης του κόστους των ορυκτών καυσίμων, της εξάντλησης των αποθεμάτων τους, αλλά και της ρύπανσης του περιβάλλοντος, που προκαλείται από την καύση τους. Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας καλούνται να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στο συνεχώς μεταβαλλόμενο γεωπολιτικό χάρτη της ενέργειας (Κίττας κ.α., 2007), διότι αφενός μεν δεν εμφανίζουν τον κίνδυνο εξάντλησης, αφετέρου δε είναι φιλικές προς το περιβάλλον. Εκτός από τις ευρέως γνωστές ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (π.χ. αιολική, ηλιακή, κ.λ.π.) ιδιαίτερο ενδιαφέρον σήμερα συγκεντρώνουν και τα ενεργειακά φυτά, τα οποία συγκαταλέγονται σε αυτές.

Οι «ενεργειακές καλλιέργειες» είναι καλλιεργούμενα ή αυτοφυή είδη, παραδοσιακά ή νέα, τα οποία παράγουν βιομάζα ως κύριο προϊόν που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για διάφορους ενεργειακούς σκοπούς (Κούγιας Π., 2010). Με τον όρο βιομάζα χαρακτηρίζεται κάθε υλικό που προέρχεται από ζώντες ή πρόσφατα αποθανόντες φυτικούς και ζωικούς οργανισμούς (Biomass Energy Center, 2007). Η βιομάζα χρησιμοποιείται για ενεργειακούς σκοπούς όπως η παραγωγή βιοαερίου, βιοντίζελ, αιθανόλης, πετρελαίου, μεθανόλης, κ.λ.π. Ως «ενεργειακές» θεωρούνται και οι παραδοσιακές καλλιέργειες, των οποίων το τελικό προϊόν θα χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ενέργειας και βιοκαυσίμων. Τέτοιου είδους καλλιέργειες θεωρούνται το κριθάρι, το σιτάρι, τα ζαχαρότευτλα και ο ηλιάνθος, όταν χρησιμοποιούνται για την παραγωγή βιοκαυσίμων. Οι «νέες» ενεργειακές καλλιέργειες είναι είδη με υψηλή παραγωγικότητα σε βιομάζα ανά μονάδα γης και αναφέρονται σε δύο κύριες κατηγορίες τις γεωργικές και τις δασικές. Οι γεωργικές ενεργειακές καλλιέργειες διακρίνονται περαιτέρω σε ετήσιες και πολυετείς (Μανιός, 2007). Κατά τους Johanson et al. (1993), το 2020 θα είναι δυνατό να καλύπτεται το 38% των παγκόσμιων ενεργειακών απαιτήσεων σε ηλεκτρική ενέργεια.

Για την παραγωγή βιομάζας μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορα φυτικά είδη. Στην Ελλάδα, εξαιτίας των ευνοϊκών κλιματικών συνθηκών, πολλές καλλιέργειες προσφέρονται για την ενεργειακή αξιοποίηση τους και δίνουν υψηλές στρεμματικές αποδόσεις. Ο ηλιάνθος ο ετήσιος (*Helianthus annuus* L.) ανήκει στην οικογένεια των Compositae και στα αποκλειστικώς ελαιοδοτικά φυτά. Για την Ελλάδα το σπουδαιότερο ελαιοδοτικό φυτό είναι η ελιά που παράγει το απaráμιλλο ελαιόλαδο. Με την οικονομική ενίσχυση όμως των σπορέλαιων από την Ε.Ε. ενισχύθηκε και στη χώρα μας η ανταγωνιστικότητα άλλων ελαιούχων φυτών όπως ο ηλιάνθος (Γαλανοπούλου – Σενδουκά, 2002). Ο ηλιάνθος είναι ανθεκτικός στην ξηρασία επειδή έχει βαθύ ριζικό σύστημα. Τις μεγαλύτερες απαιτήσεις σε νερό έχει από την έκφυση των ταξιανθιών ως την άνθηση (Σφήκας, 1988). Μελέτες που έχουν γίνει, όπως αυτή των Danalatos et al. (2008), δείχνουν ότι οι υψηλές αποδόσεις της καλλιέργειας του ηλιάνθου μπορούν να επιτευχθούν στα ελληνικά εδάφη με την ελάχιστη εισροή αζώτου και λίγη συμπληρωματική άρδευση σε κρίσιμα στάδια ανάπτυξης. Στην Ελλάδα, ο ηλιάνθος καλλιεργείται κυρίως ως πηγή φυτικού ελαίου διατροφής, συνήθως ως μη αρδευόμενη καλλιέργεια σε αμειψισπορά με σιτηρά. Τα τελευταία χρόνια και μετά την έκδοση της οδηγίας 2003/30/EC της Ευρωπαϊκής Ένωσης σχετικά με την προώθηση των βιοκαυσίμων και άλλων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για τις μεταφορές, σκοπός της καλλιέργειας ηλιάνθου είναι και η παραγωγή βιοντίζελ (Κούντριας, 2011). Μεταξύ αυτών συγκαταλέγεται και η οδηγία 30/2003 της Ευρωπαϊκής Επιτροπής σύμφωνα με την οποία μέχρι το έτος 2020 το 10% των καυσίμων που καταναλώνονται στις μεταφορές θα πρέπει να παράγονται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Sakellariou – Makrantonaki et al, 2007).

Από τα παραπάνω προκύπτει το συμπέρασμα ότι η καλλιέργεια του ηλίανθου θα πρέπει πλέον να θεωρείται μία από τις πολλά υποσχόμενες ενεργειακές καλλιέργειες για μελλοντική χρήση υπό τις ελληνικές συνθήκες. Για το σκοπό αυτό κρίθηκε αναγκαία η μελέτη της επίδρασης διαφορετικών μεθόδων άρδευσης, επιφανειακής και υπόγειας στάγδην άρδευσης, στην ανάπτυξη και παραγωγή βιομάζας του ηλίανθου, καθώς και στην εξοικονόμηση νερού. Επιπροσθέτως, μελετήθηκε η εφαρμογή αυτοματοποιημένων συστημάτων άρδευσης στον αγρό. Σκοπό της μελέτης αυτής αποτελεί η μεγιστοποίηση της ενεργειακής ωφέλειας από την καλλιέργεια του ενεργειακού φυτού ηλίανθου, με σύγχρονα αρδευτικά συστήματα.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Για την επίτευξη του παραπάνω στόχου διενεργήθηκε έρευνα από το Εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, στην περιοχή του Βελεστίνου Μαγνησίας, κατά το έτος 2011. Το πειραματικό σχέδιο που χρησιμοποιήθηκε ήταν Πλήρως Τυχαιοποιημένων Ομάδων και περιελάμβανε τέσσερις μεταχειρίσεις, με τέσσερις επαναλήψεις. Οργανώθηκαν οι εξής τέσσερις μεταχειρίσεις: α) η επιφανειακή στάγδην άρδευση, στην οποία εφαρμόστηκε η μέθοδος του εξατμισίμετρου τύπου Α για τον προγραμματισμό των αρδεύσεων (Α.Ε.), β) η επιφανειακή στάγδην άρδευση στην οποία για τον προγραμματισμό της άρδευσης εφαρμόστηκε η μέθοδος Penman – Monteith (P.-M.), γ) η επιφανειακή στάγδην άρδευση στην οποία ο προγραμματισμός των αρδεύσεων προγραμματίστηκε βάσει του αυτόματου εξατμισίμετρου (AUTO(E)) και δ) η υπόγεια στάγδην άρδευση στην οποία ο προγραμματισμός των αρδεύσεων προγραμματίστηκε βάσει του αυτόματου εξατμισίμετρου (AUTO(Y)). Η δόση άρδευσης που εφαρμόστηκε σε όλες τις μεταχειρίσεις ήταν ίση με το 100% των αναγκών σε νερό της καλλιέργειας. Σε όλες τις μεταχειρίσεις οι μέθοδοι άρδευσης που χρησιμοποιήθηκαν ήταν αυτοματοποιημένες, εκτός της επιφανειακής στάγδην άρδευσης στην οποία για τον προγραμματισμό των αρδεύσεων χρησιμοποιήθηκε το εξατμισίμετρο τύπου Α και της επιφανειακής στάγδην άρδευσης στην οποία ο προγραμματισμός των αρδεύσεων βασίστηκε στη μέθοδο Penman – Monteith. Στην παρούσα έρευνα, στη μεταχείριση Α.Ε. χρησιμοποιήθηκε ο συντελεστής εξατμισίμετρου τύπου Α k_p 0,7, ενώ στη μεταχείριση P. – M. χρησιμοποιήθηκε ο φυτικός συντελεστής για την καλλιέργεια του ηλίανθου k_c 0,35 για το αρχικό και τελικό στάδιο ανάπτυξης της καλλιέργειας και 1,15 για το στάδιο πλήρους ανάπτυξης.

Το επιφανειακό δίκτυο εφαρμογής περιελάμβανε σταλακτηφόρους σωλήνες από πολυαιθυλένιο διαμέτρου 20 mm, οι οποίοι απείχαν μεταξύ τους 1,60 m. Κάθε σταλακτηφόρος αγωγός περιελάμβανε αυτοκαθαριζόμενους και αυτορυθμιζόμενους σταλακτήρες με ισαποχή 0,8m και η παροχή κάθε σταλάκτη ήταν 2,3 l/h. Ο ίδιος τύπος σταλακτηφόρου σωλήνα χρησιμοποιήθηκε και στο υπόγειο σύστημα στάγδην άρδευσης και τοποθετήθηκε σε βάθος 45cm από την επιφάνεια του εδάφους, με ειδικό υπεδαφοθέτη. Επιπροσθέτως, το υπόγειο δίκτυο περιελάμβανε και φίλτρο δίσκων εμβλαπτισμένων στην ουσία trifluralin για την προστασία του συστήματος από εισχώρηση ριζών κατά τη διακοπή της άρδευσης.

Η μηχανική σύσταση του εδάφους του αγρού, όπως προέκυψε από τη σχετική ανάλυση είναι: άμμος 48%, άργιλος 23% και ιλύς 29%. Το Ph του εδάφους είναι 7,8 και η οργανική ουσία 0,97% (Μήτσιος κ.α., 2000). Οι φυσικές εδαφικές παράμετροι του πειραματικού αγροτεμαχίου παρουσιάζονται και στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1: Φυσικές εδαφικές παράμετροι του πειραματικού αγροτεμαχίου.

ΣΗΜΕΙΟ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ	ΒΑΘΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ cm	ΥΔΑΤΟΪΚΑΝΟΤΗΤΑ (% v/v)	ΣΗΜΕΙΟ ΜΟΝΙΜΗΣ ΜΑΡΑΝΣΗΣ (% v/v)
1	0-30	38,8	21,9
1	30-60	40,2	22,0
2	0-30	38,8	21,1
2	30-60	40,9	21,7

Κάθε πειραματικό τεμάχιο είχε συνολική έκταση 56 m² και περιελάμβανε 6 γραμμές, με αποστάσεις μεταξύ των γραμμών 0,8 m και επί της γραμμής περίπου 12 cm. Οι καλλιεργητικές τεχνικές ήταν ίδιες για όλες τις μεταχειρίσεις και σύμφωνες με τη γενικότερη καλλιεργητική πρακτική που εφαρμόζεται στην περιοχή. Η σπορά πραγματοποιήθηκε στις 12 Απριλίου 2011, με σπαρτική μηχανή γραμμικών καλλιεργειών τεσσάρων σπαρτικών μονάδων. Η ποικιλία ηλιάνθου που χρησιμοποιήθηκε ήταν η PR64A63 της PIONEER, σε ποσότητα 0,89Kg/στρ. Κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου 2011 πραγματοποιήθηκε μετασπαρτική και προφυτρωτική χημική ζιζανιοκτονία, με την εφαρμογή του ζιζανιοκτόνου STOMP σε ποσότητα 350 gr/στρ., ενώ δεν πραγματοποιήθηκε λίπανση.

Στην επιφανειακή στάγδην άρδευση στην οποία ο προγραμματισμός της άρδευσης βασίστηκε στο αυτόματο εξατμισόμετρο χρησιμοποιήθηκε ένας αισθητήρας μέτρησης στάθμης νερού από τον οποίο λαμβάνονταν οι ημερήσιες τιμές εξάτμισης αυτόματα. Χρησιμοποιήθηκαν δύο Data loggers από τους οποίους ένας κατέγραφε την εξάτμιση από το εξατμισόμετρο και ο δεύτερος την ημερήσια εξατμισοδιαπνοή. Με το data logger καθορίζονταν η έναρξη και η λήξη της άρδευσης μέσω ηλεκτροβάννας. Η άρδευση πραγματοποιούνταν όταν συνολικά συγκεντρώνονταν 30mm εξάτμισης.

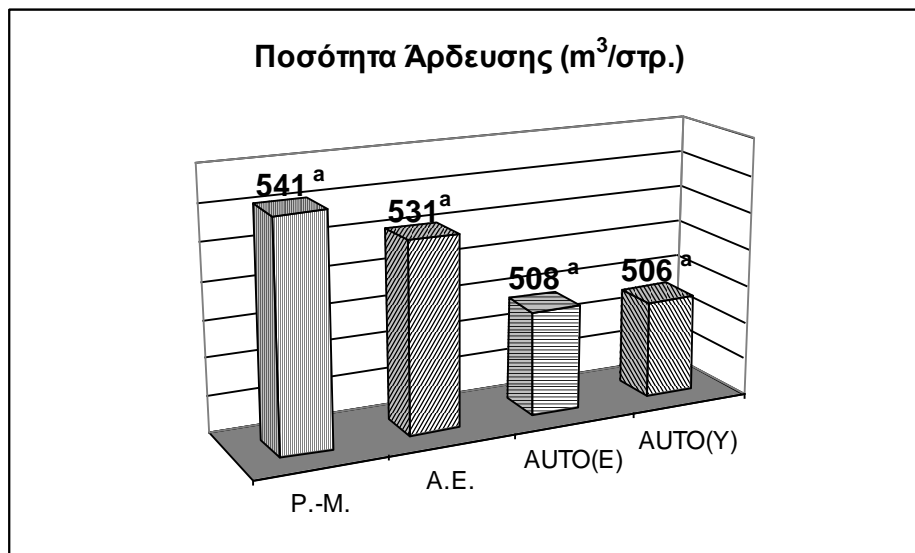
Σε απόσταση 50m από τον πειραματικό αγρό βρίσκεται τοποθετημένος αυτόματος μετεωρολογικός σταθμός, από τον οποίο συλλέγονταν τα μετεωρολογικά στοιχεία της περιοχής (βροχόπτωση, σχετική υγρασία, ηλιοφάνεια, θερμοκρασία αέρα, κ.λ.π.). Για την επεξεργασία όλων των δεδομένων της παρούσας έρευνας χρησιμοποιήθηκε το στατιστικό πακέτο SPSS version 18. Η στατιστική επεξεργασία πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο ανάλυσης της παραλλακτικότητας (ANOVA) για επίπεδο σημαντικότητας 0,05 και η κατάταξη των μέσων όρων έγινε με την εφαρμογή του πολλαπλού τεστ Duncan (Montgomery,1999) όπως παρουσιάζεται και στους Πίνακες 2 - 5.

Κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου 2011 πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις της εξέλιξης του ύψους φυτών, της διαμέτρου των ταξιανθιών, του δείκτη φυλλικής επιφάνειας και της παραγωγής ξηρής βιομάζας. Οι μετρήσεις αυτές ήταν εβδομαδιαίες και λαμβάνονταν από τις δύο μεσαίες γραμμές σποράς κάθε πειραματικού τεμαχίου (plot), για την αποφυγή αλληλεπιδράσεων από γειτονικές γραμμές σποράς και γειτονικά πειραματικά τεμάχια. Η ξήρανση της χλωρής βιομάζας γινόταν σε ειδικό πυριαντήριο, σε θερμοκρασία 80 °C για 48 ώρες. Τα αποτελέσματα της διαμέτρου κεφαλών, του δείκτη φυλλικής επιφάνειας και της παραγωγής ξηρής βιομάζας είναι προγραμματισμένο να δοθούν σε επόμενες δημοσιεύσεις.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Η μεγαλύτερη ποσότητα αρδευτικού νερού εφαρμόσθηκε στη μεταχείριση επιφανειακής στάγδην άρδευσης στην οποία χρησιμοποιήθηκε για τον προγραμματισμό των αρδεύσεων η μέθοδος Penman – Monteith. Η σχεδόν ίδια ποσότητα αρδευτικού

νερού που εφαρμόστηκε στις μεταχειρίσεις P. – M. και A.E. πιθανώς να οφείλεται στο γεγονός ότι οι φυτικοί συντελεστές k_c που χρησιμοποιήθηκαν στο πρόγραμμα άρδευσης και ήταν ίδιοι για όλες τις μεθόδους, καθώς και η τιμή του συντελεστή εξατμισιμέτρου k_p ήταν αρκετά καλά εναρμονισμένες με τις κλιματολογικές παραμέτρους του περιβάλλοντος διεξαγωγής της έρευνας. Να σημειωθεί ότι δεν προέκυψε στατιστικώς σημαντική διαφορά μεταξύ των μεταχειρίσεων ως προς την ποσότητα του νερού που εφαρμόστηκε για άρδευση. Ενώ, η μικρότερη ποσότητα αρδευτικού νερού εφαρμόστηκε στην υπόγεια στάγδην άρδευση, στην οποία ο προγραμματισμός των αρδεύσεων πραγματοποιήθηκε βάσει του αυτόματου εξατμισιμέτρου και παράλληλα η συγκεκριμένη μέθοδος εμφάνισε τη μεγαλύτερη εξοικονόμηση νερού (6,5%) σύμφωνα με το Σχήμα 1. Το γεγονός αυτό ίσως να οφείλεται στις μειωμένες απώλειες από εξάτμιση και επιφανειακή απορροή. Στο ίδιο σχήμα συμπεριλαμβάνονται η ποσότητα στάγδην άρδευσης που εφαρμόστηκε σε κάθε μεταχείριση σε όλη την διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου, καθώς και η άρδευση με καταιονισμό (30mm) που πραγματοποιήθηκε μετά τη σπορά και τη χημική ζιζανιοκτονία.



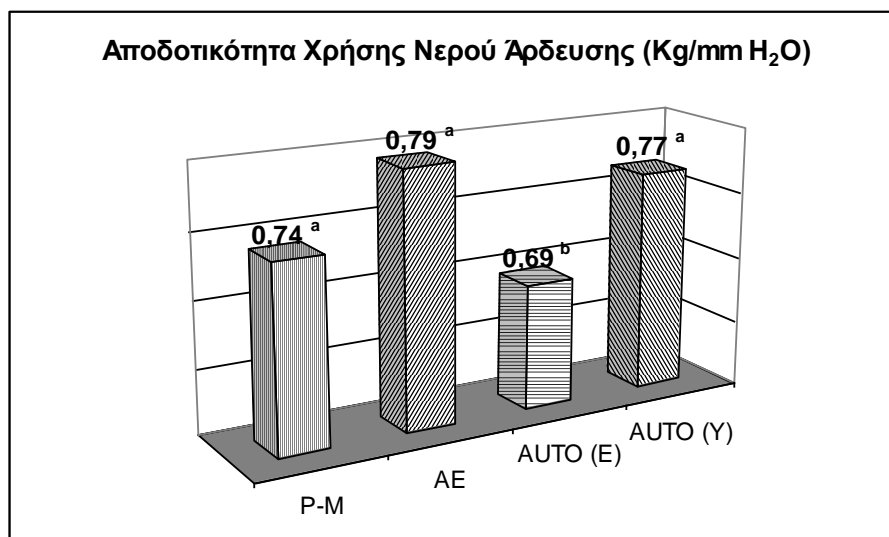
Σχήμα 1: Ποσότητα νερού που εφαρμόστηκε κατά την άρδευση.

Πίνακας 2: Αποτελέσματα στατιστικής επεξεργασίας της ποσότητας νερού που εφαρμόστηκε για άρδευση, με τη μέθοδο της παραλλακτικότητας (ANOVA).

Multiple Comparisons

Dependent Variable: nero

(I) V1	(J) V1	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
1	2	10,227500	20,275530	,623	-33,94908	54,40408
	3	39,138500	20,275530	,078	-5,03808	83,31508
	4	30,277500	20,275530	,161	-13,89908	74,45408
2	1	-10,227500	20,275530	,623	-54,40408	33,94908
	3	28,911000	20,275530	,179	-15,26558	73,08758
	4	20,050000	20,275530	,342	-24,12658	64,22658
3	1	-39,138500	20,275530	,078	-83,31508	5,03808
	2	-28,911000	20,275530	,179	-73,08758	15,26558
	4	-8,861000	20,275530	,670	-53,03758	35,31558
4	1	-30,277500	20,275530	,161	-74,45408	13,89908
	2	-20,050000	20,275530	,342	-64,22658	24,12658
	3	8,861000	20,275530	,670	-35,31558	53,03758



Σχήμα 2: Αποδοτικότητα χρήσης νερού άρδευσης.

Πίνακας 3: Αποτελέσματα στατιστικής επεξεργασίας της αποδοτικότητας χρήσης νερού άρδευσης, με τη μέθοδο της παραλλακτικότητας (ANOVA).**Multiple Comparisons**

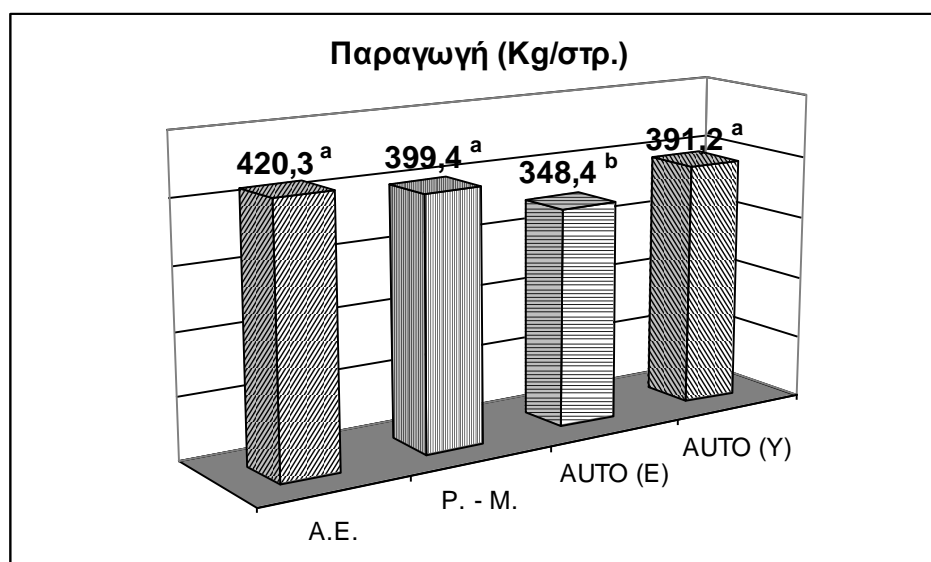
Dependent Variable:wue

(I) V1	(J) V1	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
1	2	-,05275	,03718	,181	-,1337	,0282
	3	,04609	,03718	,239	-,0349	,1271
	4	-,02581	,03718	,501	-,1068	,0552
2	1	,05275	,03718	,181	-,0282	,1337
	3	,09884*	,03718	,021	,0178	,1798
	4	,02694	,03718	,483	-,0541	,1079
3	1	-,04609	,03718	,239	-,1271	,0349
	2	-,09884*	,03718	,021	-,1798	-,0178
	4	-,07190	,03718	,077	-,1529	,0091
4	1	,02581	,03718	,501	-,0552	,1068
	2	-,02694	,03718	,483	-,1079	,0541
	3	,07190	,03718	,077	-,0091	,1529

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

Κατά τους Howell et al. (1990) η αποδοτικότητα της χρήσης νερού άρδευσης είναι ο λόγος της συνολικής παραγωγής προς το συνολικό νερό άρδευσης. Από τις συγκεκριμένες μεθόδους άρδευσης, η επιφανειακή στάγδην άρδευση στην οποία ο προγραμματισμός των αρδεύσεων πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του εξατμισιμέτρου τύπου A όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2 παρουσίασε την υψηλότερη αποδοτικότητα χρήσης του αρδευτικού νερού (0,79 Kg/mm H₂O). Επιπλέον, μεταξύ των επιφανειακών μεθόδων στάγδην άρδευσης στις οποίες χρησιμοποιήθηκαν για τον προγραμματισμό των αρδεύσεων το εξατμισίμετρο τύπου A και το αυτόματο εξατμισίμετρο παρουσιάστηκε στατιστικώς σημαντική διαφορά ως προς την αποδοτικότητα της χρήσης του νερού άρδευσης. Η μικρότερη αποδοτικότητα της AUTO (E) σε σχέση με την AE ίσως οφείλεται στην παραγωγή που παρουσιάζουν, η οποία πιθανώς να οφείλεται στην τυχαιότητα του δείγματος.

Στην επιφανειακή στάγδην άρδευση κατά την οποία ο προγραμματισμός της άρδευσης πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του εξατμισιμέτρου τύπου A παρατηρήθηκε η υψηλότερη παραγωγή (420,3 Kg/στρ.) όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3. Η επιφανειακή στάγδην άρδευση στην οποία εφαρμόστηκε για τον προγραμματισμό των αρδεύσεων το αυτόματο εξατμισίμετρο παρουσίασε στατιστικώς σημαντική διαφορά σε σχέση με τις υπόλοιπες. Επιπλέον, μεταξύ των μεθόδων άρδευσης στις οποίες χρησιμοποιήθηκε το αυτόματο εξατμισίμετρο, η υπόγεια ήταν εκείνη που παρουσίασε την υψηλότερη παραγωγή ίσως λόγω των μειωμένων απωλειών εξάτμισης και απορροής.



Σχήμα 3: Παραγωγή ανά μεταχείριση.

Πίνακας 4: Αποτελέσματα στατιστικής επεξεργασίας της παραγωγής με τη μέθοδο της παραλλακτικότητας (ANOVA).

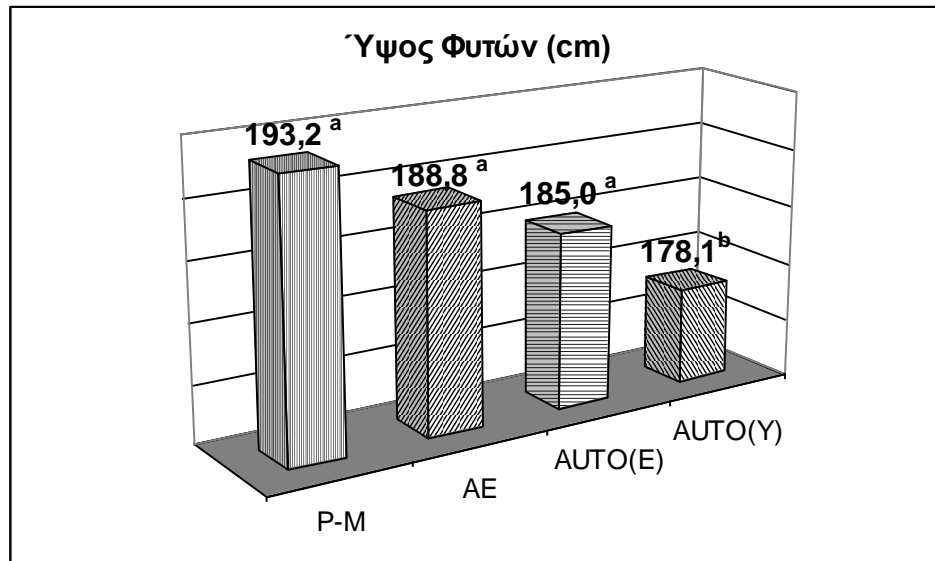
Multiple Comparisons

Dependent Variable:paragogh

(I) V1	(J) V1	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
1	2	-20,8563	15,4613	,202	-54,543	12,831
	3	50,9812*	15,4613	,006	17,294	84,668
	4	8,2437	15,4613	,604	-25,443	41,931
2	1	20,8563	15,4613	,202	-12,831	54,543
	3	71,8375*	15,4613	,001	38,150	105,525
	4	29,1000	15,4613	,084	-4,587	62,787
3	1	-50,9812*	15,4613	,006	-84,668	-17,294
	2	-71,8375*	15,4613	,001	-105,525	-38,150
	4	-42,7375*	15,4613	,017	-76,425	-9,050
4	1	-8,2437	15,4613	,604	-41,931	25,443
	2	-29,1000	15,4613	,084	-62,787	4,587
	3	42,7375*	15,4613	,017	9,050	76,425

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

Ως προς το ύψος της καλλιέργειας παρατηρείται μία τάση υπεροχής της P. – M., η οποία παρουσιάζει και στατιστικώς σημαντική διαφορά με την μεταχείριση AUTO (Y), όπως φαίνεται και στο σχήμα 4. Πιθανή αιτία αυτού, ίσως να αποτελεί είτε η μεγαλύτερη ποσότητα νερού που εφαρμόστηκε στην P. – M., είτε στην τυχαιότητα του δείγματος.



Σχήμα 4: Ύψος φυτών ηλίανθου (cm) ανά μεταχείριση.

Πίνακας 5: Αποτελέσματα στατιστικής επεξεργασίας του ύψους των φυτών με τη μέθοδο της παραλλακτικότητας (ANOVA).

Multiple Comparisons

Dependent Variable: ypsos

(I) V1	(J) V1	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
1	2	4,4500	5,4805	,433	-7,491	16,391
	3	8,2500	5,4805	,158	-3,691	20,191
	4	15,0750*	5,4805	,018	3,134	27,016
2	1	-4,4500	5,4805	,433	-16,391	7,491
	3	3,8000	5,4805	,501	-8,141	15,741
	4	10,6250	5,4805	,076	-1,316	22,566
3	1	-8,2500	5,4805	,158	-20,191	3,691
	2	-3,8000	5,4805	,501	-15,741	8,141
	4	6,8250	5,4805	,237	-5,116	18,766
4	1	-15,0750*	5,4805	,018	-27,016	-3,134
	2	-10,6250	5,4805	,076	-22,566	1,316
	3	-6,8250	5,4805	,237	-18,766	5,116

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Κατά το πρώτο πειραματικό στάδιο της παρούσας έρευνας χρησιμοποιήθηκαν τρεις διαφορετικές αυτοματοποιημένες μέθοδοι στάγδην άρδευσης (P. – M., AUTO (E) και AUTO(Y)). Με τη χρήση των μεθόδων αυτών κατέστη δυνατή η άρδευση των αντίστοιχων πειραματικών τεμαχίων εξ αποστάσεως. Κατά συνέπεια μπορεί να ισχυριστεί κανείς ότι με τη χρήση των μεθόδων αυτών μειώνονται οι μετακινήσεις των παραγωγών προς και από τα αγροτεμάχια τους. Αποτέλεσμα των μειωμένων

μετακινήσεων αποτελούν οι λιγότερες εργατοώρες για την άρδευση της εκάστοτε καλλιέργειας.

Επιπλέον, με τη χρήση των συγκεκριμένων μεθόδων βελτιστοποιείται η χρήση του νερού, καθώς παρέχεται στην καλλιέργεια τόση ποσότητα νερού, όση ακριβώς απαιτείται για την κάλυψη των αναγκών της. Οπότε, περιορίζεται η σπατάλη νερού, η οποία παρατηρείται όταν εφαρμόζουν οι παραγωγοί την πρακτική όσο περισσότερο νερό παρέχεται στην καλλιέργεια, τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η απόδοση της. Επιπροσθέτως, με αυτές τις αυτοματοποιημένες μεθόδους αποφεύγεται η κατασπατάληση ενέργειας για άρδευση, καθόσον πραγματοποιούνται μόνο οι απαιτούμενες αρδεύσεις.

Το φυτό του ηλιάνθου μπορεί εξ ολοκλήρου να χρησιμοποιηθεί για παραγωγή ενέργειας. Από την κεφαλή μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο σπόρος για την παραγωγή βιοντήζελ (υγρό καύσιμο), ενώ το στέλεχος και τα φύλλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή βιομάζας, πελλέτες, κ.λ.π.

Από τις συγκεκριμένες μεθόδους άρδευσης, η επιφανειακή στάγδην άρδευση στην οποία ο προγραμματισμός των αρδεύσεων πραγματοποιήθηκε βάσει του εξατμισιμέτρου τύπου A παρουσίασε την υψηλότερη αποδοτικότητα χρήσης αρδευτικού νερού (0,79 Kg/mm H₂O).

Η μεταχείριση της επιφανειακής στάγδην άρδευσης στην οποία ο προγραμματισμός των αρδεύσεων έγινε βάσει των ενδείξεων του απλού εξατμισιμέτρου, παρουσίασε την υψηλότερη παραγωγή έναντι των υπολοίπων με στατιστικώς σημαντική διαφορά, αλλά παρουσιάζει και μια τάση υπεροχής στα χαρακτηριστικά ανάπτυξης της καλλιέργειας. Το γεγονός αυτό πιθανόν να οφείλεται σε μια ελαφρώς υψηλότερη παρεχόμενη ποσότητα νερού, καθώς η συγκεκριμένη μέθοδος υστερεί εν συγκρίσει με τις υπόλοιπες σε ακρίβεια, αλλά και στην τυχαιότητα του δείγματος.

Μεταξύ των υπολοίπων μεθόδων η μεγαλύτερη ποσότητα νερού εφαρμόστηκε στην επιφανειακή στάγδην άρδευση της οποίας ο προγραμματισμός έγινε βάσει της μεθόδου Penman – Monteith και στην οποία παρουσιάζεται και η υψηλότερη παραγωγή.

Ο ηλιάνθος αποτελεί μία πολλά υποσχόμενη καλλιέργεια στο πλαίσιο της ενεργειακής γεωργίας και προτείνεται στους παραγωγούς ως εναλλακτική καλλιέργεια απέναντι στις παραδοσιακές. Ειδικότερα, προτείνεται η καλλιέργειά του όταν αρδεύεται με συστήματα στάγδην άρδευσης και όταν εφαρμόζεται το 100% των αναγκών της σε νερό. Συγκεκριμένα, προτείνεται για τον προγραμματισμό των αρδεύσεων η χρήση εξατμισιμέτρου τύπου A υπό την προϋπόθεση ότι ο συντελεστής εξατμισιμέτρου (kp) που θα χρησιμοποιηθεί θα είναι κατάλληλα εναρμονισμένος με το μικροκλίμα της περιοχής όπου είναι εγκατεστημένο το εξατμισίμετρο. Επιπλέον, θα πρέπει να γίνεται σχολαστικά η συντήρηση του σύμφωνα με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή. Τέλος, προτείνεται για τον προγραμματισμό της άρδευσης η χρήση του αυτόματου εξατμισιμέτρου, σε συνδυασμό με υπόγειο σύστημα στάγδην άρδευσης, καθώς η παραγωγή με τη συγκεκριμένη μέθοδο ήταν ελάχιστα μικρότερη από την αντίστοιχη παραγωγή που μετρήθηκε στις μεταχειρίσεις P.-M. και A.E. Διαφορά που ίσως να οφείλεται στην τυχαιότητα του δείγματος.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Biomass Energy Center, 2007. www.biomassenergycentre.org.uk

Danalatos N.G., Archontoulis S.V., Giannoulis K.D., Pasxonis K., Tsalikis D., Pazaros B., Papadoulis N., Zaitoudis D., 2008. *Cynara, sunflower, sweet and fiber*

- sorghum on-farm yields in north, central and south Greece in 2007*. Proceedings of the International conference on Agricultural Engineering, Crete, Greece pp 1-13.
- Howell, T.A., Cuenca, R.H. and Solomon, K.H. 1990. *Crop yield response*. In: Hoffman (ED), *Management of Farm Irrigation Systems*. ASAE. pp. 312s.
- Johansson T.B.J., Kelly H., Reddy A.K.N. and Williams R.H., 1993. *Renewable fuels and electricity of a growing world economy*. In: Johansson.
- Montgomery D.C. and Runger G.C., 1999. *Applied Statistics and Probability for Engineers*, John Wiley and Sons, New York, 430-530 pp.
- Sakellariou-Makrantonaki, M., Papalexis, D., Nakos, N., Kalavrouziotis, I., K., 2007. *Effect of modern irrigation methods on growth and energy production of sweet sorghum (var. Keller) on a dry year in Central Greece*. *Agricultural Water Management* 90: 181-189 pp.
- Γαλανοπούλου – Σενδουκά Σ., 2002. *Βιομηχανικά Φυτά, Βαμβάκι και υπόλοιπα κλωστικά, Ελαιοδοτικά – Ζαχαρότευτλα – Καπνός*. Εκδόσεις Αθ. Σταμούλης. Αθήνα.
- Κίττας Κ., Γέμτος Θ., Φουντάς Σ. και Μπαρτζάνας Θ., 2007. *Βιοκαύσιμα και Ενεργειακές Καλλιέργειες*. Λάρισα.
- Κούγιας Π., 2010. *Ενεργειακές Καλλιέργειες*. Ηλεκτρονικό άρθρο www.agri.gr
- Κούντριας Γ., 2011. *Ελλειμματική άρδευση του ηλίανθου για τη βέλτιστη αξιοποίηση αρδευτικού νερού*. Πτυχιακή Διατριβή. Βόλος.
- Μανιός Θ., 2007. *Καλλιέργεια ενεργειακών φυτών και αξιολόγηση αποδοτικότητας*. Πτυχιακή Εργασία. Ηράκλειο.
- Μήτσιος Ι., Τούλιος Μ., Χαρούλης Α., Γάτσιος Φ. και Φλωράς Σ., 2000. *Εδαφολογική μελέτη και εδαφολογικός χάρτης του αγροκτήματος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στην περιοχή του Βελεστίνου*. Εκδόσεις Zymel. Αθήνα, 21-41 σελ.
- Σφήκας Α.Γ., 1988. *Ειδική Γεωργία ΙΙ, Βιομηχανικά Φυτά*. Έκδοση Υπηρεσία Δημοσιευμάτων Α.Π.Θ. Θεσσαλονίκη.

**ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ
ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΔΙΟΔΕΥΣΗΣ ΤΗΣ ΣΕ ΔΙΚΤΥΟ
ΣΤΡΑΓΓΙΣΤΙΚΩΝ ΤΑΦΡΩΝ**

Δ. Παντελάκης, Θ. Ζήσης, Ε. Αναστασιάδου-Παρθενίου, Ε. Μπαλτάς

Τομέας Εγγείων Βελτιώσεων, Εδαφολογίας και Γεωργικής Μηχανικής,
Γεωπονική Σχολή του Α.Π.Θ., 54124, Θεσσαλονίκη

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται ένα αριθμητικό μοντέλο, στο οποίο συνδυάζεται η λόγω έντονων βροχοπτώσεων επιφανειακή απορροή στη διαμορφωμένη με μικρή ομοιόμορφη κλίση επιφάνεια των αγρών, με τη ροή στις τάφρους του στραγγιστικού δικτύου, λαμβάνοντας υπόψη και τη διήθηση στην επιφάνεια του εδάφους των αγρών. Το μοντέλο στηρίζεται στην αριθμητική επίλυση της πλήρους μορφής των εξισώσεων Saint-Venant με το ρητό υπολογιστικό σχήμα MacCormack. Εφαρμογή του μοντέλου έγινε σε ένα δίκτυο τεσσάρων στραγγιστικών τάφρων, οι οποίες δέχονται ως πλευρική εισροή την επιφανειακή απορροή από μέσα εδάφη, και μελετήθηκε η επίδραση του μήκους των τριτεουσών τάφρων σε συνδυασμό με την υγρασιακή κατάσταση του εδάφους στα υδρογραφήματα εξόδου του δικτύου.

**NUMERICAL MODEL FOR THE SIMULATION OF OVERLAND
FLOW AND ITS ROUTING IN A SYSTEM OF DRAINAGE
CANALS**

D. Pantelakis, Th. Zissis, E. Anastasiadou-Partheniou, E. Baltas

Dept. of Hydraulics, Soil Science and Agricultural Engineering,
School of Agriculture, Aristotle University of Thessaloniki, Greece

SUMMARY

In this paper a model based on the numerical solution of the Saint-Venant equations is presented, simulating the overland flow combined with the flow routing in a system of drainage canals. In this model, the lateral inflow towards tertiary drainage canals is the overland flow from adjacent fields. The Saint-Venant equations are numerically solved by the MacCormack explicit computational scheme, which is a two-step predictor-corrector scheme, conditionally stable and convergent. The model was successfully applied for the simulation of flow within a system of four drainage canals, subject to lateral inflow due to the overland flow from loam soils. The results show the effect of the soil moisture content and the canals' length on the formation of the hydrographs at the outlet of the area.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο σχεδιασμός και η κατασκευή ενός στραγγιστικού δικτύου σε μια αρδευόμενη με επιφανειακές μεθόδους άρδευσης περιοχή βασίζεται κυρίως στον υπολογισμό της επιφανειακής απορροής που προκαλείται από έντονες βροχοπτώσεις. Η διαμόρφωση των παροχών στους επιμέρους κλάδους ενός δικτύου στραγγιστικών τάφρων εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της βροχόπτωσης και επηρεάζεται, τόσο από τη ροή και διήθηση στην επιφάνεια του εδάφους των αγρών, όσο και από τη ροή στις στραγγιστικές τάφρους.

Η επιφανειακή απορροή έχει μελετηθεί, κυρίως, σε περιπτώσεις φυσικών και επικλινών εδαφών και έχει προσεγγισθεί με υδρολογικές και υδραυλικές μεθόδους (Raghunath, 2006, Bhadra et al., 2010). Οι υδρολογικές μέθοδοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της επιφανειακής απορροής σε περιοχές μεγάλης έκτασης, στις οποίες τα γεωμετρικά και υδραυλικά χαρακτηριστικά των εδαφών παρουσιάζουν μεγάλη ετερογένεια μεταξύ τους (Singh, 1996). Οι υδραυλικές μέθοδοι που στηρίζονται στις εξισώσεις του Saint-Venant, είτε στην πλήρη μορφή τους, είτε στις απλοποιημένες μορφές τους, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την προσέγγιση της επιφανειακής απορροής στους αγρούς ενός δικτύου επιφανειακής άρδευσης, οι οποίοι παρουσιάζουν όμοια χαρακτηριστικά, όπως είναι η ομοιόμορφη κλίση της επιφάνειάς τους (Παντελάκης, 2010). Σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την επιφανειακή απορροή είναι η διηθητικότητα του εδάφους, η οποία μπορεί να προσεγγισθεί με εξισώσεις, όπως αυτή των Green-Ampt. Η εξίσωση Green-Ampt είναι απλή στην εφαρμογή της, απαιτεί τον προσδιορισμό λίγων παραμέτρων, που έχουν φυσική σημασία και οι τιμές τους μπορούν να βρεθούν από πίνακες (Rawls et al., 1982).

Όπως συμβαίνει με την επιφανειακή απορροή, έτσι και η διόδευση της ροής σε ένα δίκτυο ανοικτών αγωγών, έχει εκτενώς μελετηθεί και προσεγγισθεί, είτε με υδρολογικές, είτε με υδραυλικές μεθόδους. Οι υδραυλικές μέθοδοι που βασίζονται στις εξισώσεις του Saint-Venant μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μελέτη της διόδευσης της ροής σε ένα δίκτυο στραγγιστικών τάφρων, γιατί κατά το στάδιο σχεδιασμού ενός τέτοιου δικτύου, τα γεωμετρικά και υδραυλικά χαρακτηριστικά των τάφρων λαμβάνονται ως γνωστά. Επιπλέον, με τις υδραυλικές μεθόδους μπορεί να υπολογισθεί και η προς τα ανάντη κίνηση του νερού (backwater effects), φαινόμενο σύνηθες σε ένα δίκτυο στραγγιστικών τάφρων (Akan, 1985, Singh, 1996, Kesserwani et al., 2008).

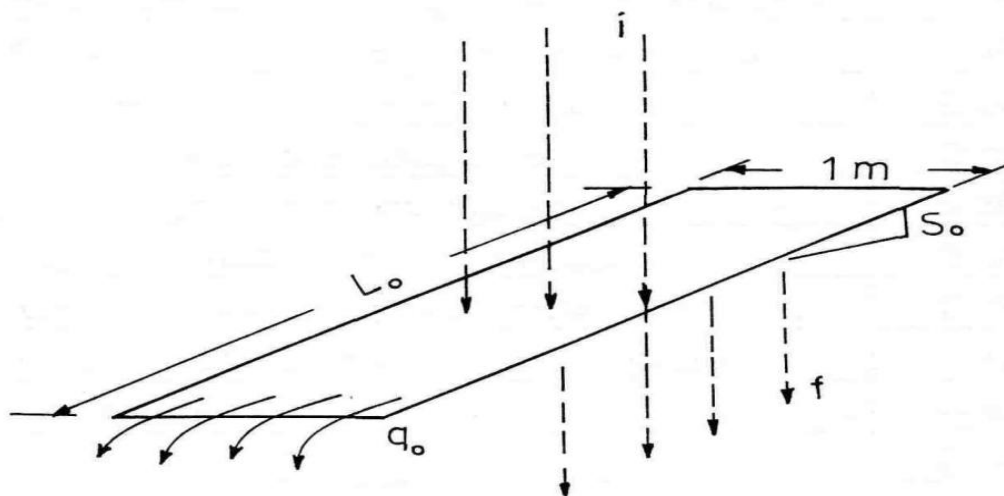
Οι εξισώσεις του Saint-Venant επιλύονται αναλυτικά μόνον σε απλές περιπτώσεις ροών. Στην πλειονότητα των περιπτώσεων, οι εξισώσεις αυτές επιλύονται αριθμητικά, και σε αρκετές περιπτώσεις χρησιμοποιούνται πεπλεγμένα υπολογιστικά σχήματα, όπως είναι το υπολογιστικό σχήμα του Preismman (Naidu et al., 1997). Αν και αρκετοί ερευνητές παρουσίασαν τεχνικές για τον περιορισμό της δυσκολίας επίλυσης που χαρακτηρίζει τα πεπλεγμένα υπολογιστικά σχήματα (Naidu et al. 1997, Sen and Garg, 2002), εντούτοις η πολυπλοκότητα της επίλυσης των εξισώσεων του Saint-Venant εξακολουθεί να υφίσταται. Αντίθετα, ένα ρητό υπολογιστικό σχήμα εμφανίζεται καταλληλότερο για την επίλυση των εξισώσεων του Saint-Venant και τη μικρή χρονικής διάρκειας προσομοίωση της ροής σε ένα δίκτυο στραγγιστικών τάφρων, αποφεύγοντας την πολυπλοκότητα των πεπλεγμένων σχημάτων. Από τα ρητά υπολογιστικά σχήματα, ευρέως χρησιμοποιούμενο είναι το ρητό υπολογιστικό σχήμα του MacCormack (Singh, 1996, Kazezyilmaz and Medina, 2007), το οποίο είναι δύο βημάτων, ακριβές δεύτερης τάξης, ευσταθές υπό όρους και συγκλίνον.

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται ένα αριθμητικό μοντέλο (δυναμικό μοντέλο), το οποίο προσομοιώνει την επιφανειακή απορροή εξαιτίας μιας ισχυρής βροχόπτωσης σε αγροτεμάχια που είναι ενταγμένα σε ένα δίκτυο επιφανειακής άρδευσης, λαμβάνοντας υπόψη τη διήθηση του εδάφους, και ταυτόχρονα προσομοιώνει και τη

διόδευση της ροής μέσα στο δίκτυο των στραγγιστικών τάφρων. Η ροή μέσα στο δίκτυο των τάφρων είναι αποτέλεσμα της επιφανειακής απορροής, την οποία δέχονται ως πλευρική εισροή οι τριτεύουσες τάφροι. Το αριθμητικό μοντέλο στηρίζεται στην πλήρη μορφή των εξισώσεων του Saint-Venant και επιλύεται με το ρητό υπολογιστικό σχήμα του MacCormack. Η διήθηση του εδάφους προσεγγίζεται με την εξίσωση Green-Ampt, η οποία επιλύεται με την επαναληπτική μέθοδο του Newton-Raphson. Το μοντέλο εφαρμόστηκε σε ένα δίκτυο τεσσάρων στραγγιστικών τάφρων και μελετήθηκε η επίδραση της υγρασιακής κατάστασης των μέσων εδαφών του δικτύου στη μορφή των υδρογραφημάτων της επιφανειακής απορροής, και στη συνέχεια στη μορφή των υδρογραφημάτων εξόδου του στραγγιστικού δικτύου. Επίσης, μελετήθηκε η επίδραση του μήκους των τριτευουσών τάφρων στη μορφή των υδρογραφημάτων εξόδου του δικτύου. Οι σημαντικές διαφοροποιήσεις που προέκυψαν, τόσο στις παροχές, όσο και στα βάθη ροής στις τάφρους, δείχνουν τη σημασία των προαναφερθέντων παραγόντων, οι οποίοι πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό ενός στραγγιστικού δικτύου.

2. ΔΙΑΦΟΡΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΣΧΗΜΑ MACCORMACK

Οι εξισώσεις του Saint-Venant που χρησιμοποιούνται για τη μελέτη της επιφανειακής απορροής από το άνω όριο στο κάτω όριο μιας επιφάνειας, όπως αυτή του Σχήματος 1, έχουν τη μορφή των (2.1α) και (2.1β):



Σχήμα 1: Επιφανειακή απορροή τυπικής λωρίδας αγρού πλάτους ίσου προς τη μονάδα

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial q_0}{\partial x} = i - f \quad (2.1\alpha)$$

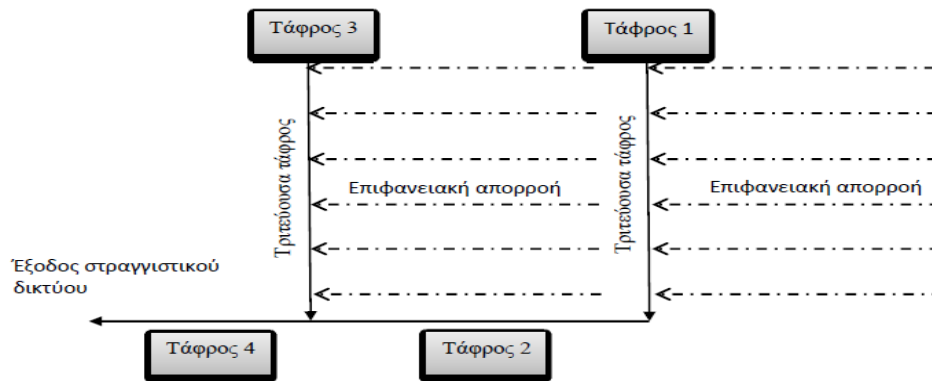
$$\frac{\partial q_0}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_0^2}{y} + \frac{g y^2}{2} \right) = g y (S_0 - S_f) \quad (2.1\beta)$$

όπου y είναι το βάθος (L), q_0 είναι η παροχή ανά μονάδα πλάτους (L^3/LT), i είναι η ένταση της βροχόπτωσης (L^3/L^2T), f είναι η διηθητικότητα (L^3/L^2T), t είναι ο χρόνος (T), x είναι η απόσταση (L), g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας (L/T^2), S_0 είναι η κλίση του εδάφους, και S_f είναι η κλίση τριβών (L/L), η οποία δίνεται από την εξίσωση

Manning ή την εξίσωση Chezy. Η εξίσωση Manning για την περίπτωση αυτή παίρνει τη μορφή:

$$q_o = \frac{1}{n} y^{5/3} S_o^{1/2} \quad (2.2)$$

Οι εξισώσεις του Saint-Venant που περιγράφουν τη διόδευση της ροής μέσα στο δίκτυο των τάφρων του Σχήματος 2, μπορούν να γραφούν με τη μορφή των (2.3α,β):



Σχήμα 2: Δίκτυο τεσσάρων στραγγιστικών τάφρων (δύο τριτεουσών 1, 3 και δύο τμημάτων 2 και 4 μιας δευτερεύουσας τάφρου)

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = Q_p \quad (2.3\alpha)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} + gDA \right) = gA (S_o - S_f) \quad (2.3\beta)$$

όπου A είναι το εμβαδόν της υγρής διατομής (L^2), Q είναι η παροχή ($L^3 T^{-1}$), Q_p είναι η πλευρική εισροή λόγω επιφανειακής απορροής ($L^3 L^{-2} T^{-1}$), g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας ($L T^{-2}$), D είναι η απόσταση του κέντρου της υγρής διατομής από την ελεύθερη επιφάνεια (L), S_o είναι η κλίση του πυθμένα των τάφρων ($L L^{-1}$) and S_f είναι η κλίση τριβών ($L L^{-1}$), η οποία δίνεται από την εξίσωση Manning ή Chezy.

Οι (2.1α, 2.1β, 2.3α, 2.3β) μπορούν να γραφούν με τη συντηρητική μορφή κατά Lax:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} = S \quad (2.4)$$

όπου:

$$U = \begin{pmatrix} y \\ q_o \end{pmatrix}, \quad F = \begin{pmatrix} q_o \\ \frac{q_o^2}{y} + \frac{gy^2}{2} \end{pmatrix}, \quad S = \begin{pmatrix} i - f \\ gy(S_o - S_f) \end{pmatrix}, \quad (\text{Επιφανειακή απορροή}) \quad (2.5\alpha)$$

$$U = \begin{pmatrix} A \\ Q \end{pmatrix}, \quad F = \begin{pmatrix} Q \\ \frac{Q^2}{A} + gDA \end{pmatrix}, \quad S = \begin{pmatrix} Q_p \\ gA(S_o - S_f) \end{pmatrix}, \quad (\text{Διόδευση της ροής στο δίκτυο των τάφρων}) \quad (2.5\beta)$$

Η (2.4) επιλύεται αριθμητικά με το υπολογιστικό σχήμα MacCormack σύμφωνα με τις (2.6α) και (2.6β), που αποτελούν τα βήματα πρόβλεψης και διόρθωσης, αντίστοιχα:

$$U_k^{*j+1} = U_k^j - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left((1-e)F_{k+1}^j - (1-2e)F_k^j - eF_{k-1}^j \right) + S_k^j \Delta t \quad (2.6\alpha)$$

$$U_k^{j+1} = \frac{1}{2} \left(U_k^j + U_k^{*j+1} - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left(eF_{k+1}^{*j+1} + (1-2e)F_k^{*j+1} + (e-1)F_{k-1}^{*j+1} \right) + S_k^{*j+1} \Delta t \right) \quad (2.6\beta)$$

όπου με k συμβολίζεται ο χωρικός κόμβος, με j συμβολίζεται το χρονικό βήμα, με $*j+1$ συμβολίζεται το χρονικό βήμα κατά το οποίο υπολογίζονται οι προσωρινές τιμές των μεταβλητών, και e είναι ένας τελεστής, που παίρνει τιμές 0 και 1 εναλλάξ σε κάθε χρονικό βήμα για το μοντέλο της επιφανειακής απορροής, και την τιμή 1 σε κάθε χρονικό βήμα για το μοντέλο της διόδευσης της ροής στο δίκτυο των στραγγιστικών τάφρων. Το χρονικό βήμα στο υπολογιστικό σχήμα MacCormack θα πρέπει να ικανοποιεί το κριτήριο ευστάθειας Courant-Friedrich-Lewy (CFL):

$$\Delta t \leq C_n \frac{\Delta x}{(|U \pm C|)_{\max}} \quad (2.7)$$

όπου C_n είναι ο αριθμός Courant ($C_n=0.8$) και C είναι η ταχύτητα των μικρών κυματισμών. Παράλληλα με το κριτήριο CFL, σε ροές με πολύ μικρό βάθος ροής και μεγάλο συντελεστή τραχύτητας επιβάλλεται να ικανοποιείται και το κριτήριο ευστάθειας λόγω τριβών (Terzidis, 1968). Εάν χρησιμοποιηθεί η εξίσωση του Manning για πρισματικό αγωγό οποιασδήποτε διατομής, το κριτήριο ευστάθειας λόγω τριβών γίνεται (Pantelakis et al., 2011):

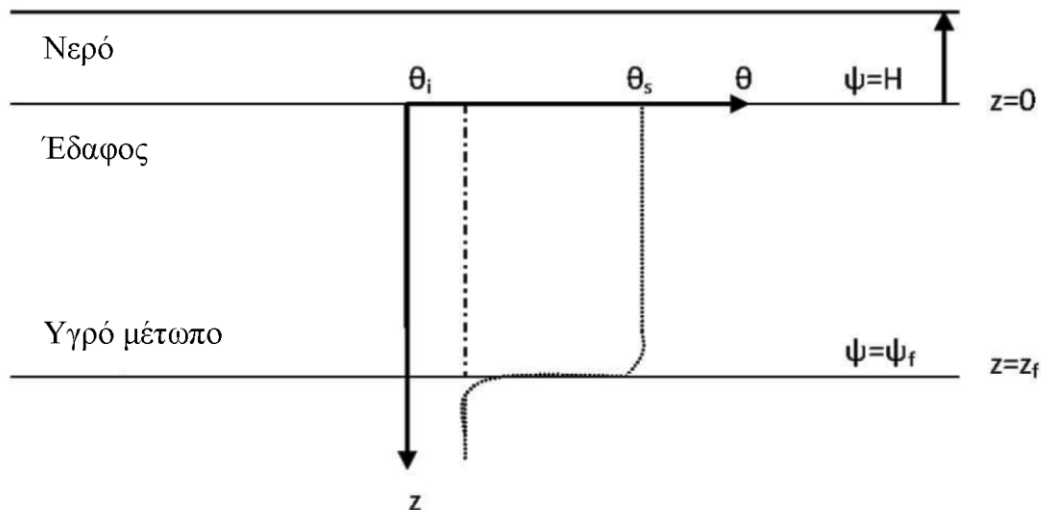
$$\Delta t \leq \frac{AR_u^{4/3}}{gn^2Q} \quad (2.8)$$

3. ΕΞΙΣΩΣΗ ΔΙΗΘΗΣΗΣ GREEN-AMPT

Οι Green and Ampt (1911), θεωρώντας το έδαφος ομογενές, βαθύ, με ομοιόμορφη υγρασιακή κατανομή και με λιμνάζουσα επιφάνεια (Σχήμα 3), ανέπτυξαν την (3.1) για τη διηθητικότητα:

$$f = K \left[1 + \frac{(\theta_s - \theta_i) \Psi_f}{F} \right] \quad (3.1)$$

όπου $f(L/T)$ είναι η διηθητικότητα, $F(L)$ είναι η αθροιστική διήθηση, $K(L/T)$, είναι η κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα, $\theta_s(L^3/L^3)$, είναι η υγρασία κορεσμού, $\theta_i(L^3/L^3)$, είναι η αρχική υγρασία του εδάφους, και $\Psi_f(L)$, είναι το ύψος πίεσης του υγρού μετώπου.



Σχήμα 3: Σκαρίφημα της θεωρίας του μοντέλου Green-Ampt

Η (3.1) επιλύεται αριθμητικά με τη μέθοδο Newton-Raphson και συνδέεται εξωτερικά με τις εξισώσεις του Saint-Venant. Αυτό σημαίνει ότι επιλύεται πρώτα η εξίσωση της διήθησης, και στη συνέχεια επιλύονται για το ίδιο χρονικό βήμα οι εξισώσεις του Saint-Venant λαμβάνοντας υπόψη την τιμή της διηθητικότητας.

4. ΑΡΧΙΚΕΣ ΚΑΙ ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Στην περίπτωση της επιφανειακής απορροής ως αρχικές συνθήκες θεωρούνται ένα πολύ μικρό βάθος ροής ($y_{arx} < 10^{-3} \text{ m}$) και η αντίστοιχη μικρή τιμή της παροχής Q_{arx} , που προκύπτει από την εξίσωση Manning. Αντίστοιχα για τη διόδευση της ροής στο δίκτυο των στραγγιστικών τάφρων, ως αρχικές συνθήκες θεωρούνται ένα μικρό βάθος ροής ($y_{ini} = 10 \text{ cm}$), το οποίο οφείλεται στην επίδραση του υπόγειου νερού, και η αντίστοιχη παροχή Q_{ini} που προκύπτει από την εξίσωση Manning.

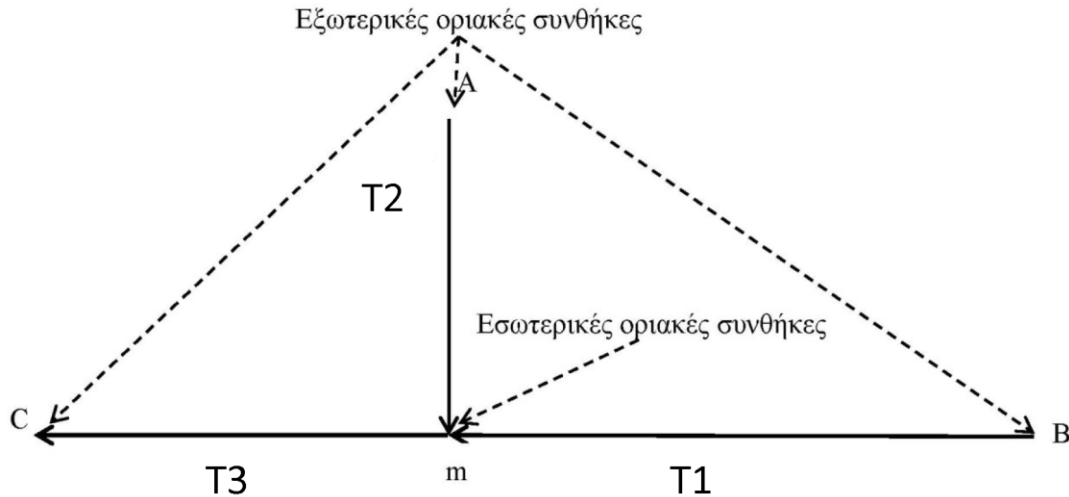
Όσον αφορά την επιφανειακή απορροή, οι οριακές συνθήκες αναφέρονται στο άνω και στο κάτω όριο των αγροτεμαχίων. Ως οριακή συνθήκη στα άνω θεωρείται μια μικρή τιμή βάθους ροής, και πιο συγκεκριμένα η τιμή 10^{-3} m . Η παροχή στο σημείο αυτό λαμβάνεται μηδενική, διότι θεωρείται ότι στο πάνω άκρο του αγροτεμαχίου δεν εισέρχεται νερό. Στο κάτω όριο των αγροτεμαχίων θεωρήθηκαν ως οριακές συνθήκες, οι (4.1α) και (4.1β), που χρησιμοποιήθηκαν και στην περίπτωση της διόδευσης της ροής στο δίκτυο των στραγγιστικών τάφρων:

$$\left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)_{k-1}^j = \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)_k^j \quad (4.1\alpha)$$

$$\left(\frac{\partial q_o}{\partial x} \right)_{k-1}^j = \left(\frac{\partial q_o}{\partial x} \right)_k^j \quad (4.1\beta)$$

Στην περίπτωση του δικτύου των στραγγιστικών τάφρων, εκτός των εξωτερικών οριακών συνθηκών (A, B και C), υπάρχουν και οι εσωτερικές οριακές συνθήκες (m), όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.

Στα σημεία A και B η παροχή υπολογίζεται από την εξίσωση Manning, που λαμβάνει υπόψη το αρχικό βάθος ροής ($y_{ini} = 10 \text{ cm}$), και η παροχή παραμένει σταθερή, γιατί στα σημεία αυτά δεν εισέρχεται επιπλέον νερό. Στο σημείο C ισχύουν οι (4.1α) και (4.1β). Όσον αφορά το σημείο σύνδεσης των τάφρων (σημείο m) ισχύουν οι χαρακτηριστικές εξισώσεις και οι αρχές διατήρησης της μάζας και ενέργειας.



Σχήμα 4: Δίκτυο αγωγών με εσωτερικές και εξωτερικές οριακές συνθήκες

Πιο συγκεκριμένα, στους τελευταίους κόμβους των τάφρων T1 και T2, εφαρμόζεται η προς τα εμπρός χαρακτηριστική εξίσωση με τη μορφή της (4.2):

$$C^+ : Q_{m1,2} = f(y_m) \quad (4.2)$$

Η προς τα πίσω χαρακτηριστική εξίσωση εφαρμόζεται στον πρώτο κόμβο της τάφρου T3 ως εξής:

$$C^- : y_m = f(Q_{m3}) \quad (4.3)$$

Στο σημείο αυτό, θα πρέπει να αναφερθεί ότι η ροή του νερού έχει κατεύθυνση από τις τάφρους T1 και T2 προς την τάφρο T3. Επίσης, θεωρείται ότι το βάθος ροής στον τελευταίο κόμβο των τάφρων T1 και T2 είναι ίσο με το βάθος ροής στον πρώτο κόμβο της τάφρου T3. Αυτό προκύπτει από την εξίσωση ενέργειας, όπου τα ύψη ταχύτητας και των απωλειών μπορούν να θεωρηθούν ως αμελητέες ποσότητες. Από την εξίσωση συνέχειας προκύπτει ότι η παροχή στον πρώτο κόμβο της τάφρου T3 είναι ίση με το άθροισμα των παροχών στον τελευταίο κόμβο των τάφρων T1 και T2, σύμφωνα με την (4.4).

$$Q_{m3} = Q_{m1} + Q_{m2} \quad (4.4)$$

Οι (4.2, 4.3 και 4.4) επιλύονται ταυτόχρονα και δίνουν το βάθος ροής και την παροχή στο σημείο σύνδεσης των τάφρων.

5. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Για τον έλεγχο της αξιοπιστίας του παρουσιαζόμενου αριθμητικού μοντέλου, όσον αφορά το τμήμα της επιφανειακής απορροής, έγινε σύγκριση του προτεινόμενου μοντέλου με το μοντέλο των Fiedler and Ramirez (2000), οι οποίοι προσέγγισαν την πλήρη μορφή των εξισώσεων του Saint-Venant με τη μέθοδο MacCormack, και τη διήθηση με τη σχέση των Green-Ampt. Για τον έλεγχο της αξιοπιστίας του αριθμητικού μοντέλου, όσον αφορά τη διόδευση της ροής στο δίκτυο των τάφρων, το προτεινόμενο μοντέλο συγκρίθηκε με το μοντέλο των Aral et al. (1996), οι οποίοι προσέγγισαν τη ροή του νερού σε ένα δίκτυο τριών πρισματικών, ορθογωνικών αγωγών, που δεν δέχονται

πλευρική παροχή (Σχήμα 4). Τα δεδομένα για τις εφαρμογές αυτές δίνονται στους Πίνακες 1α, 1β. Τα αποτελέσματα των συγκρίσεων του προτεινόμενου μοντέλου με τα μοντέλα των Fiedler and Ramirez (2000), καθώς και των Aral et al. (1996) δίνονται στα Σχήματα 5α και 5β, αντίστοιχα. Από τα Σχήματα 5α και 5β φαίνεται η καλή προσέγγιση των αποτελεσμάτων του προτεινόμενου μοντέλου με εκείνα του μοντέλου της επιφανειακής απορροής των Fiedler and Ramirez (2000), και με εκείνα του μοντέλου της διάδευσης της ροής σε δίκτυο τριών αγωγών των Aral et al. (1996).

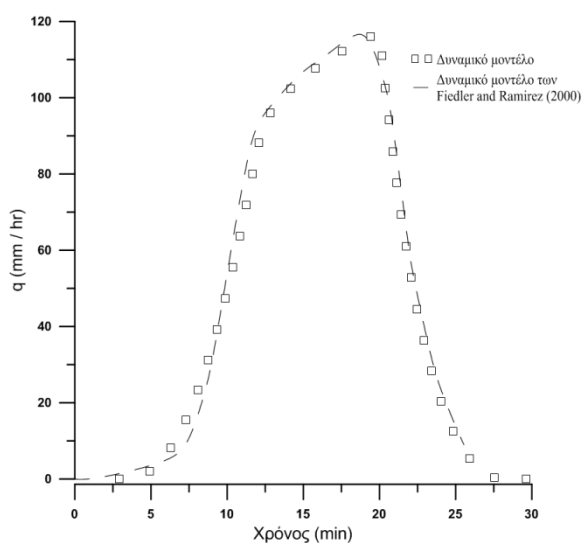
Πίνακας 1α: Δεδομένα για την εφαρμογή των Fiedler and Ramirez (2000)

Μήκος εδάφους L_0	50m
Κλίση εδάφους S_0	0.04
Συντελεστής Manning n	0.1
Διάρκεια βροχής Dur	20min
Ένταση βροχής i	177.6mm/hr
Μύζηση υγρού μετώπου Ψ_f	44cm
Έλλειμμα εδαφικής υγρασίας $(\theta_s - \theta_i) =$	$0.25 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$
Κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα K	$3.53 \cdot 10^{-4} \text{ cm/sec}$

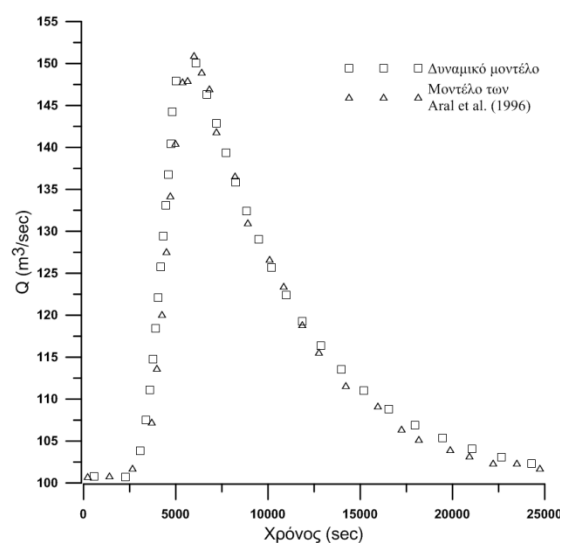
Πίνακας 1β: Δεδομένα για την εφαρμογή των Aral et al. (1996)

	Αγωγός 1	Αγωγός 2	Αγωγός 3
Μήκος	5000m	5000m	5000m
Πλάτος πυθμένα	50m	50m	100m
Κλίση πυθμένα	0.0002	0.0002	0.0002
Συντελεστής Manning	0.025	0.025	0.025
Αρχικό βάθος ροής	1.43m	1.43m	1.43m
Αρχική παροχή	$50 \text{ m}^3/\text{sec}$	$50 \text{ m}^3/\text{sec}$	$100 \text{ m}^3/\text{sec}$

Το προτεινόμενο δυναμικό μοντέλο εφαρμόστηκε επίσης σε ένα δίκτυο τεσσάρων τάφρων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2. Για τον υπολογισμό της επιφανειακής απορροής το έδαφος θεωρήθηκε μέσο, με συντελεστή τραχύτητας $n=0.1$, κλίση $S_0=0.0005$ και μήκος $L=200\text{m}$. Τα στοιχεία αυτά αντιπροσωπεύουν μια τυπική αρδευόμενη έκταση μέσα σε ένα δίκτυο στραγγιστικών τάφρων.



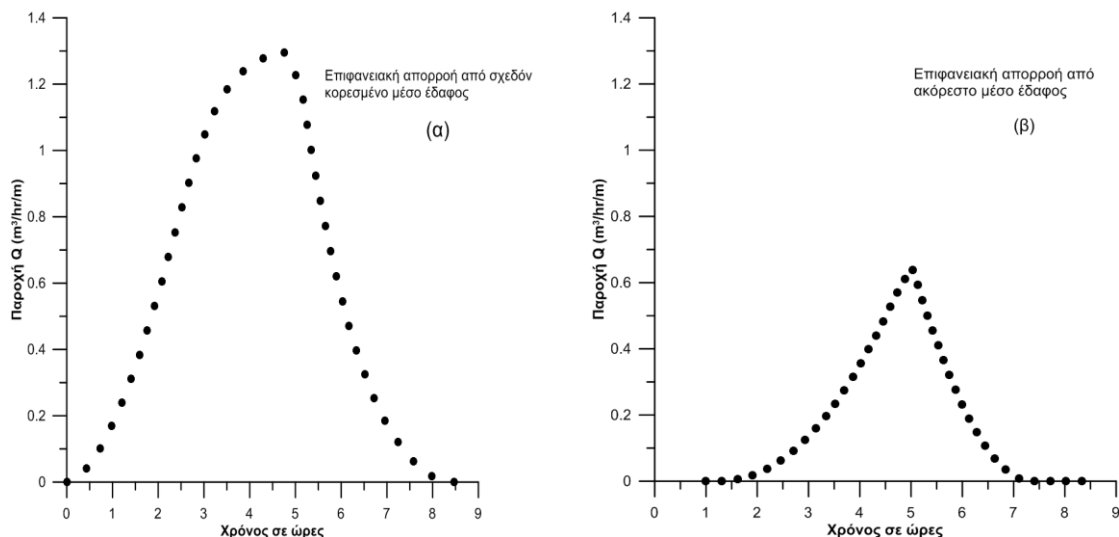
Σχήμα 5α: Σύγκριση προτεινόμενου μοντέλου με το μοντέλο των Fiedler and Ramirez (2000)



Σχήμα 5β: Σύγκριση προτεινόμενου μοντέλου με το μοντέλο των Aral et al. (1996)

Η κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα, καθώς και η μύζηση του υγρού μετώπου βρέθηκαν από πίνακες και έχουν τιμές $K=0.34$ cm/hr και $\Psi_f=8.89$ cm, αντίστοιχα. Η βροχόπτωση της εφαρμογής αυτής είχε διάρκεια 5 ώρες και σταθερή ένταση 10 mm/hr. Το Δt υπολογίζεται με βάση τις (2.7) και (2.8) για $\Delta x=5$ m.

Για τη μελέτη της επίδρασης της υγρασιακής κατάστασης των εδαφών στη μορφή των υδρογραφήματων απορροής, στο Σχήμα 6 γίνεται σύγκριση της επιφανειακής απορροής που προκαλείται, τόσο από σχεδόν κορεσμένο, όσο και από ακόρεστο μέσο έδαφος. Η μέγιστη αιχμή της επιφανειακής απορροής για το σχεδόν κορεσμένο μέσο έδαφος είναι περίπου 1.3 m³/hr/m, ενώ για την περίπτωση του ακόρεστου μέσου εδάφους είναι περίπου 0.64 m³/hr/m. Η μείωση αυτή μέγιστης παροχής ανά μονάδα πλάτους ανέρχεται σε ποσοστό περίπου 51%. Επίσης, παρατηρείται ότι η αιχμή της απορροής, στην περίπτωση του κορεσμένου εδάφους, εμφανίζεται νωρίτερα (285 min) σε σχέση με την περίπτωση του ακόρεστου εδάφους (301 min), καθώς επίσης και ότι η βάση του υδρογραφήματος στην πρώτη περίπτωση είναι μεγαλύτερη από ότι στη δεύτερη. Για τη μελέτη της διόδευσης της ροής στο δίκτυο των στραγγιστικών τάφρων το Δt υπολογίζεται με βάση τις (2.7) και (2.8) για $\Delta x=10$ m και τα γεωμετρικά στοιχεία των τεσσάρων τάφρων δίνονται στον Πίνακα 3.



Σχήμα 6: Επιφανειακή απορροή από α) σχεδόν κορεσμένο και β) ακόρεστο μέσο έδαφος

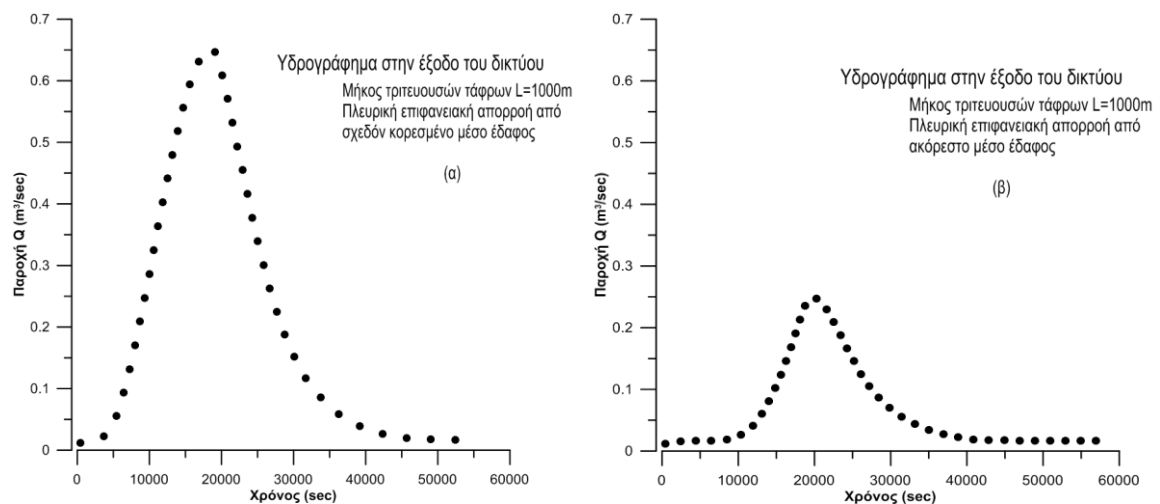
Πίνακας 3: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά δικτύου τεσσάρων τάφρων

Τάφος (1)	Τάφος (2)	Τάφος (3)	Τάφος (4)
Μήκος $L=1000$ m	Μήκος $L=200$ m	Μήκος $L=1000$ m	Μήκος $L=200$ m
Συντελεστής Τραχύτητας $n=0.03$			
Πλάτος πυθμένα $B=0.6$ m	Πλάτος πυθμένα $B=0.75$ m	Πλάτος πυθμένα $B=0.6$ m	Πλάτος πυθμένα $B=0.75$ m
Κλίση πρανών 1:1			
Κλίση πυθμένα $S_o=0.0003$	Κλίση πυθμένα $S_o=0.0002$	Κλίση πυθμένα $S_o=0.0003$	Κλίση πυθμένα $S_o=0.0002$

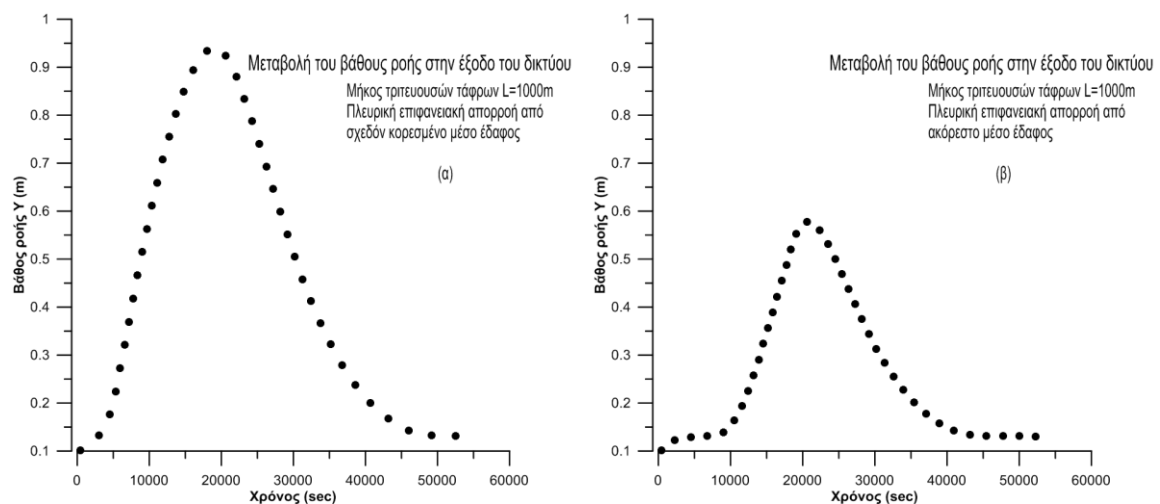
Στο Σχήμα 7 παρουσιάζονται τα υδρογραφήματα που αφορούν τις παροχές στην έξοδο του δικτύου των τεσσάρων τάφρων, και προκύπτουν από την πλευρική επιφανειακή απορροή που λαμβάνει χώρα σε σχεδόν κορεσμένο και ακόρεστο μέσο έδαφος. Στο Σχήμα 8 δίνονται τα αντίστοιχα γραφήματα των βαθών ροής. Στην

περίπτωση της επιφανειακής απορροής από σχεδόν κορεσμένο μέσο έδαφος, η μέγιστη παροχή είναι $0.65 \text{ m}^3/\text{sec}$ και εμφανίζεται περίπου σε 18577 sec από την έναρξη της επιφανειακής απορροής, ενώ το μέγιστο βάθος ροής ανέρχεται στα 0.94 m. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα για την περίπτωση της επιφανειακής απορροής από ακόρεστο μέσο έδαφος είναι $0.25 \text{ m}^3/\text{sec}$, 19945 sec και 0.58 m. Παρατηρείται μια μείωση της μέγιστης παροχής, και κατ' επέκταση της επιβάρυνσης του δικτύου περίπου κατά 62%, καθώς και μια μείωση στο μέγιστο βάθος ροής περίπου κατά 39%.

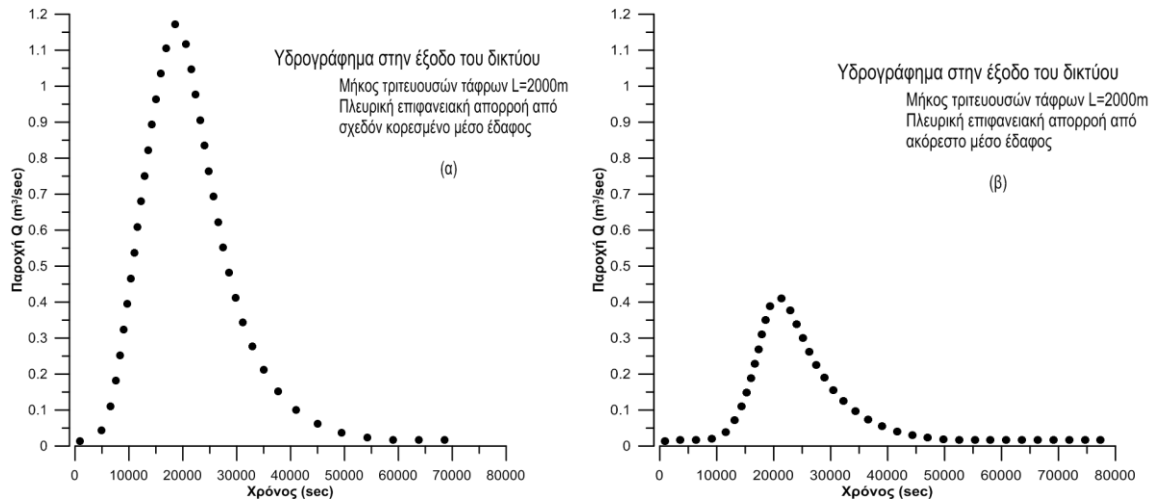
Για να μελετηθεί η επίδραση του μήκους των τριτευσών στραγγιστικών τάφρων στη μορφή των υδρογραφημάτων στη έξοδο του δικτύου, αυξήσαμε το μήκος τους από 1000m σε 2000m. Τα γραφήματα της παροχής και της μεταβολής του βάθους ροής για τις δύο υγρασιακές καταστάσεις των μέσων εδαφών δίνονται στα Σχήματα 9 και 10. Στην περίπτωση της επιφανειακής απορροής από σχεδόν κορεσμένο μέσο έδαφος, η μέγιστη παροχή είναι $1.17 \text{ m}^3/\text{sec}$ και εμφανίζεται περίπου σε 18841 sec από την έναρξη της επιφανειακής απορροής, ενώ το μέγιστο βάθος ροής ανέρχεται στα 1.24 m.



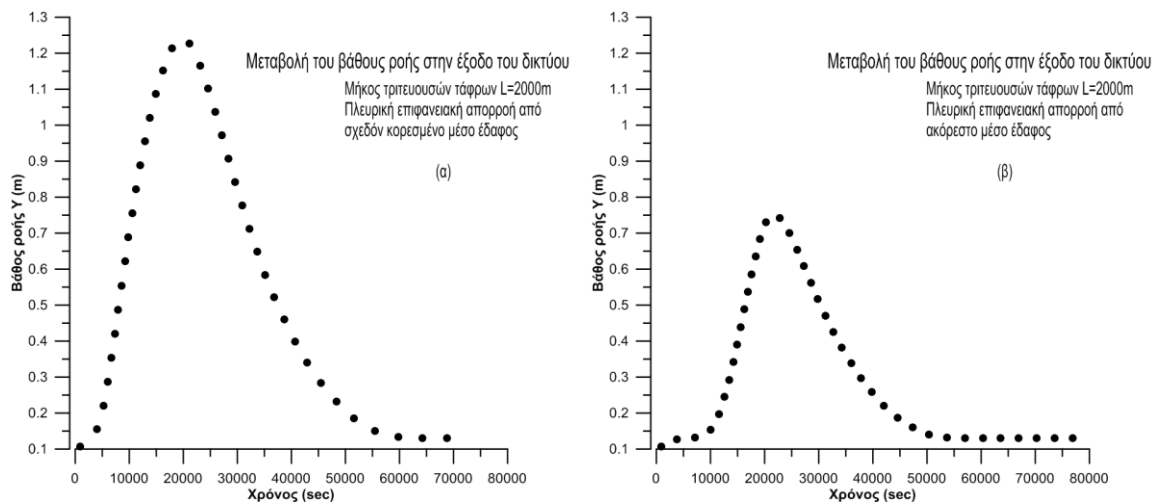
Σχήμα 7: Υδρογράφημα στην έξοδο του δικτύου των τεσσάρων τάφρων με μήκος τριτευσών τάφρων $L=1000\text{m}$ και πλευρική επιφανειακή απορροή από α) σχεδόν κορεσμένο, και β) ακόρεστο μέσο έδαφος



Σχήμα 8: Μεταβολή του βάθους ροής στην έξοδο του δικτύου των τεσσάρων τάφρων με μήκος τριτευσών τάφρων $L=1000\text{m}$ και πλευρική επιφανειακή απορροή από α) σχεδόν κορεσμένο, και β) ακόρεστο μέσο έδαφος



Σχήμα 9: Υδρογράφημα στην έξοδο του δικτύου των τεσσάρων τάφρων με μήκος τριτευσών τάφρων $L=2000\text{m}$ και πλευρική επιφανειακή απορροή από α) σχεδόν κορεσμένο, και β) ακόρεστο μέσο έδαφος



Σχήμα 10: Μεταβολή του βάθους ροής στην έξοδο του δικτύου των τεσσάρων τάφρων με μήκος τριτευσών τάφρων $L=2000\text{m}$ και πλευρική επιφανειακή απορροή από α) σχεδόν κορεσμένο, και β) ακόρεστο μέσο έδαφος

Τα αντίστοιχα αποτελέσματα για την περίπτωση της επιφανειακής απορροής από ακόρεστο μέσο έδαφος είναι $0.41 \text{ m}^3/\text{sec}$, 20571 sec και 0.75 m . Παρατηρείται μια μείωση της μέγιστης παροχής, και κατ' επέκταση της επιβάρυνσης του δικτύου περίπου κατά 65%, καθώς και μια μείωση στο μέγιστο βάθος ροής περίπου κατά 40%. Συνοπτικά, οι μέγιστες παροχές και τα μέγιστα βάθη ροής για όλες τις παραπάνω περιπτώσεις δίνονται στον Πίνακα 4.

Πίνακας 4: Μέγιστες τιμές παροχών και βάθους ροής για τις δύο υγρασιακές καταστάσεις του μέσου εδάφους και για δύο μήκη τριτευσών τάφρων

Μήκος ζουσών τάφρων	Κορεσμένο μέσο έδαφος		Ακόρεστο μέσο έδαφος	
	L=1000m	L=2000m	L=1000m	L=2000m
Q_{max}	0.65	1.17	0.25	0.41
Y_{max}	0.94	1.24	0.58	0.75

Από τον Πίνακα 4 προκύπτει μια αύξηση της παροχής κατά 80%, στην περίπτωση που αυξηθεί το μήκος των τριτεουσών τάφρων στο διπλάσιο για σχεδόν κορεσμένο μέσο έδαφος, και μια αύξηση της παροχής κατά 64% στην περίπτωση που αυξηθεί το μήκος των τριτεουσών τάφρων στα 2000m για ακόρεστο έδαφος. Οι ανάλογες αυξήσεις στα βάθη ροής είναι 32% και 29%, αντίστοιχα.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή παρουσιάστηκε ένα αριθμητικό μοντέλο που προσομοιώνει την επιφανειακή απορροή, καθώς και τη ροή που αυτή προκαλεί σε ένα δίκτυο στραγγιστικών τάφρων. Το μοντέλο αυτό στηρίχθηκε στην αριθμητική λύση των εξισώσεων του Saint-Venant με το ρητό υπολογιστικό σχήμα MacCormack. Στην προσομοίωση της επιφανειακής απορροής, η διήθηση του εδάφους προσεγγίσθηκε με την εξίσωση Green-Ampt. Το μοντέλο εφαρμόστηκε σε ένα δίκτυο τεσσάρων στραγγιστικών τάφρων, δύο τριτεουσών και δύο τμημάτων μιας δευτερεύουσας τάφρου. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις από τις εφαρμογές του μοντέλου συνοψίζονται στα παρακάτω:

Η χρήση του ρητού υπολογιστικού σχήματος MacCormack για την αριθμητική επίλυση των εξισώσεων του Saint-Venant, που περιγράφουν την επιφανειακή απορροή, καθώς και τη διόδευση της ροής σε ένα στραγγιστικό δίκτυο τάφρων, περιόρισε την πολυπλοκότητα και τη δυσκολία που χαρακτηρίζουν τα πεπλεγμένα υπολογιστικά σχήματα. Επιπλέον, το μικρό χρονικό βήμα που απαιτεί το ρητό υπολογιστικό σχήμα για τη σύγκλισή του δεν αποτελεί μειονέκτημα, διότι το φαινόμενο της επιφανειακής απορροής και της ροής που αυτή προκαλεί σε ένα δίκτυο στραγγιστικών τάφρων οφείλονται σε βροχόπτωση μεγάλης έντασης και σχετικά μικρής διάρκειας.

Η υγρασιακή κατάσταση του εδάφους καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τη μορφή του υδρογραφήματος της επιφανειακής απορροής, και κατά συνέπεια τη διαμόρφωση των υδρογραφημάτων στην έξοδο του δικτύου.

Τέλος, το μεγαλύτερο μήκος των τριτεουσών τάφρων αυξάνει μεν τον όγκο απορροής, καθώς και το μέγιστο βάθος ροής, αλλά όχι ανάλογα με τη στραγγιζόμενη έκταση.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Akan, A.O., 1985. *Kinematic-Wave Method for Peak Runoff Estimates*. J. of Transp. Eng., 111: 419-425.
- Aral, M.M., Zhang, Y., Jin, S., 1996. *A Computational Method for Wave Propagation Simulation in Open-Channel Networks*. Multimedia Environmental Simulations Laboratory, Georgia Tech, Report No. MESL-03-96, 56 p.
- Bhadra, A., Bandyopadhyay, A., Singh, R., Raghuvanshi, S., 2010. *Rainfall-runoff modeling: Comparison of two approaches with different data requirements*. Water Resour Manage 24:37–62 doi 10.1007/s11269-009-9436-z
- Fielder, F.R. and Ramirez, J.A., 2000. *A numerical method for simulating discontinuous shallow flow over an infiltrating surface*. Int. J. for Numer Methods in Fluids 32: 219-240
- Green, W.H. and Ampt, G. A., 1911. *Studies on soil physics*, J. Agric. Sci. 4(1): 1-24
- Kazezyilmaz-Alhan, C.M. and Medina, Jr. M.A., 2007. *Kinematic and diffusion waves: Analytical and numerical solutions to overland and channel flow*. J of Hydr Eng. 103:217-228.

- Kesserwani, G., Ghostine, R., Vazquez, J., Mose, R., Abdallah, M., Ghenaim A., 2008. *Simulation of subcritical flow at open channel junction*. Adv. in Water Resour., 31: 287-297.
- Naidu, B.J., Bhallamudi, S.M., Narasimhan, S., 1997. *GVF computation in tree type channel networks*. J. Hydraul. Eng., 123(8): 700-708.
- Pantelakis, D., Zissis, T., Anastasiadou-Partheniou, E. and Baltas, E., 2011. *Numerical models for the simulation of overland flow in fields within surface irrigation systems*. Water Resour. Manage, doi 10.1007/s11269-011-9955-2
- Raghunath, H.M., 2006. *Hydrology: Principles, Analysis, Design*. New Age International Limited Publishers Revised Second Edition, New Delhi, 463 pp.
- Rawls, W.J., Brakensiek, D.L., Saxton, K.E., 1982. *Estimation of soil water properties*. Trans of the ASAE 25: 1316-1320.
- Sen, D.J. and Garg, N.K., 2002. *Efficient algorithm for gradually varied flows in channel networks*. J. of Irrig. and Drain. Eng., A.S.C.E., 128 (6): 351-357.
- Singh, V.P., 1996. *Kinematic wave modeling in water resources*. Surface Water Hydrology. John Wiley & Sons Inc, New York, 1399 pp.
- Terzidis, G., 1968. *Discontinuous unsteady flow in open channels*. Ph.D. Dissertation, University of California, Davis
- Παντελάκης, Δ., 2010. *Αριθμητικά μοντέλα υπολογισμού της ροής των στραγγιστικών τάφρων σε περιοχές δικτύων επιφανειακής άρδευσης*. Διδακτορική Διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 230 pp.

**ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΔΙΑΔΙΑΣΤΑΤΩΝ ΚΑΙ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΣΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ
ΕΔΑΦΙΚΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΕ ΚΑΛΛΙΕΡΓΟΥΜΕΝΟ ΑΓΡΟ ΜΕ
ΣΤΑΓΔΗΝ ΑΡΔΕΥΣΗ**

Στυλιανός Α. Κωτσόπουλος, Βασίλειος Ζ. Αντωνόπουλος

Τομέας Εγγείων Βελτιώσεων, Εδαφολογίας και Γεωργικής Μηχανικής
Γεωπονική Σχολή Α.Π.Θ., 54124 Θεσσαλονίκη
skotsop@agro.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία συγκρίνονται και αξιολογούνται δύο μαθηματικά μοντέλα προσομοίωσης της δυναμικής του νερού στο έδαφος υπό συνθήκες στάγδην άρδευσης. Τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται είναι το SWMS_2D και το SWMS_3D, θεωρώντας τη ροή του νερού στο έδαφος διδιάστατη σε κυλινδρικές συντεταγμένες και τριδιάστατη σε καρτεσιανές, αντίστοιχα. Για την αξιολόγηση των μοντέλων χρησιμοποιούνται δεδομένα εδαφικής υγρασίας από έναν αγρό καλλιεργούμενο με ηλίανθο και αρδευόμενο με στάγδην άρδευση. Η σύγκριση των υπολογισμένων τιμών της εδαφικής υγρασίας των δύο μοντέλων με τις μετρημένες τιμές της στον αγρό, έδειξε ότι υπάρχει μεταξύ τους ικανοποιητική συμφωνία και ότι οι διαφορές στα αποτελέσματα των δύο μοντέλων είναι μικρές.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Στάγδην άρδευση, σύγκριση μοντέλων, SWMS_2D, SWMS_3D

**COMPARISON AND EVALUATION OF 2D AND 3D MODELS
SIMULATING SOIL WATER IN CULTIVATED FIELD UNDER
DRIP IRRIGATION**

Stylianos A. Kotsopoulos, Vasillis Z. Antonopoulos

Department of Hydraulics, Soil Science and Agricultural Engineering
School of Agriculture, A.U.Th., 54124 Thessaloniki
skotsop@agro.auth.gr

ABSTRACT

In the present study, two different models in simulating soil water dynamics under drip irrigation are compared and evaluated, against measured values of soil moisture content. The models that were used are the SWMS_2D and SWMS_3D, considering 2D and 3D flow of water in the soil, respectively. The experimental data and measurements referred in a field cultivated with sunflower, under drip irrigation. The comparison between the computed soil moisture from the two models with the measured values showed a good agreement between them and the differences between the two models was negligible.

KEYWORD: drip irrigation, 3D flow, model comparison, SWMS_2D, SWMS_3D

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η άρδευση με σταγόνες είναι σήμερα μία από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους, ειδικά σε περιοχές με ξηρό και ημίξηρο κλίμα. Παρ' όλη την ευρεία εφαρμογή της μεθόδου και την εκτενή μελέτη της ως προς την αποδοτικότητα εφαρμογής της (Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη κ.α., 2006), η πολυδιάστατη φύση της ροής του νερού πέριξ του σταλακτήρα αποτελούσε ανέκαθεν ανασταλτικό παράγοντα για την αριθμητική προσέγγιση του προβλήματος από τους ερευνητές. Τα τελευταία χρόνια η παράλληλη αύξηση της υπολογιστικής ισχύος των προσωπικών Η/Υ και η ανάπτυξη λογισμικών φιλικών προς τον χρήστη, συνετέλεσε στο όλο και περισσότεροι ερευνητές να κάνουν χρήση των αριθμητικών μοντέλων στην επίλυση πρακτικών προβλημάτων στον αγρό.

Η γεωμετρία της ροής του νερού στο έδαφος υπό συνθήκες στάγδην άρδευσης είναι τριδιάστατη, κυρίως λόγω της ανομοιομορφης εφαρμογής του νερού άρδευσης στην επιφάνεια του εδάφους και της χωρικής μεταβλητότητας των υδραυλικών ιδιοτήτων του. Υπό συγκεκριμένες συνθήκες και παραδοχές η ροή μπορεί να θεωρηθεί ότι εμφανίζει αξονική συμμετρία και να αντιμετωπιστεί ως διδιάστατη σε κυλινδρικές συντεταγμένες (Ελμαλόγλου και Γρηγοράκης, 1993) και μονοδιάστατη σε σφαιρικές, συνθήκες που στον αγρό δεν πληρούνται ούτε στο ελάχιστο, καθιστώντας την χρήση τριδιάστατων μοντέλων σχεδόν αναγκαστική. Από την άλλη η εφαρμογή των τριδιάστατων μοντέλων για την επίλυση πρακτικών προβλημάτων είναι πιο πολύπλοκη και σίγουρα πιο χρονοβόρα σε σχέση με τα διδιάστατα.

Στην μελέτη που ακολουθεί γίνεται η προσομοίωση της εδαφικής υγρασίας και ο υπολογισμός του υδατικού ισοζυγίου σε αγρό καλλιεργούμενο με ηλιάνθο υπό συνθήκες στάγδην άρδευσης με την χρήση των μοντέλων SWMS_2D και SWMS_3D σε δύο και τρεις διαστάσεις, αντίστοιχα, διερευνώντας τις διαφορές μεταξύ των δύο προσεγγίσεων ως προς την γεωμετρία της ροής του νερού στο έδαφος και τις επιπτώσεις της στον υπολογισμό της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας. Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιούνται τιμές εδαφικής υγρασίας κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου του ηλιάνθου.

2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

2.1 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

Τα μοντέλα SWMS_2D και SWMS_3D αναπτύχθηκαν από το USDA-Salinity Laboratory (Simunek et al., 1993, 1995) και είναι αριθμητικά μοντέλα προσομοίωσης της κίνησης του νερού και της μεταφοράς μάζας των διαλυμένων ουσιών σε πορώδη μέσα μεταβαλλόμενου βαθμού κορεσμού σε δύο και τρεις διαστάσεις, αντίστοιχα. Η κίνηση του νερού στο έδαφος περιγράφεται από την μικτής μορφής εξίσωση του Richards, που έχει ως εξής:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[K \left(K_{ij}^A \frac{\partial h}{\partial x_i} + K_{iz}^A \right) \right] - S(x_i, h) \quad (2.1)$$

όπου θ η περιεχόμενη κατ' όγκο εδαφική υγρασία [L^3L^{-3}], h το ύψος πίεσης [L], K η υδραυλική αγωγιμότητα [LT^{-1}], K_{ij}^A οι συνιστώσες του τανυστή ανισοτροπίας της υδραυλικής αγωγιμότητας του εδάφους, x_i οι διαστάσεις του χώρου [L] με $i = 1, 2$ και $i = 1, 2, 3$, για δύο και τρεις διαστάσεις αντίστοιχα, t ο χρόνος [T] και $S(x_i, h)$ είναι η συνάρτηση πρόσληψης της εδαφικής υγρασίας από τις ρίζες των φυτών [$L^3L^{-3}T^{-1}$].

Η χαρακτηριστική καμπύλη υγρασίας του εδάφους περιγράφεται με την εξίσωση του van Genuchten (van Genuchten, 1980) και η υδραυλική αγωγιμότητα με τη σχέση των Mualem-van Genuchten που δίνονται αντίστοιχα από τις σχέσεις:

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left[1 + (a|h|)^n \right]^{-m} \quad (2.2)$$

$$K(Se) = K_s Se^{1/2} \left[1 - (1 - Se^{1/m})^m \right]^2 \quad (2.3)$$

όπου θ_s είναι η εδαφική υγρασία κορεσμού [$L^3 L^{-3}$], θ_r είναι η υπολειμματική υγρασία [$L^3 L^{-3}$], K_s είναι η υδραυλική αγωγιμότητα κορεσμού [LT^{-1}], $Se = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)^{-1}$ είναι ο αποτελεσματικός βαθμός κορεσμού και a , n , m είναι παράμετροι προσαρμογής.

Η πρόσληψη της εδαφικής υγρασίας από τις ρίζες των φυτών, περιγράφεται ως συνάρτηση της μέγιστης πρόσληψης της εδαφικής υγρασίας από το φυτό και του περιοριστικού παράγοντα $a(h)$ λόγω υδατικής καταπόνησης (Feddes, 1978). Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται είναι οι εξής (Vrugt et al., 2001):

$$S(x_i, h) = a(h) S_{\max}(x_i) \quad (2.4)$$

$$S_{\max}(x_1, x_2, x_3) = x_1 x_2 \beta(x_1, x_2, x_3) T_{\text{pot}} \left[\int_0^{x_i} \beta(x_1, x_2, x_3) dx_1 dx_2 dx_3 \right]^{-1} \quad (2.5)$$

$$S_{\max}(x_1, x_2) = \pi x_1^2 \beta(x_1, x_2) T_{\text{pot}} \left[\int_0^{x_i} \beta(x_1, x_2) dx_1 dx_2 \right]^{-1} \quad (2.6)$$

$$\beta(x_i) = \prod_{i=1}^n (1 - x_i(t) / x_{i\max}) + c \quad (2.7)$$

όπου $S(x_i, h)$ είναι η πρόσληψη της εδαφικής υγρασίας από τα φυτά, $S_{\max}(x_i)$ είναι η μέγιστη κανονικοποιημένη πρόσληψη της εδαφικής υγρασίας [$L^3 L^{-3} T^{-1}$], T_p είναι η δυναμική διαπνοή [LT^{-1}], $\beta(x_i)$ είναι η συνάρτηση πυκνότητας των ριζών στο έδαφος [-], $x_{i\max}$ είναι το μέγιστο μήκος των ριζών σε κάθε χωρική διάσταση, $n = 2, 3$ και c είναι μία παράμετρος προσαρμογής. Η συνάρτηση $x_i(t)$ εκφράζει το μήκος των ριζών σε κάθε διάσταση του χώρου και σε κάθε χρονική στιγμή και δίνεται από την λογιστική εξίσωση (Αντωνόπουλος, 1999):

$$x_i(t) = x_{i\max} / (1 + a \exp(-b(t - t_0))) \quad (2.8)$$

όπου t_0 είναι η ιουλιανή ημέρα σποράς [T^{-1}], a και b είναι παράμετροι προσαρμογής.

Για την εκτίμηση της δυναμικής εξάτμισης και της διαπνοής χρησιμοποιείται η διαδικασία διαχωρισμού της δυναμικής εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας στις δύο

συνιστώσες της, με την βοήθεια του δείκτη φυλλικής επιφάνειας, σύμφωνα με την οποία (Belmans et al., 1983, Αντωνόπουλος, 1999):

$$E_p = ET_c \exp(-0.623LAI_t) \quad (2.9)$$

$$T_p = ET_c - E_p \quad (2.10)$$

όπου ET_c είναι η δυναμική εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας (LT^{-1}), E_p είναι η δυναμική εξάτμιση (LT^{-1}), T_p είναι η δυναμική διαπνοή (LT^{-1}) και LAI_t είναι ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας στον χρόνο t (L^2L^{-2}).

Η επίλυση της εξίσωσης (1) στον χώρο γίνεται με την κλασική Galerkin μέθοδο (Simunek et al., 1993, 1995) των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιώντας γραμμικά τριγωνικά και τετραεδρικά στοιχεία για την διδιάστατη και τριδιάστατη μορφή της αντίστοιχα, ενώ η επίλυση στον χρόνο γίνεται χρησιμοποιώντας ένα πεπλεγμένο σχήμα προσέγγισης πίσω διαφορών των χρονικών παραγώγων.

2.2 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων των μοντέλων αξιολογείται χρησιμοποιώντας τα στατιστικά κριτήρια του σφάλματος του τετραγώνου των αποκλίσεων (RMSE), της αποδοτικότητας του μοντέλου (EF) και του συντελεστή του ελλείμματος μάζας (CRM). Η άριστη τιμή τους, είναι 0 εκτός από την αποδοτικότητα του μοντέλου που είναι η μονάδα (Loague and Green, 1991). Όταν η τιμή του συντελεστή ελλείμματος μάζας είναι αρνητική, υποδηλώνει υπερεκτίμηση της εδαφικής υγρασίας, ενώ αντίθετα όταν είναι θετική υποδηλώνει υποεκτίμηση. Όταν η τιμή αποδοτικότητας του μοντέλου είναι αρνητική, τότε ο μέσος όρος περιγράφει τα δεδομένα με μεγαλύτερη ακρίβεια.

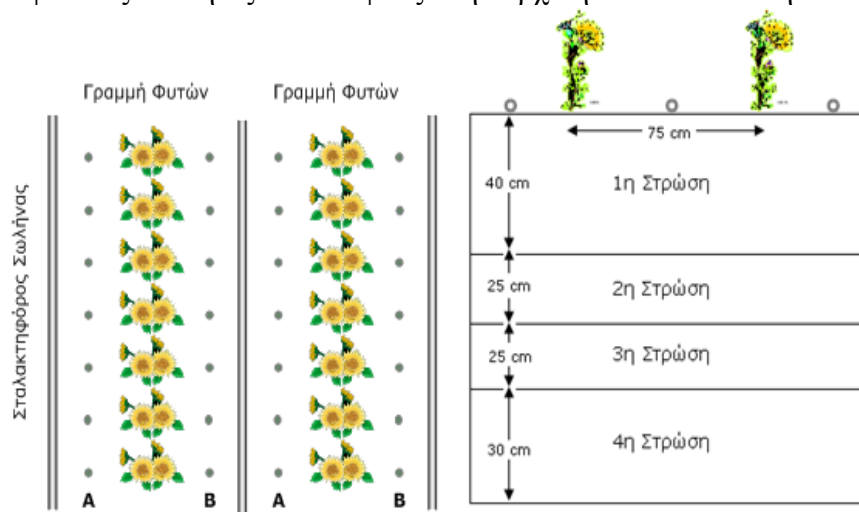
3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

3.1 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ ΚΑΙ ΣΤΑ ΦΥΤΑ

Τα πειραματικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση της δυναμικής του νερού και τον υπολογισμό του υδατικού ισοζυγίου στον αγρό προέρχονται από τους Rahil and Antonopoulos (2007) και αφορούν μετρήσεις σε καλλιέργεια ηλίανθου. Το πείραμα διεξήχθη στον πειραματικό αγρό του I.E.B. στην Σίνδο την χρονική περίοδο από τον Απρίλιο του 2003 έως και τον Μάρτιο του 2004. Η σπορά του ηλίανθου έγινε στις 30 Απριλίου 2003 με αποστάσεις μεταξύ των γραμμών 0.75 m και μεταξύ των φυτών 0.3 m. Για την εφαρμογή του νερού στο έδαφος χρησιμοποιήθηκε σύστημα στάγδην άρδευσης, με αγωγούς εφαρμογής, διαμέτρου Φ 20, ανάμεσα στις γραμμές των φυτών. Η πίεση, η παροχή και η απόσταση μεταξύ των σταλακτήρων ήταν 10 m, 4 L/h και 33 cm, αντίστοιχα.

Οι φυσικές ιδιότητες του εδάφους μετρήθηκαν σε δείγματα εδάφους σε τέσσερα βάθη (0-40, 40-65, 65-90 και 90-120 cm) αντιπροσωπευτικά της κάθε στρώσης, σε δύο θέσεις του πειραματικού αγρού, που σημειώνονται ως (A) και (B) και βρίσκονται στο ενδιάμεσο μεταξύ του αγωγού εφαρμογής και της γραμμής των φυτών (Rahil and Antonopoulos, 2007), ενώ καθ' όλη την διάρκεια της βλαστικής περιόδου, στις θέσεις αυτές γινόταν καταγραφή της εδαφικής υγρασίας με την σταθμική μέθοδο. Το έδαφος αποτελείται από τέσσερις ετερογενείς στρώσεις και γενικά χαρακτηρίζεται ως ιλυοπηλώδες από την επιφάνεια μέχρι τα 65 cm και αμμοπηλώδες έως πηλοαμμώδες

από τα 65 cm έως τα 120 cm. Τα παραπάνω συνοψίζονται στο Σχήμα 1. Στον Πίνακα 1 δίνονται οι φυσικές ιδιότητες του εδάφους στην αρχική του κατάσταση.



Σχήμα 1. Κάτοψη και τομή του πειραματικού αγρού

Ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας (LAI) προσδιορίστηκε στον αγρό με το σύστημα Sun Scan Canopy Analysis κάθε δύο εβδομάδες. Η μέγιστη τιμή του LAI για τον ηλιάνθο ήταν $5.1 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ μετά τη πάροδο 65 ημερών από τη σπορά, με πυκνότητα φυτών $53,000 \text{ ha}^{-1}$. Η κατανομή και το βάθος του ριζικού συστήματος του ηλιάνθου προσδιοριζόταν κάθε δυο εβδομάδες με παρατήρηση του αποσπασμένου ριζικού συστήματος. Η μέτρηση του βάθους του ριζικού συστήματος έδειξε αύξηση του σε 43 cm σε 86 ημέρες από τη σπορά, με τη μεγαλύτερη κατανομή του στα πρώτα 30 cm εδάφους.

Πίνακας 1. Φυσικές ιδιότητες του εδάφους στην αρχική του κατάσταση

Παράμετροι	Στρώσεις του εδάφους (cm)			
	0-40	40-65	65-90	90-120
Άργιλος %	12.90	6.40	15.90	4.00
Ιλύς %	50.90	41.40	53.80	12.90
Άμμος %	36.20	52.20	30.30	83.10
Φαινόμενη Πυκνότητα g/cm^3	1.33	1.26	1.35	1.48
Οργανική Ουσία g/100g soil	1.19	0.67	0.63	0.23

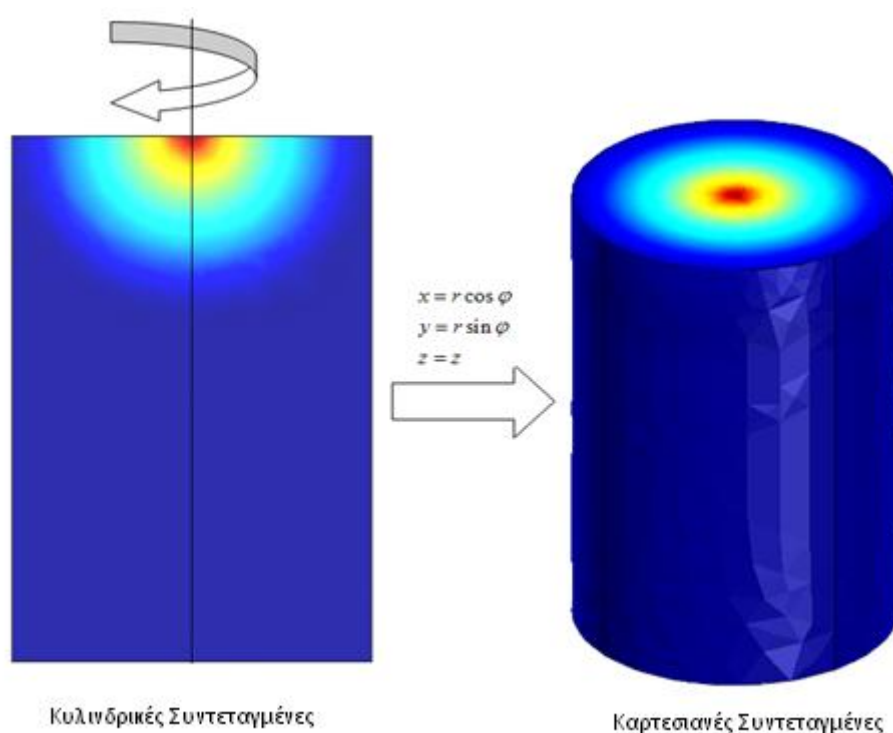
Οι τιμές των παραμέτρων της χαρακτηριστικής καμπύλης και της υδραυλικής αγωγιμότητας κορεσμού προσδιορίστηκαν με την επίλυση του αντίστροφου προβλήματος (Αντωνόπουλος και Κωτσόπουλος, 2009) και δίνονται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2. Τιμές των παραμέτρων των υδραυλικών ιδιοτήτων του εδάφους

Βάθος (cm)	θ_r (cm^3/cm^3)	θ_s (cm^3/cm^3)	α (1/cm)	N (-)	Ks (cm/day)
0-40	0.0411	0.4860	0.0071	1.6806	21.00
40-65	0.0682	0.5830	0.0131	1.7108	331.21
65-90	0.1739	0.5861	0.0057	1.6698	0.15
90-120	0.0526	0.5102	0.0128	1.9788	21.74

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Η περιοχή λύσης του προβλήματος για το τριδιάστατο μοντέλο επιλέχθηκε ούτως ώστε να είναι αντιπροσωπευτική του αγρού υπό κλίμακα και έχει μήκος 38 cm, πλάτος 33 cm και βάθος 120 cm. Στην επιφάνεια του εδάφους οι σταλακτιήρες είναι τοποθετημένοι στην αρχή των αξόνων στο σημείο με συντεταγμένες (x,y,z) $(0,0,0)$ και στο σημείο $(0,33,0)$, ενώ ο βλαστός του ηλιανθου βρίσκεται στο σημείο $(38,0,0)$. Για το διδιάστατο μοντέλο σε κυλινδρικές συντεταγμένες η περιοχή λύσης έχει ακτίνα 38 cm και βάθος 120 cm, με τον άξονα συμμετρίας να διέρχεται από το κέντρο του σταλακτιήρα που βρίσκεται στο σημείο (x,z) $(0,0)$. Λόγω της αξονικής συμμετρίας η προβολή της διδιάστατης επιφάνειας στις καρτεσιανές συντεταγμένες (Σχήμα 2) δημιουργεί έναν όγκο εκ περιστροφής 73% μεγαλύτερο από τον όγκο του τριδιάστατου προβλήματος, οδηγώντας σε μία παρόμοια αναπροσαρμογή τις εισροές λόγω άρδευσης, ούτως ώστε τα δύο μοντέλα να μην έχουν μεταξύ τους καμία διαφορά.

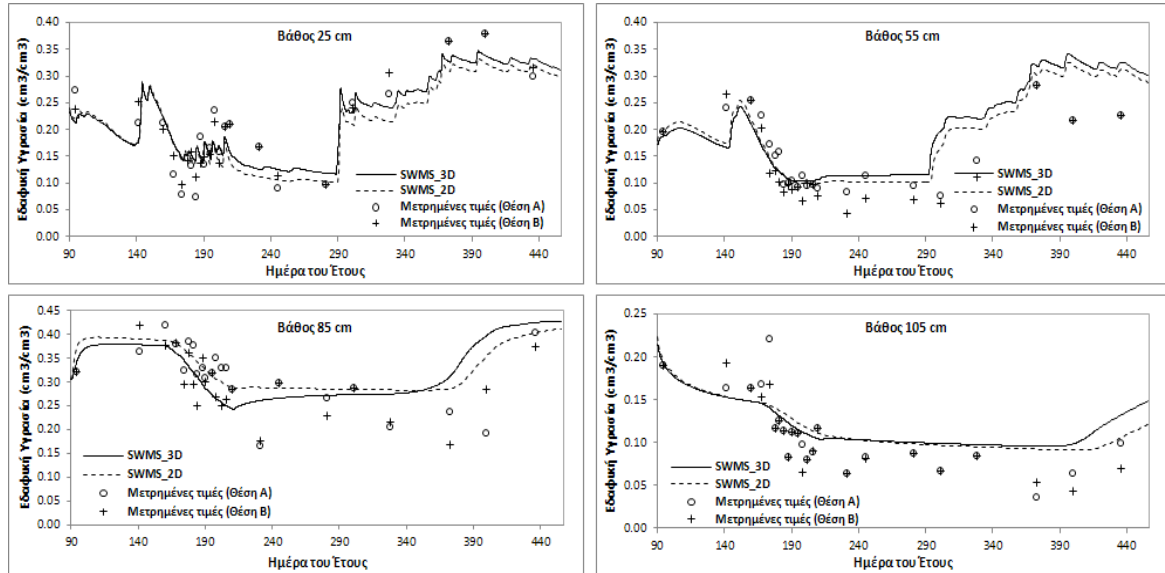


Σχήμα 2. Περιοχή λύσης για το διδιάστατο μοντέλο σε κυλινδρικές και καρτεσιανές συντεταγμένες

Το έδαφος θεωρήθηκε ομογενές και ισότροπο, ως προς το οριζόντιο επίπεδο και διαστρωμένο ως προς το κατακόρυφο. Στο κάτω όριο του εδαφικού προφίλ το έδαφος στραγγίζει ελεύθερα. Η περιοχή λύσης διακριτοποιήθηκε με 39 κόμβους στον άξονα x , με 17 στον άξονα y και 40 στον άξονα z , δηλαδή 1560 κόμβους για τις δύο διαστάσεις και 26520 κόμβους για τις τρεις. Το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων είναι πιο πυκνό σε σημεία όπου αναμένονται απότομες μεταβολές του ύψους πίεσης, όπως στην επιφάνεια του εδάφους και κοντά στον σταλακτιήρα, όπως και στα όρια μεταξύ των εδαφικών στρώσεων. Το χρονικό βήμα που επιλέχθηκε είναι ίσο με 0.1 ημέρα με μέγιστο χρονικό βήμα 1 ημέρα και ελάχιστο 10^{-21} ημέρες, ενώ η περίοδος προσομοίωσης είναι από την 90^η ημέρα του έτους που αντιστοιχεί στην ημερομηνία 1/4/2003 μέχρι την 456^η ημέρα που αντιστοιχεί στην ημερομηνία 31/3/2004.

Στα διαγράμματα του Σχήματος 3 απεικονίζονται οι μετρημένες τιμές της εδαφικής υγρασίας στις δύο θέσεις (A) και (B) για τα αντιπροσωπευτικά βάθη των 25,

55, 85 και 105 cm, με τις αντίστοιχες υπολογισμένες τιμές από τα μοντέλα σε δύο και τρεις διαστάσεις. Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα, οι υπολογισμένες τιμές της εδαφικής υγρασίας ακολουθούν τις χρονικές διακυμάνσεις των μετρημένων τιμών με την ίδια ικανοποιητική ακρίβεια και για τις δύο προσεγγίσεις. Η τριδιάστατη προσέγγιση υπερτερεί στο βάθος των 25 cm όπου είναι πιο ισχυρή η επίδραση του σταλακτήρα, η διδιάστατη προσέγγιση υπερτερεί στα βάθη των 55 και 85 cm, ενώ στο βάθος των 105 cm φαίνεται οι δύο αυτές προσεγγίσεις να είναι ισοδύναμες.



Σχήμα 3. Υπολογισμένες και μετρημένες τιμές της εδαφικής υγρασίας για τα αντιπροσωπευτικά βάθη των 25, 55, 85 και 105 cm κατά τη διάρκεια της βλαστικής περιόδου του ηλιανθού

Οι αποκλίσεις που παρατηρούνται μεταξύ των υπολογισμένων και των μετρημένων τιμών πιθανώς να οφείλονται στην χωρική μεταβλητότητα των υδραυλικών ιδιοτήτων και στην μέθοδο δειγματοληψίας (Rahil and Antonopoulos, 2007). Οι αποκλίσεις αυτές προσδιορίζονται και ποσοτικοποιούνται με τα στατιστικά κριτήρια των οποίων οι τιμές και για τις δύο προσεγγίσεις δίνονται στον Πίνακα 3.

Πίνακας 3. Στατιστικά κριτήρια των μετρημένων και υπολογισμένων τιμών της εδαφικής υγρασίας

Βάθος (cm)	n	RMSE(2D)	RMSE(3D)	EF (2D)	EF (3D)	CRM (2D)	CRM (3D)
		(%)	(%)				
25	23	21.656	18.264	0.726	0.805	0.075	0.034
55	23	31.980	38.869	0.552	0.338	-0.115	-0.149
85	23	15.757	18.234	0.370	0.156	-0.087	-0.020
105	23	24.718	24.841	0.543	0.538	-0.164	-0.149

Από τις τιμές των στατιστικών κριτηρίων μεταξύ των μετρημένων και των υπολογισμένων τιμών επιβεβαιώνονται, όλα αυτά τα οποία γράφτηκαν παραπάνω. Τα μοντέλα περιγράφουν ικανοποιητικά την εδαφική υγρασία σε όλα τα βάθη εκτός του βάθους των 85 cm. Οι αρνητικές τιμές του συντελεστή ελλείμματος μάζας

υποδηλώνουν μία υπερεκτίμηση της εδαφικής υγρασίας από τα μοντέλα στην 2^η, 3^η και 4^η στρώση.

Το υδατικό ισοζύγιο του αγρού εκτιμήθηκε από την εξίσωση του υδατικού ισοζυγίου από τη σχέση (Αντωνόπουλος, 1999):

$$\Delta\theta = P + IR + CR - ET - SRO - DP \quad (4.1)$$

όπου $\Delta\theta$ είναι η ημερήσια μεταβολή της περιεχόμενης υγρασίας του εδάφους, P είναι το ύψος του νερού που εισέρχεται στο έδαφος με τη βροχόπτωση, IR είναι το ύψος του νερού που εισέρχεται στο έδαφος με την άρδευση, CR είναι η ποσότητα του νερού που εισέρχεται στο έδαφος με τριχοειδή ανύψωση από την υπόγεια στάθμη, ET η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας, SRO είναι το ύψος του νερού που χάνεται λόγω επιφανειακής απορροής και DP είναι η απώλεια του νερού λόγω βαθιάς διήθησης.

Από τον υπολογισμό του υδατικού ισοζυγίου προκύπτει ότι η αθροιστική βροχόπτωση και άρδευση της βλαστικής περιόδου ήταν 36.44 cm, ενώ για ολόκληρη την περίοδο προσομοίωσης ήταν 51.83 cm. Η πραγματική διαπνοή και για τις δύο προσεγγίσεις ήταν 21 cm, ενώ η εξάτμιση την βλαστική περίοδο για την διδιάστατη και την τριδιάστατη προσέγγιση ήταν 16.80 και 19.87 cm αντίστοιχα, εμφανίζοντας απόκλιση 3 cm μεταξύ τους. Η απόκλιση που παρατηρείται στην εξάτμιση, οφείλεται στην διαφορετική κατανομή του νερού άρδευσης στην επιφάνεια του εδάφους. Στην τριδιάστατη προσέγγιση η εφαρμογή του νερού της άρδευσης γίνεται ακολουθώντας την διάταξη των σταλακτήρων όπως είναι στην πραγματικότητα. Στην διδιάστατη προσέγγιση το ισοδύναμο νερό των σταλακτήρων διέρχεται από ένα μόνο σημείο λόγω της αξονικής συμμετρίας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η επιφάνεια διαβροχής στην διδιάστατη περίπτωση να είναι μικρότερη από ότι στην τριδιάστατη και ως εκ τούτου τον υπολογισμό χαμηλότερης εξάτμισης από την πραγματική. Ο ισχυρισμός αυτός ενισχύεται ακόμη περισσότερο από το γεγονός ότι το αθροιστικό ποσό της στράγγισης για την διδιάστατη προσέγγιση είναι 1 cm μεγαλύτερη από την αθροιστική στράγγιση της τριδιάστατης.

Τέλος από υπολογιστική σκοπιά, η εκτέλεση του τριδιάστατου μοντέλου για το συγκεκριμένο πρόβλημα απαιτεί χρόνους έως και 145 φορές μεγαλύτερους από το διδιάστατο. Η κατανάλωση πόρων του συστήματος είναι μεγαλύτερη στο τριδιάστατο μοντέλο κατά 1700 % σε αποθηκευτικό χώρο λόγω του όγκου των δεδομένων ενώ η κατανάλωση σε μνήμη RAM ήταν ίδια και στα δύο μοντέλα, καθώς ο αλγόριθμος επίλυσης που χρησιμοποιήθηκε είναι ανεξάρτητος από το μέγεθος του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα της σύγκρισης των δύο διαφορετικών προσεγγίσεων ως προς την γεωμετρία της ροής του νερού στην περιγραφή της χωροχρονικής διακύμανσης της εδαφικής υγρασίας και την εκτίμηση των συνιστωσών του υδατικού ισοζυγίου σε έναν αγρό αρδευόμενο με σύστημα στάγδην άρδευσης, χρησιμοποιώντας τα μαθηματικά μοντέλα SWMS_2D και SWMS_3D έδειξαν ότι:

- Οι αποκλίσεις μεταξύ των δύο μοντέλων ήταν αμελητέες ως προς την προσομοίωση της χωροχρονικής διακύμανσης της εδαφικής υγρασίας.
- Απόκλιση παρατηρήθηκε μόνο ως προς τον υπολογισμό των συνιστωσών του υδατικού ισοζυγίου και κυρίως στην εξάτμιση, με την διδιάστατη προσέγγιση να

την υποεκτιμά λόγω της διαφορετικής κατανομής του αρδευτικού νερού στην επιφάνεια του εδάφους.

- Υπολογιστικά η εφαρμογή του SWMS_3D απαιτεί περισσότερους πόρους συστήματος και μεγαλύτερους χρόνους εκτέλεσης.
- Προτείνεται η χρησιμοποίηση του SWMS_2D για την επίλυση πρακτικών προβλημάτων αρδεύσεων στον αγρό, λόγω της μικρότερης κατανάλωσης του σε υπολογιστικούς πόρους, αλλά με ιδιαίτερη επιφύλαξη στην εκτίμηση του των συνιστωσών του υδατικού ισοζυγίου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Αντωνόπουλος, Β., 1999. *Υδρολογία της Ακόρεστης Ζώνης του Εδάφους*, Έκδοση Υπηρεσία Δημοσιευμάτων Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, σελ. 265.
- Αντωνόπουλος, Β. και Κωτσόπουλος, Σ., 2009. *Προσομοίωση της δυναμικής του εδαφικού νερού σε αγρό υπό συνθήκες στάγδην άρδευσης με το μαθηματικό μοντέλο SWMS_3D*. 6^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Εταιρίας Γεωργικών Μηχανικών Ελλάδος, 35-42.
- Belmans, C., Wesseling J.G. and Feddes R.A., 1983. *Simulation of the water balance of a cropped soil: SWATRE*, Journal of Hydrology, 63: 271-286.
- Ελμαλόγλου, Σ., και Γρηγοράκης, Γ., 1993. *Ανάλυση της τοπικής διήθησης από: 1. Σημειακή επιφανειακή πηγή στάγδην άρδευσης, 2. Γραμμική επιφανειακή πηγή στάγδην άρδευσης*. Υδροτεχνικά Τόμος 3, Τεύχος 1: 59-74.
- Ζήσης, Θ. και Τερζίδης, Γ., 1995. *Διδιάστατη ροή σε κορεσμένο-ακόρεστο έδαφος*. Πρακτικά 6^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης, Θεσσαλονίκη, σελ. 189-196.
- Feddes, R.A., Kowalik P.J. and Zaradny H., 1978. *Simulation of field water use and crop yield*. Pudoc, Simulation Monographs, Wageningen, The Netherlands, 189 p.
- Huyakorn, P.S., Springer, E.P., Guvanasen, V. and Wadsworth, T.D., 1986. *A three dimensional finite element model for simulating water flow in variably saturated porous media*. Water Resources. Research., 22: 1790-1808.
- Loague, K. and Green R.E., 1991. *Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: Overview and application*. Journal of Contaminant Hydrology, 7: 51-73.
- Rahil, M.H. and Antonopoulos, V.Z., 2007. *Simulating soil water flow and nitrogen dynamics in a sunflower field irrigated with reclaimed wastewater*. Agricultural Water Management, 92:142 – 150.
- Σακελλαρίου-Μακρραντωνάκη Μ., Βλάχος Β., Παπανικολάου Χ., 2006. *Επίδραση διαφορετικών διατάξεων στάγδην άρδευσης στην ανάπτυξη και απόδοση του βάμβακος*. Πρακτικά 10^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης, Ξάνθη, σελ. 637-644.
- Simunek, J., Vogel, T. and van Genuchten, M. Th. 1994. *The SWMS-2D Code for Simulating Water Flow and Solute Transport in Two-Dimensional Variably*

Saturated Media. Version 1.21. Research Report No. 132, USDA-ARS U.S. Salinity Laboratory, Riverside, California.

Simunek, J., Huang, K., and van Genuchten, M. T. 1995. *The SWMS-3D code for simulating water flow and solute transport in three-dimensional variable-saturated media*. Rep. No. 139, U.S. Salinity Laboratory, U.S. Dept. of Agriculture, Agricultural Research

Simunek, J., van Genuchten, M. Th. and Sejna, M. (2005). *The HYDRUS-1D software package for simulating the movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media*, version 3.0, HYDRUS software series 1. Riverside, CA: Department of Environmental Sciences, University of California Riverside.

Van Genuchten, M.Th., 1980. *A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils*. Soil Science Society of America Journal, 44: 892–898.

Vrugt, J.A., Hopmans, J.W. and Simunek, J., 2001. *Calibration of a two dimensional root water uptake model*. Soil Science Society of America Journal, 65 (4) 1027–1037.

ΣΧΕΣΗ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΤΟΜΑΤΑΣ

Δ. Καλφούντζος, Μ. Κόκκορα, Π. Βύρλας.

Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα (Τ.Ε.Ι.) Λάρισας,
Σχολή Τεχνολογίας Γεωπονίας, Τμήμα Μηχανικής Βιοσυστημάτων,
41110 Λάρισα, e-mail:dkalf@teilar.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ορισμένοι από τους πλέον βασικούς παράγοντες που πρέπει να ικανοποιούνται για την επίτευξη της βέλτιστης παραγωγής βιομηχανικής τομάτας και την εξασφάλιση προϊόντος εξαιρετικής ποιότητας είναι η επάρκεια νερού και θρεπτικών συστατικών και η ηλιοφάνεια. Στην παρούσα εργασία σχετίζεται η παραγωγή υπαίθριας βιομηχανικής τομάτας στην κεντρική Ελλάδα με το νερό άρδευσης που εφαρμόζεται με το σύστημα της στάγδην άρδευσης. Από τα πειραματικά δεδομένα προκύπτει θετική συσχέτιση του αρδευτικού νερού με την παραγωγή και ορισμένα από τα ποιοτικά χαρακτηριστικά τα οποία εξετάστηκαν. Τα αποτελέσματα μπορούν να αξιοποιηθούν στη βέλτιστη χρήση του αρδευτικού νερού της περιοχής.

RELATION BETWEEN INDUSTRIAL TOMATO PRODUCTION AND IRRIGATION

D. Kalfountzos, M. Kokkora, P. Vyrlas.

Department of Biosystems Engineering,
School of Agricultural Technology,
Technological Education Institute (TEI) of Larissa,
41110, Larissa, Greece, e-mail:dkalf@teilar.gr

ABSTRACT

Some of the most key factors that must be met to achieve optimal processing tomato production and ensure high quality product is the sufficient water and nutrients and sunlight. This paper presents the relation of the production of industrial tomatoes in central Greece with the irrigation water applied by a drip irrigation system. The experimental data show a positive correlation between the irrigation water and the crop production and also with some of the crop qualitative characteristics. The results can be exploited in the effort for the optimum use of the irrigation water in the area.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εξάρτηση της γεωργικής παραγωγής από τη συχνότητα και την ποσότητα του νερού άρδευσης έχει διερευνηθεί από πάρα πολλούς ερευνητές (Doorenbos and Kassam, 1979, Κωτσόπουλος κ.α., 1999). Κατά καιρούς έχουν διατυπωθεί σχετικές εξισώσεις οι οποίες άλλοτε είναι γενικές και άλλοτε αναφέρονται σε ορισμένες περιοχές και καλλιέργειες (Αλεξίου κ. α., 2000 και Doorenbos and Pruitt, 1977). Από τις πιο εντατικές χρήσεις γεωργικής γης από την άποψη της άρδευσης και της χρήσης χημικών, είναι και η παραγωγή βιομηχανικής τομάτας (Rinaldi et al., 2003). Το ίδιο ενεργοβόρα είναι η συγκεκριμένη καλλιέργεια και από την άποψη της άρδευσης (απαιτούνται περίπου 600 mm). Κατά συνέπεια η βελτιστοποίηση των συνθηκών άρδευσης και λίπανσης της καλλιέργειας βιομηχανικής τομάτας δεν θα πάψει να απασχολεί τους ερευνητές εφόσον η παγκόσμια παραγωγή της βαίνει αυξανόμενη. Συγκεκριμένα το 2009 αυξήθηκε κατά 7% σε σχέση με το 2008 και κατά 15% σε σχέση με το 2007. Το ίδιο συμβαίνει και στην παραγωγή των χωρών μελών της Ε.Ε. όπου τα τελευταία χρόνια παρουσιάζει συνεχή αύξηση. Κυρίαρχη θέση στην παραγωγή κατέχει η Ιταλία με $5,0 \times 10^6$ Mg (2009) και ακολουθεί η Ισπανία με $2,3 \times 10^6$ Mg, η Πορτογαλία με $1,1 \times 10^6$ Mg και η Ελλάδα με $0,8 \times 10^6$ Mg.

Επομένως είναι σκόπιμο η Ελλάδα βελτιστοποιώντας τις συνθήκες παραγωγής της εν λόγω καλλιέργειας, να γίνει πιο ανταγωνιστική σε ένα προϊόν του οποίου η ζήτηση αυξάνεται παγκόσμια. Όσον αφορά στην ποιότητα της βιομηχανικής τομάτας, μεταξύ των κυριότερων επιθυμητών χαρακτηριστικών τα οποία θα πρέπει να χαρακτηρίζουν την παραγωγή της, είναι η υψηλή περιεκτικότητα σε διαλυτά στερεά συστατικά, η χαμηλή οξύτητα, η αντοχή στη μεταφορά, η υψηλή παραγωγικότητα και το υψηλό ποσοστό καρπών 1^{ης} κατηγορίας (Goose and Binsted, 1964).

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα της βιομηχανικής τομάτας είναι εσωγενείς (ποικιλία κλπ) και εξωγενείς (περιβάλλον και διαχείριση). Στο περιβάλλον, ανήκουν εδαφικές και κλιματολογικές συνθήκες. Στη διαχείριση, είναι ο τρόπος καλλιέργειας, η εποχή συγκομιδής, η δόση και η συχνότητα άρδευσης κ. α. δηλαδή τεχνικές οι οποίες χωρίς να επιβαρύνουν ιδιαίτερα τις εισροές της καλλιέργειας, συντελούν σε υψηλές αποδόσεις. Η συγκομιδή (χειρωνακτική ή εκμηχανισμένη) της βιομηχανικής τομάτας στην Ελλάδα, πραγματοποιείται το 3^ο δεκαήμερο του Ιουλίου (πρώιμες ποικιλίες), τον Αύγουστο-Σεπτέμβριο (μεσο-πρώιμες ποικιλίες) και τον Οκτώβριο (όψιμες ποικιλίες), με μικρές αποκλίσεις ανάλογα με τις εκάστοτε εδαφοκλιματικές συνθήκες (Μπουλέκου Σ., 2010).

Στην παρούσα εργασία διερευνάται η επίδραση της ποσότητας του αρδευτικού νερού και του τρόπου άρδευσης (επιφανειακή ή υποεπιφανειακή) στην ποιότητα της βιομηχανικής τομάτας στο Ν. Λάρισα. Διερευνήθηκαν τα επίπεδα εφαρμογής αρδευτικού νερού με τη μέθοδο της στάγδην άρδευσης και τα κλιματικά δεδομένα λήφθηκαν από τον εγκαταστημένο αυτόματο τηλεμετρικό μετεωρολογικό σταθμό του ΤΕΙ Λάρισας, με αντικειμενικό σκοπό τη βέλτιστη αξιοποίηση του αρδευτικού νερού.

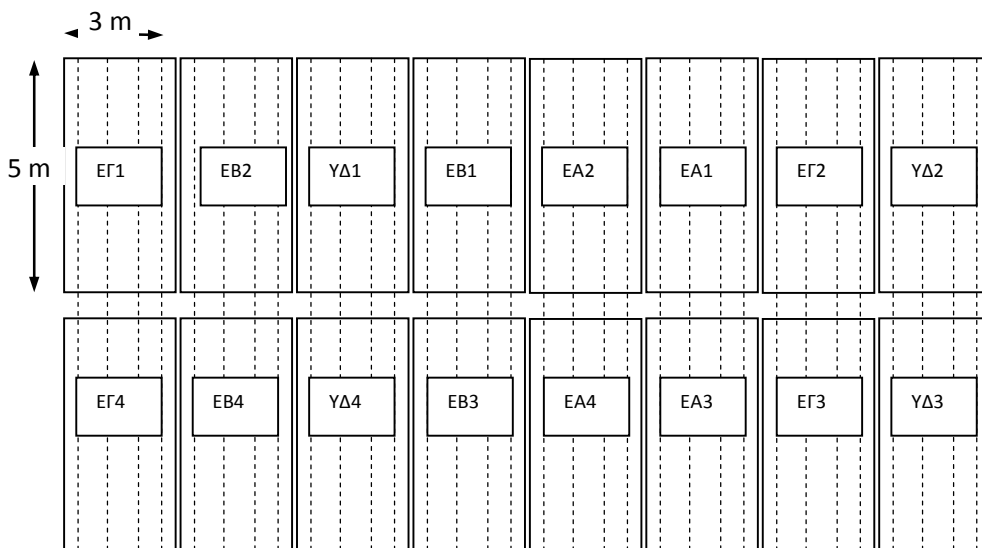
2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Το αρδευτικό δίκτυο αποτελούνταν από τον κύριο αγωγό μεταφοράς από PE Φ32/6 Atm και από δευτερεύοντες αγωγούς PE Φ20/6 Atm. Οι σταλακτηφόροι σωλήνες της επιφανειακής και υποεπιφανειακής στάγδην άρδευσης είχαν ισαποχή 1,5 m, μήκος 5 m και ήταν τύπου NAAN PC/Φ16 της εταιρείας Andritech, με ενσωματωμένους σταλάκτες. Οι σταλάκτες ήταν αυτορυθμιζόμενοι και αυτοκαθαριζόμενοι, ισαποχής 0,70 m, παροχής $2,2 \text{ l h}^{-1}$ σε πίεση λειτουργίας από 0,5

έως 3,5 Atm, με διπλό μηχανισμό αυτοκαθαρισμού και δύο κανάλια εξόδου ώστε να αποφεύγεται η έμφραξη. Μεταξύ της κύριας γραμμής και των γραμμών άρδευσης παρεμβάλλονταν μία ηλεκτροβάννα για τον έλεγχο της ροής στο σύστημα και ένας υδρομετρητής. Μετά το φίλτρο σήτας παρεμβάλλονταν ένας συλλέκτης. Ο συλλέκτης περιελάμβανε 4 ηλεκτροβάννες και 4 υδρομετρητές. Σε κάθε γραμμή του συστήματος υπήρχε ρυθμιστής πίεσης, κι έτσι το σύστημα λειτουργούσε με σταθερή πίεση 18 m. Κάθε ηλεκτροβάννα με τον υδρομετρητή της συνδέθηκε με δύο γραμμές άρδευσης που τροφοδοτούσαν δύο πειραματικά τεμάχια. Κάθε πειραματικό τεμάχιο επιφανειακής στάγδην άρδευσης είχε 2 σταλακτηφόρους σωλήνες (Σχήμα 1). Από τις ενδείξεις των υδρομετρητών και την έκταση του κάθε πειραματικού τεμαχίου υπολογίζονταν το ύψος του εφαρμοζόμενου νερού. Επίσης πάντα καταγράφονταν και η διάρκεια της άρδευσης για κάθε μεταχείριση. Εφαρμόστηκαν τέσσερις επεμβάσεις άρδευσης:

Τρεις επιφανειακές με εφαρμοζόμενα ποσοστά 100% (Α), 75% (Β) και 55% (Γ) της εξατμισοδιαπνοής και μία υποεπιφανειακή με ποσοστό 75% της εξατμισοδιαπνοής. Στην τελευταία μεταχείριση ο σταλακτηφόρος σωλήνας εγκαταστάθηκε σε βάθος 15 cm από την επιφάνεια του εδάφους. Τα πειραματικά τεμάχια που φαίνονται στο Σχήμα 1 χαρακτηρίζονται από δύο γράμματα και έναν αριθμό. Το πρώτο γράμμα χαρακτηρίζει το σύστημα (Ε για το επιφανειακό, Υ για το υποεπιφανειακό), το δεύτερο το επίπεδο άρδευσης και ο αριθμός τον αριθμό της επανάληψης. Οι διαστάσεις κάθε πειραματικού τεμαχίου ήταν $5 \times 3 = 15 \text{ m}^2$. Το πειραματικό σχέδιο περιλάμβανε τυχαιοποιημένες ομάδες με τέσσερις επαναλήψεις.



Σχήμα 1. Σχηματική διάταξη πειραματικών τεμαχίων καλλιέργειας βιομηχανικής τομάτας αγροκτήματος Λάρισας.

2.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Για την υλοποίηση του ερευνητικού προγράμματος εγκαταστάθηκε πειραματικός αγρός βιομηχανικής τομάτας στη Λάρισα (αγρόκτημα ΤΕΙ) που αρδεύεται με στάγδην άρδευση και εφαρμόζονται διάφορα επίπεδα άρδευσης στα πειραματικά τεμάχια. Από τις αναλύσεις των δειγμάτων εδάφους και την ταξινόμησή του (Πίνακας 1) προέκυψε ότι είναι αργιλώδες και ανήκει στην υποομάδα των Vertic Chromoxerert των Vertisols.

Με βάση τον αρχικό σχεδιασμό για την εφαρμογή των αρδεύσεων λαμβάνονται υπόψη εδαφολογικά στοιχεία (FC, PWP, διηθητικότητα). Η εφαρμογή των αρδεύσεων ακολουθεί την εφαρμοζόμενη στην περιοχή πρακτική και διενεργείται όταν έχει

εξαντληθεί από το βάθος του ριζοστρώματος ποσότητα νερού περίπου ίση με την ωφέλιμη υγρασία (Παπαζαφειρίου, 1984) στα πλέον αρδευόμενα πειραματικά τεμάχια.

Πίνακας 1. Φυσικές και χημικές ιδιότητες του εδάφους

Βάθος (cm)	Μηχανική σύσταση				ΦΕΒ g/cm ³	ΥΙ % κ.ο	ΣΜ % κ.ο
	Άμμος %	Ιλύς %	Αργίλος %	Χαρμός			
0-30	32	22	46	C	1,24	40,01	27,35
30-60	33	19	48	C	1,30	41,03	28,52
60-90	33	18	49	C	1,43	41,58	29,10

Βάθος (cm)	CaCO ₃ %	pH H ₂ O 1:1	P ppm	K meq/100g εδ.	CEC meq/100g εδ.
0-30	0,73	7,9	27,8	0,99	41,87
30-60	0,24	7,2	11,3	0,78	47,07
60-90	0,57	7,5	8,8	0,78	46,49

Τα φυτά βιομηχανικής τομάτας (υβρίδιο *Heinz S3402*) μεταφυτεύτηκαν στο στάδιο των 6-7 πραγματικών φύλλων στο έδαφος, στις 3 Μαΐου. Κάθε πειραματικό τεμάχιο περιλαμβάνει τέσσερις σειρές βιομηχανικής τομάτας σε αποστάσεις 0,45 m μεταξύ των δίδυμων γραμμών και 1,0 m μεταξύ τους. Η θρέψη περιελάμβανε την επιφανειακή εφαρμογή 15 Kg/στρ. (33,5-0-0) ήτοι 5,3 μονάδων αζώτου επί της γραμμής στις 27-5-2011 και 60 Kg/στρ. (24-4-4), (N-P-K) σε τέσσερις δόσεις με υδρολίπανση σε όλες τις μεταχειρίσεις. Έγινε μία εφαρμογή του μυκητοκτόνου Ridomil Cold MZ 68 VG, (δ.ο. metalaxyl-M και S-isomer 64%), σε δοσολογία 200 g/100 λίτρα νερού στις 3-7-2011 και μία εφαρμογή του εντομοκτόνου Decis 2,5EC, (δ.ο. deltamethrin 2,5% SC), σε δοσολογία 30 cc/100 λίτρα νερού στις 11-5-2011, στο πλαίσιο της φυτοπροστασίας.

Η συγκομιδή πραγματοποιήθηκε στο κόκκινο στάδιο ωρίμανσης σύμφωνα με την κατάταξη του USDA (1997), την 25η Αυγούστου χειρωνακτικά. Από κάθε επανάληψη του πειράματος συλλέχθηκε και ζυγίστηκε χωριστά για κάθε γραμμή η παραγωγή 10 φυτών. Για κάθε πειραματικό τεμάχιο και κάθε επανάληψη εξετάστηκαν τα ποιοτικά χαρακτηριστικά της βιομηχανικής τομάτας στο Εργαστήριο Ποιότητας Γεωργικών Προϊόντων του Τμήματος Μηχανικής Βιοσυστημάτων του ΤΕΙ Λάρισας.

Για την εύρεση της εμπορεύσιμης και μη (πράσινη-σάπια) παραγωγής ανά πειραματικό τεμάχιο και μεταχείριση συγκομίστηκε μόνο η παραγωγή των 10 μεσαίων φυτών των δύο μεσαίων γραμμών φύτευσης, ενώ για την ανάλυση των δεδομένων που αφορούν στη σύσταση των καρπών (οργανοληπτικά χαρακτηριστικά) χρησιμοποιήθηκε το πλήρως τυχαιοποιημένο σχέδιο, με τέσσερις επαναλήψεις ανά μεταχείριση και πέντε όμοιους καρπούς ανά επανάληψη. Η σύγκριση των μέσων όρων έγινε με τεστ πολλαπλών ευρών Duncan, σε επίπεδο σημαντικότητας 0.05 (στατιστικό πακέτο SPSS 10).

2.3 ΥΔΑΤΟΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ

Η εφαρμοζόμενη ποσότητα νερού σε κάθε άρδευση υπολογίζονταν από τα μετεωρολογικά στοιχεία που λαμβάνονταν από τον αυτόματο μετεωρολογικό σταθμό που ήταν εγκατεστημένος εντός του πειραματικού αγρού. Η εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς, ET_o , έγινε με τη χρήση της αναθεωρημένης μεθόδου FAO-56 Penman-Monteith (Allen et al., 1998.M. Theocharis, 2011).

Η ET_o είναι μια κλιματική παράμετρος και υπολογίστηκε από τα μετεωρολογικά δεδομένα που συλλέχθηκαν από τον μετεωρολογικό σταθμό του Εργαστηρίου των Αρδεύσεων.

Το σχήμα 2 παρουσιάζει τα δεδομένα που ανακτήθηκαν από τον μετεωρολογικό σταθμό (μέγιστη και ελάχιστη σχετική υγρασία αέρα, ηλιακή ακτινοβολία, μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία αέρα, ταχύτητας ανέμου) καθώς και τις ημερήσιες τιμές της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς, όπως υπολογίστηκαν με τη χρησιμοποίηση της μεθόδου Penman-Monteith κατά FAO-56.

Η δυναμική εξατμισοδιαπνοή, ET_c , υπολογίστηκε από την εξατμισοδιαπνοή αναφοράς, ET_o και τον απλό φυτικό συντελεστή (Allen et al., 1998) με τη σχέση:

$$ET_c = K_c \cdot ET_o \quad (2.1)$$

όπου K_c , ο φυτικός συντελεστής ο οποίος για το στάδιο (1) διάρκειας 23 ημερών είχε την τιμή 0,6, στο στάδιο (2) διάρκειας 30 ημερών αυξάνονταν γραμμικά από 0,6 έως 1,15, στο στάδιο (3) διάρκειας 42 ημερών ήταν 1,15 και τέλος στο στάδιο (4) διάρκειας 20 ημερών μειώνονταν γραμμικά από 1,15 έως 0,7. Οι μετρήσεις αναφέρονται στην περίοδο Μαΐου - Αυγούστου 2011. Στον πίνακα 2 παρουσιάζονται τα μήκη των σταδίων καθώς και η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας κατά στάδιο ανάπτυξης.

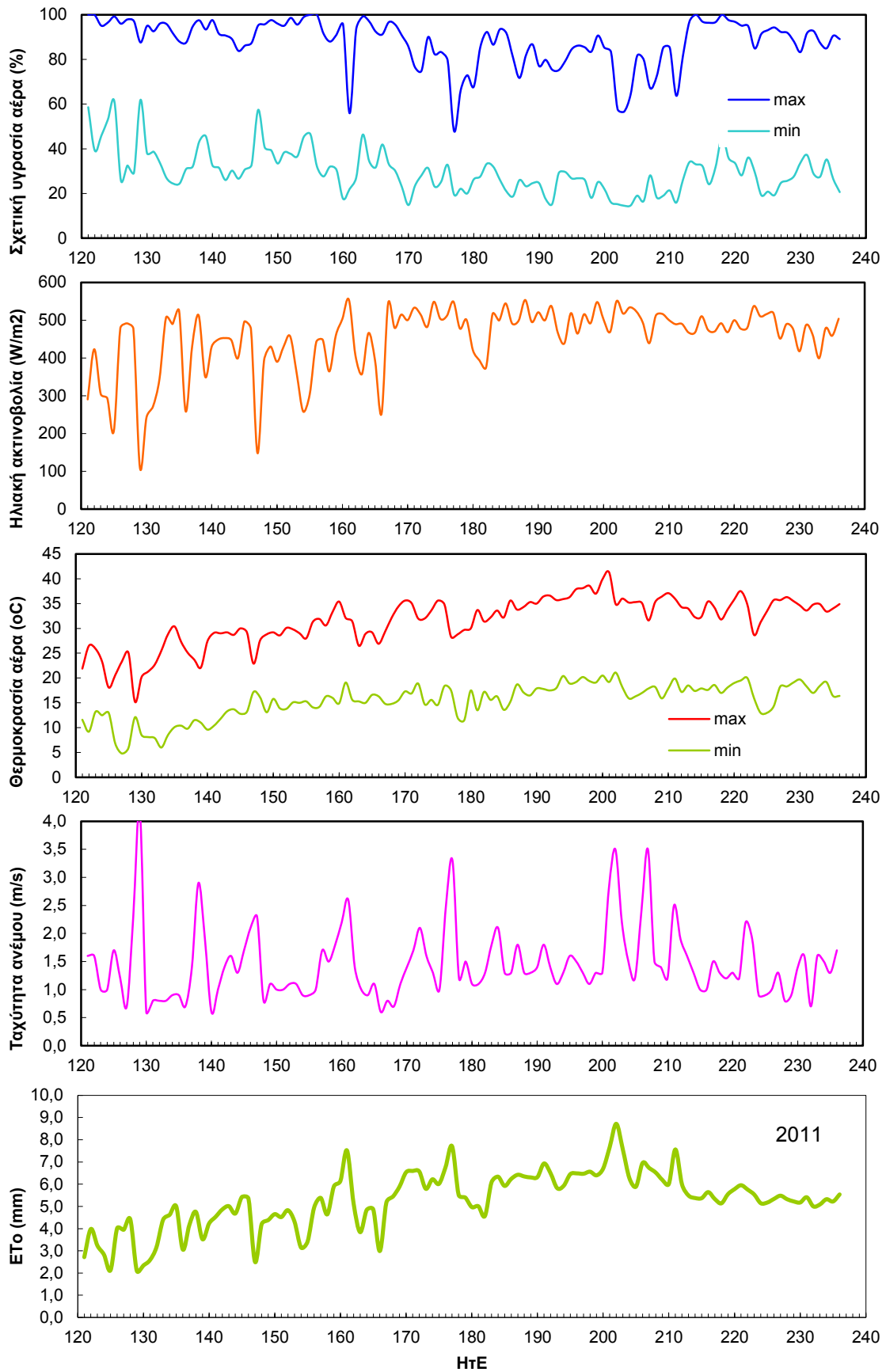
Πίνακας 2. Διάρκεια των σταδίων ανάπτυξης της καλλιέργειας και συνολική εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας κατά στάδιο.

Στάδιο	1	2	3	4	Σύνολο
Μήκος σταδίου (ημέρες)	23	30	42	20	115
ET_c (mm)	51,36	135,46	316,12	109,19	612,13

Μετά τη μεταφύτευση της βιομηχανικής τομάτας έγινε άρδευση για το φυτόμα της καλλιέργειας, με απλούς εκτοξευτήρες και δόση άρδευσης 15 mm. Η συνολική βροχόπτωση κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου ανήλθε σε 33,9 mm. Στον Πίνακα 3, δίνονται τα ύψη άρδευσης καθώς και το συνολικό νερό (άρδευση+βροχή+άρδευση φυτρώματος) για κάθε μεταχείριση του πειράματος.

Πίνακας 3. Συνολικά ύψη άρδευσης για κάθε μεταχείριση, ποσοστό αρδευτικού νερού σε σχέση με το ύψος στη μεταχείριση A και συνολικά ύψη νερού.

Επίπεδο άρδευσης	Σχεδιασμένη άρδευση ως % του A	Άρδευση (mm)	Εφαρμοσμένη άρδευση ως % του A	Σύνολο νερού (mm)
A	100	563,4	100	612,3
B	75	443,1	77	492,0
Γ	50	321,4	57	370,3
Δ	75	438,3	78	487,2

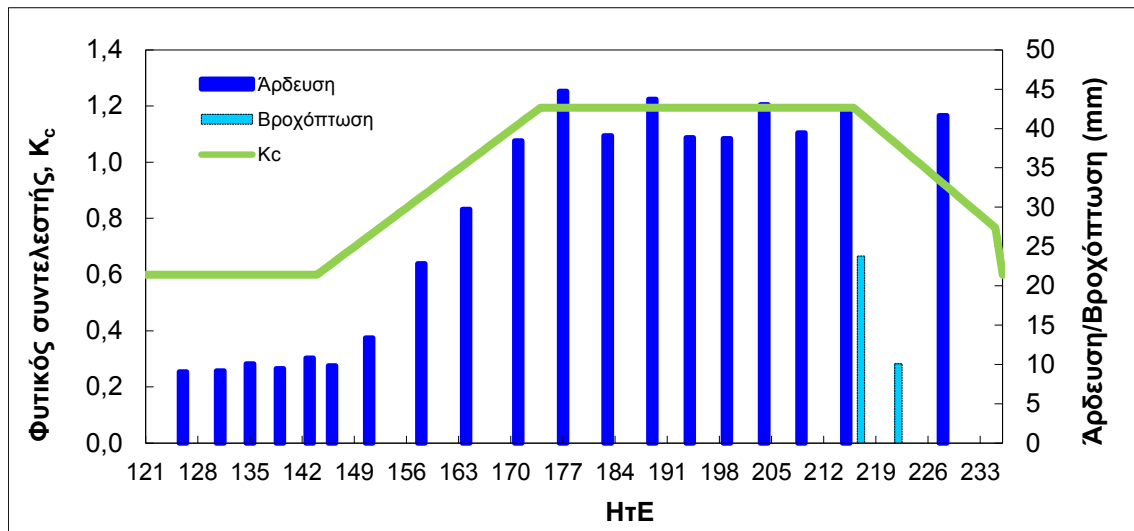


Σχήμα 2. Ημερήσιες τιμές κλιματικών παραμέτρων και ημερήσια εξατμισοδιαπονή αναφοράς για την καλλιεργητική περίοδο του έτους 2011.

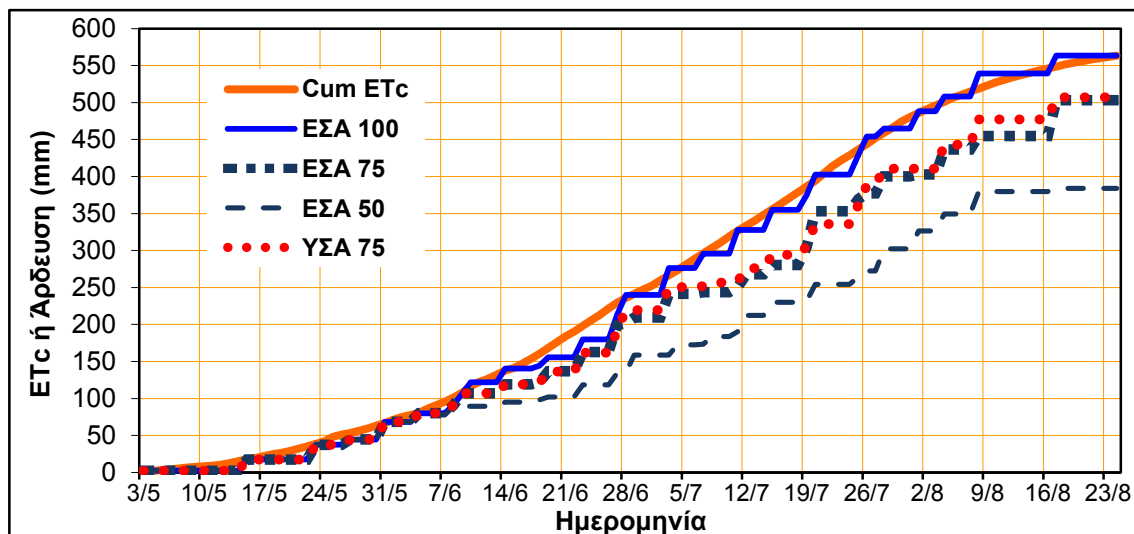
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Από τις τιμές των κλιματικών παραμέτρων (Σχήμα 2) φαίνεται ότι η ταχύτητα του ανέμου επηρεάζει περισσότερο την εξατμισοδιαπνοή αναφοράς και ακολουθεί η μέση θερμοκρασία του αέρα και μετά η ηλιακή ακτινοβολία με την σχετική υγρασία.

Το σχήμα 3 δείχνει πως προγραμματίστηκαν οι αρδεύσεις με βάση το πρόγραμμα του FAO-56, τον φυτικό συντελεστή της καλλιέργειας και την ωφέλιμη βροχόπτωση. Το Σχήμα 4 δείχνει αθροιστικά το ύψος της άρδευσης σε κάθε μεταχείριση σε σχέση με την εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας.



Σχήμα 3. Αρδεύσεις υπολογισμένες από το πρόγραμμα FAO-56



Σχήμα 4. Συνολικό ύψος άρδευσης ανά μεταχείριση του πειράματος σε σχέση με την εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας

Η μεταχείριση με τη μεγαλύτερη ποσότητα αρδευτικού νερού (Α), παρουσίασε τη μεγαλύτερη εμπορεύσιμη παραγωγή ($9,51 \text{ kg m}^{-2}$) και το μεγαλύτερο βάρος καρπού ($45,99 \text{ g}$). Το γεγονός ότι η ίδια μεταχείριση έδωσε και τη μεγαλύτερη απορριπτόμενη παραγωγή (πράσινη= $2,21 \text{ kg m}^{-2}$ και σάπια= $2,95 \text{ kg m}^{-2}$) δεν αποβαίνει τελικά σε βάρος της μεταχείρισης, γιατί ο λόγος της συνολικής εμπορεύσιμης παραγωγής προς την πράσινη, δεν διέφερε στατιστικώς σημαντικά μεταξύ των μεταχειρίσεων ($p=0,077$).

Επειδή η τιμή της βιομηχανικής τομάτας εξαρτάται από το ποσοστό της κόκκινης παραγωγής δηλαδή την αναλογία κόκκινων/πράσινες, έγινε στατιστική επεξεργασία των δειγμάτων ως προς αυτή την παράμετρο (πίν. 4) από την οποία δεν προέκυψαν διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων ($p=0,07$). Επομένως οι διαφορετικές δόσεις άρδευσης δεν βελτιστοποιούν την εκροή της συγκεκριμένης καλλιέργειας ως προς αυτή την ποιοτική παράμετρο της παραγωγής.

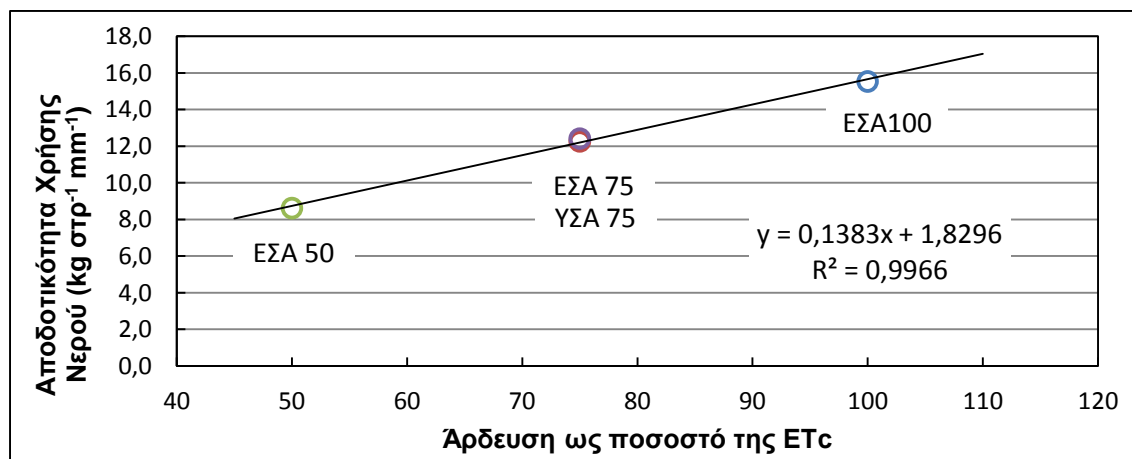
Πίνακας 4. Στοιχεία εμπορεύσιμης και απορριπτόμενης παραγωγής τομάτας, αναλογία κόκκινης/πράσινης και βάρος καρπού.

Μεταχείριση	Επαναλήψεις (# καρπών)	Συνολική εμπορεύσιμη παραγωγή (kg m^{-2})	Απορριπτόμενη παραγωγή (kg m^{-2})		Αναλογία κόκκινης /πράσινης	Βάρος καρπού (g)
			πράσινη	σάπια		
A	4 (323)	9,51a	2,21a	2,95a	4,30	45,99a
B	4 (352)	6,03b	1,29b	2,42ab	4,67	41,53b
Γ	4 (252)	3,19c	1,02b	1,96b	3,12	40,89b
Δ	4 (289)	6,05b	1,75ab	2,00ab	3,45	42,47b
Sig.		<0,05	<0,05	<0,05	0,077	0,000

Η στατιστική ανάλυση πραγματοποιήθηκε με το κριτήριο Duncan ($p<0,05$). Τα διαφορετικά γράμματα δηλώνουν ότι υπάρχουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές.

Η σχέση της παραγωγής με την κατανάλωση νερού αποτελεί ίσως το εγκυρότερο μέτρο αξιολόγησης των μεθόδων και των τεχνικών άρδευσης. Αυτή η σχέση εκφράζεται με την αποδοτικότητα χρήσης νερού, η οποία δίδεται γενικώς από τον λόγο της τελικής απόδοσης της καλλιέργειας προς την ποσότητα νερού που καταναλώθηκε για να επιτευχθεί αυτή η απόδοση.

Στο Σχήμα 5 παρουσιάζεται η αποδοτικότητα του καταναλισκόμενου νερού εκφρασμένη σε χιλιόγραμμα παραγωγής ανά στρέμμα ανά χιλιοστόμετρο αρδευτικού νερού σε σχέση με την εμπορεύσιμη παραγωγή. Έτσι η αποδοτικότητα του αρδευτικού νερού ως προς το βάρος των εμπορεύσιμων καρπών που συγκομίσθηκαν παρουσιάζεται υψηλότερη στην επιφανειακή μεταχείριση με εφαρμογή του 100% της ET_c (μεταχείριση A) με τιμή αποδοτικότητας νερού άρδευσης $15,53 \text{ kg στρ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ και ακολούθησαν οι μεταχειρίσεις της εφαρμογής του 75% της ET_c , η Δ και η Β με 12,42 και 12,26 αντίστοιχως και η μεταχείριση Γ με $8,61 \text{ kg στρ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$. Η αποδοτικότητα είναι ανάλογη του νερού που εφαρμόστηκε ανεξαρτήτως της τεχνικής εφαρμογής (επιφανειακή ή υποεπιφανειακή) παρουσιάζοντας ισχυρή γραμμική σχέση.



Σχήμα 5. Αποδοτικότητα του νερού άρδευσης βιομηχανικής τομάτας.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αν και τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης έρευνας αναφέρονται σε μετρήσεις μιας καλλιεργητικής περιόδου, η εφαρμογή διαφορετικών επιπέδων νερού άρδευσης, φαίνεται ότι επηρέασε την ποσότητα της βιομηχανικής τομάτας. Συγκεκριμένα επηρέασε τη συνολική εμπορεύσιμη παραγωγή και το μέσο βάρος καρπού.

Η αποδοτικότητα είναι ανάλογη του νερού που εφαρμόστηκε ανεξαρτήτως της τεχνικής εφαρμογής (επιφανειακή ή υποεπιφανειακή) παρουσιάζοντας ισχυρή γραμμική σχέση.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. and Smith, M., 1998. *Crop Evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper No 56, FAO, Rome.
- Doorenbos, J and Kassam, A H, 1979. *Yield Response to Water*, FAO Irrigation and Drainage Paper No 33 193 p.
- Doorenbos, J. and Pruitt W. O. 1977. *Crop Water Requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper No 24. 144 p.
- Goose, P.G. and Binsted, R. 1964. *Tomato Paste, Puree, Juice and Powder*, 1st ed Great Britain: Food Trade Press Ltd.
- Menelaos Theocharis, 2011. *Calculation of Reference Crop Evapotranspiration Using the Penman-Monteith Method*. VI EWRA International Symposium - Water Engineering and Management in a Changing Environment, CD-ROM, session 6, paper number 10, ISSN 2038-5854, June 29 - July 2, 2011, Catania, Italy.
- Rinaldi M., G. Trotta, G. Convertini, A.V. Vonella and A. Elia, 2003. *Impiego su pomodoro da industria di fertilizzanti azotati alternativi* L'Informatore Agrario 11, pp 75-78.
- Αλεξίου Ι, Κωτσόπουλος Σ, Καλφούντζος Δ, και Βύρλας Π, 2000. *Εκτίμηση της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής μέσω συναρτήσεων διαθεσιμότητας της εδαφικής υγρασίας*. 8ο Πανελλήνιο Συνέδριο, Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης, Αθήνα, Πρακτικά, 493-500.
- Κωτσόπουλος Σ, Αλεξίου Ι, Καλφούντζος Δ. και Βύρλας Π. 1999. *Σχέσεις νερού και παραγωγής βαμβακιού σε περιοχές της Θεσσαλίας 4ο Εθνικό Συνέδριο ΕΕΔΥΠ Βόλος, Πρακτικά Τεύχος Α', 177-182.*
- Μπουλέκου Σ., 2010. *Μελέτη της επίδρασης των παραμέτρων της διεργασίας υπερυψηλής υδροστατικής πίεσης στα ένζυμα της τομάτας και εφαρμογή για την παραγωγή προϊόντων με επιθυμητά χαρακτηριστικά*. Διδακτορική Διατριβή ΑΠΘ.
- Παπαζαφειρίου Ζ. Γ. 1984. *Αρχές και Πρακτική των Αρδεύσεων*, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.

ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΒΑΘΕΙΑ ΔΙΗΘΗΣΗ ΣΕ ΑΚΑΛΛΙΕΡΓΗΤΟ ΕΔΑΦΟΣ ΜΕ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ MACRO

X.A. Κολοτούρος¹, B.Z. Αντωνόπουλος², Π.Ε. Γεωργίου³

Τομέας Εγγείων Βελτιώσεων, Εδαφολογίας και Γεωργικής Μηχανικής

Γεωπονική Σχολή Α.Π.Θ., 54124 Θεσσαλονίκη

E-mail: ¹ckolotou@windowslive.com, ²vasanton@agro.auth.gr,

³pantaz@agro.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία γίνεται προσομοίωση και επαλήθευση της δυναμικής του εδαφικού νερού με τη χρήση του μονοδιάστατου μοντέλου διπλής διαπερατότητας MACRO 5.0 σε δύο ακαλλιέργητα εδάφη (αργιλώδες και πηλώδες) κάτω από τις υγρές χειμερινές συνθήκες. Η ρύθμιση του μοντέλου γίνεται με μετρήσεις υγρασίας για μία περίοδο οκτώ μηνών για συνθήκες μακρορροής και μη. Τα αποτελέσματα στα δύο εδάφη, σε σχέση με τις μετρημένες τιμές εδαφικής υγρασίας ήταν πολύ καλά ειδικότερα όταν λαμβάνεται υπόψη η μακρορροή. Το αργιλώδες έδαφος έδωσε μικρότερη μακρορροή σε σχέση με το πηλώδες. Η βαθειά διήθηση ήταν αρκετά μεγαλύτερη στο πρώτο έδαφος σε σχέση με το δεύτερο, αλλά το ποσοστό που οφείλεται σε φαινόμενα μακρορροής μικρότερο. Η ύπαρξη μακροπορώδους ροής στα δύο εδάφη επηρεάζει ελάχιστα το ποσοτικό μέρος της βαθειάς διήθησης, αλλά επηρεάζει καταλυτικά το ποιοτικό της κομμάτι, ειδικά μετά από σημαντικά γεγονότα βροχόπτωσης.

SOIL WATER BALANCE AND DEEP PERCOLATION UNDER NO TILLAGE SOIL USING THE MACRO MODEL

C.A. Kolotouros¹, V.Z. Antonopoulos², P.E. Georgiou³

Department of Hydraulics, Soil Science and Agricultural Engineering

Faculty of Agriculture, A.U.Th., 54124 Thessaloniki

E-mail: ¹ckolotou@windowslive.com, ²vasanton@agro.auth.gr, ³pantaz@agro.auth.gr

ABSTRACT

In this paper the 1-D numerical transient dual permeability model MACRO 5.0 is used for the simulation and validation of soil water dynamic in two no tillage soils (clay and loam) under the wet winter conditions. The calibration of the model is performed with measurements of soil water content for a period of eight months considering macropore flow or not. The results of the model in both soils compared with the measurements of soil water content were very accurate, especially when taking into account the macropore flow. The macropore flow in the clay soil was less than the loam soil. The deep percolation in the clay soil was larger than the loam soil and the proportion due to macropore flow was smaller. The macropore flow in both soils affects less the total water of deep percolation but it is important after significant rainfall events.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στα εδάφη με διαμορφωμένη δομή το νερό κινείται ταχύτερα μέσω ενός κλάσματος των πόρων (μακροπόρους), με αποτέλεσμα να παρακάμπτεται το μεγαλύτερο μέρος της εδαφικής φάσης. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται "επιλεκτική ροή". Συνυφασμένο με το φαινόμενο αυτό είναι το γεγονός ότι το ταχέως κινούμενο προς τα βαθύτερα εδαφικά στρώματα νερό, δεν έχει στη διάθεσή του τον απαιτούμενο χρόνο να αλληλεπιδράσει πλήρως με τις βιολογικά και χημικά ενεργές ανώτερες στρώσεις του εδάφους, με αποτέλεσμα τη μεταφορά ουσιών σε βάθη που δεν είναι αναμενόμενα, με βάση την κλασική θεώρηση της εξίσωσης του Darcy και την ημιπερίοδο ζωής των ουσιών αυτών (Šimůnek et al., 2003; Christiansen et al., 2004; Cullum, 2009). Τις τελευταίες δύο δεκαετίες έχουν αναπτυχθεί διάφορες θεωρίες για την προσομοίωση του φαινομένου. Στα άρθρα των Šimůnek et al. (2003) και Gerke (2006) γίνεται εκτενής ανασκόπησή τους. Εξέχουσα θέση ανάμεσα στις θεωρίες αυτές έχει η θεωρία της "διπλής διαπερατότητας". Στα μοντέλα αυτά το σύνολο του εδάφους αποτελείται από δύο επικαλυπτόμενες περιοχές στις οποίες υπάρχει ροή. Στην περιοχή του μακροπορώδους υπάρχει γρήγορη ροή νερού, ενώ στο πεδίο της εδαφικής φάσης (μικροπορώδες), ροή με μικρότερη ταχύτητα.

Το μοντέλο MACRO (Larsbo and Jarvis, 2003) είναι ένα δημοφιλές μοντέλο διπλής διαπερατότητας. Έχει χρησιμοποιηθεί σε πλήθος εργασιών (Andreu et al., 1994; Akhand et al., 2006; Gärdenäs et al., 2006; Van Daele et al., 2007) γιατί η δομή του είναι απλή και κατανοητή, έχει τη δυνατότητά να "τρέχει" τόσο ως μοντέλο μονού όσο και διπλού πορώδους και κυρίως το μοντέλο απαιτεί μόνο λίγες και εύκολα μετρήσιμες παραμέτρους για την εφαρμογή του.

Στην εργασία γίνεται εφαρμογή του μοντέλου MACRO υπό τις υγρές υδρολογικές συνθήκες που διαμορφώθηκαν κατά την χειμερινή/εαρινή περίοδο του 2010/2011 σε δύο γυμνά ακαλλιέργητα εδάφη διαφορετικής σύστασης, ένα αργιλώδες και ένα πηλώδες, στη περιοχή της Θεσσαλονίκης. Πραγματοποιείται ρύθμιση του μοντέλου με τις μετρημένες τιμές εδαφικής υγρασίας στους δύο αγρούς και εφαρμογή του, ώστε να προσομοιωθούν οι διαδικασίες της επιλεκτικής ροής σε παρόμοια εδάφη, κάτω από τις συγκεκριμένες υδρολογικές συνθήκες. Ο σκοπός της εργασίας είναι: (α) η επαλήθευση της δυνατότητας του μοντέλου να περιγράφει τη διακύμανση της εδαφικής υγρασίας στα προαναφερθέντα εδάφη, (β) η μελέτη της επιλεκτικής ροής που συμβαίνει στα δύο εδάφη και η σύγκριση του βαθμού με τον οποίο συμβαίνει το φαινόμενο σε αυτά και (γ) η βαθμιά διήθηση στις δεδομένες συνθήκες.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Το μοντέλο MACRO έχει τη δυνατότητα να περιγράφει τη ροή του νερού στο έδαφος θεωρώντας είτε μονό είτε διπλό πορώδες. Στη δεύτερη περίπτωση το ολικό πορώδες χωρίζεται σε μακροπορώδες και μικροπορώδες βάση ενός οριακού δυναμικού πίεσης ψ_b (και της αντίστοιχης υγρασίας θ_b). Κάθε μία από τις δύο φάσεις του εδάφους χαρακτηρίζεται από τις δικές της υδραυλικές ιδιότητες. Ανταλλαγή νερού μεταξύ των δύο φάσεων συμβαίνει είτε με συναγωγή, είτε με διάχυση. Συναγωγή νερού από το μικροπορώδες προς το μακροπορώδες συμβαίνει όταν το δυναμικό του εδαφικού νερού υπερβαίνει την τιμή ψ_b . Ανταλλαγή νερού με διάχυση συμβαίνει αποκλειστικά από το μακροπορώδες προς το μικροπορώδες που περιγράφεται με ένα όρο διάχυσης στην εξίσωση του Richards. Στη συνέχεια παρουσιάζεται μια σύντομη περιγραφή των βασικών εξισώσεων κίνησης του νερού στο έδαφος καθώς πλήρη περιγραφή του μοντέλου δίνεται από τους Lasbo and Jarvis (2003).

Η κίνηση του νερού στους μικροπόρους περιγράφεται από την εξίσωση του Richards (Αντωνόπουλος, 1999):

$$C \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right) - \sum S_i \quad (2.1)$$

όπου $C = \partial \theta / \partial \psi$ είναι η υδραυλική χωρητικότητα του εδάφους, θ είναι η περιεχόμενη υγρασία κατ' όγκο, ψ είναι το ύψος πίεσης, t είναι ο χρόνος, z είναι το βάθος, K είναι η ακόρεστη υδραυλική αγωγιμότητα και το S_i αντιπροσωπεύει όρους προσθήκης /απώλειας του εδαφικού νερού ως αποτέλεσμα της ανταλλαγής του με το μακροπορώδες, τη στράγγιση και την πρόσληψη εδαφικού νερού από τις ρίζες.

Η κίνηση του νερού στους μακροπόρους περιγράφεται με μία ανάλογη εξίσωση, αγνοώντας τις τριχοειδείς δυνάμεις στους μακροπόρους, $d\psi/dz = 0$, ώστε η κίνηση του νερού να γίνεται αποκλειστικά από τη βαρύτητα. Η εξ. (2.1) έχει τη μορφή:

$$\partial \theta_{ma} / \partial t = (\partial K_{ma} / \partial z) - \sum S_i \quad (2.2)$$

όπου θ_{ma} και K_{ma} είναι η περιεχόμενη κατ' όγκο υγρασία και η υδραυλική αγωγιμότητα στους μακροπόρους, αντίστοιχα. Εφόσον το K_{ma} είναι συνάρτηση του θ_{ma} , αυτή η προσέγγιση είναι ισοδύναμη με την προσέγγιση του κινηματικού κύματος, όπως περιγράφεται από τις εξισώσεις του Germann (1985).

Η χαρακτηριστική καμπύλη συγκράτησης του εδαφικού νερού στους μικροπόρους δίνεται από την τροποποιημένη εξίσωση του van Genuchten (1980):

$$S = (\theta_{mi} - \theta_r) / (\theta_s^* - \theta_r) = \left(1 + (\alpha_{vg} \psi)^{n_{vg}} \right)^{-m_{vg}} \quad (2.3)$$

όπου S είναι ο αποτελεσματικός βαθμός κορεσμού της υγρασίας, m_{vg} , n_{vg} και α_{vg} είναι οι παράμετροι της εξίσωσης του van Genuchten (το m_{vg} , είναι ίσο με $1 - 1/n_{vg}$), θ_r είναι η υπολειμματική εδαφική υγρασία και θ_s^* είναι η "φαινομενική" κορεσμένη εδαφική υγρασία.

Το μοντέλο του Mualem (1976) χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη συνάρτηση της ακόρεστης υδραυλικής αγωγιμότητας στους μικροπόρους (Luckner et al., 1989):

$$K_{mi} = K_b \left(S / S_{mi(\theta_b)} \right)^\ell \left[\frac{\left(1 - \left(1 - S^{1/m_{vg}} \right)^{m_{vg}} \right)}{\left(1 - \left(1 - S_{mi(\theta_b)}^{1/m_{vg}} \right)^{m_{vg}} \right)} \right]^2 \quad (2.4)$$

όπου ℓ είναι ένας παράγοντας πολυπλοκότητας των μικροπόρων, K_b είναι η υδραυλική αγωγιμότητα στο σημείο διαχωρισμού μικρο/μάκρο-πορώδους και το $S_{mi(\theta_b)}$ δίνεται από μία σχέση ανάλογη της εξ. (2.3) για το μικροπορώδες.

Η συνάρτηση της υδραυλικής αγωγιμότητας στους μακροπόρους, δίνεται ως μια απλή εκθετική συνάρτηση του βαθμού κορεσμού του μακροπορώδους S_{ma} :

$$K_{ma} = K_{s(ma)} S_{ma}^{n^*} \quad (2.5)$$

όπου n^* είναι ένας "κινηματικός" εκθέτης που αντικατοπτρίζει την κατανομή του μεγέθους και την πολυπλοκότητα του μακροπορώδους και το S_{ma} δίνεται από τη σχέση:

$$S_{m\alpha} = \theta_{m\alpha} / e_{m\alpha} \quad (2.6)$$

όπου $\theta_{m\alpha}$ είναι το περιεχόμενο νερό στο μακροπορώδες και $e_{m\alpha}$ είναι το ολικό μακροπορώδες που ισούται με την ολική υγρασία κορεσμού θ_s (την πραγματική υγρασία κορεσμού που εισάγεται στο μοντέλο από το χρήστη) μείον την τιμή θ_b .

Το νερό θα κινηθεί προς τους μακροπόρους που είναι επιφανειακά ανοικτοί, εάν η ένταση της βροχόπτωσης ξεπεράσει τη διηθητική ικανότητα του μικροπορώδους. Έτσι, η καθαρή βροχόπτωση στην επιφάνεια του εδάφους σε κάποιο χρονικό βήμα κατανέμεται στην εξάτμιση από το έδαφος E_s , σε μια ποσότητα που διηθείται στο μικροπορώδες I_{mi} και στην απομένουσα ποσότητα που πάει στο μακροπορώδες $I_{m\alpha}$ και εξαρτάται προφανώς από τη διηθητικότητα (επιφανειακή) του μικροπορώδους I_{max} , η οποία υπολογίζεται από την εξίσωση του Darcy. Επομένως ισχύει:

$$I_{mi} = W_s + W_d - E_s \quad \text{όταν} \quad W_s + W_d - E_s \leq I_{max} \quad (2.7a)$$

$$I_{m\alpha} = 0$$

$$I_{mi} = I_{max} \quad \text{όταν} \quad W_s + W_d - E_s > I_{max} \quad (2.7\beta)$$

$$I_{m\alpha} = W_s + W_d - E_s - I_{mi}$$

όπου W_s είναι η καθαρή βροχόπτωση, W_d είναι η ενδορροή και E_s είναι η εξάτμιση από την επιφάνεια του εδάφους. Αν ικανοποιείται η πρώτη συνθήκη της (2.7α), τότε η πάνω οριακή συνθήκη είναι γνωστής ροής (συνθήκη Neumann) ίση με την καθαρή βροχόπτωση μείον την εξάτμιση από το έδαφος. Αν ικανοποιείται η δεύτερη συνθήκη της (2.7β), τότε η πάνω οριακή συνθήκη δίνεται από μία γνωστή τιμή πίεσης (συνθήκη Dirichlet).

Επομένως, εκτός της περίπτωσης όπου το νερό ρέει προς τους μακροπόρους, όταν το δυναμικό πίεσης υπερβεί την τιμή ψ_b , υπάρχει και δεύτερη δυνατότητα δημιουργίας μακρορροής απευθείας επιφανειακά προς τους μακροπόρους σύμφωνα με τις διαδικασίες που περιγράφηκαν προηγουμένα.

Η συμφωνία μεταξύ μετρημένων και υπολογισμένων τιμών εδαφικής υγρασίας ελέγχεται με την χρήση τριών στατιστικών κριτηρίων που προτάθηκαν από τους Loague & Green (1991) και τον Antonopoulos (2000, 2006) και είναι τα εξής: α) Το μέσο σφάλμα E (average error) ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) το οποίο έχει βέλτιστη τιμή μηδέν, β) Το μέσο ανηγμένο τετραγωνικό σφάλμα RMSE (Root Mean Square Error) (%), το οποίο έχει ελάχιστη και συγχρόνως βέλτιστη τιμή το μηδέν και είναι αρκετά ευαίσθητο σε απομακρυσμένες τιμές και γ) το συντελεστή ελλείμματος μάζας CRM (Coefficient of Residual Mass) ο οποίος κυμαίνεται από $-\infty$ έως $+\infty$ με βέλτιστη τιμή μηδέν. Όταν η τιμή του συντελεστή είναι θετική αυτό συνεπάγεται ότι το μοντέλο δίνει υποεκτιμήσεις των μετρημένων τιμών, ενώ το αντίθετο ισχύει για τις αρνητικές τιμές του συντελεστή.

2.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Πειραματικά δεδομένα των εδαφών, της μεταβολής του εδαφικού νερού και μετεωρολογικών στοιχείων συνελέγησαν σε δύο τελείως ελεύθερα από βλάστηση αγροτεμάχια του Εργαστηρίου Γενικής και Γεωργικής Υδραυλικής και Βελτιώσεων της Γεωπονικής Σχολής, στο αγρόκτημα του Α.Π.Θ., κατά το χρονικό διάστημα από 2/10/10 (ημέρα 275) έως 31/5/11 (ημέρα 516).

Το έδαφος του αγροτεμαχίου 1 αποτελείτο από τρεις εδαφικές στρώσεις (0-30, 30-60, 60-100 cm) κυρίως αργιλώδους υφής. Εκτός της επιφανειακής του στρώσης, η

οποία περιέχει υπολείμματα οργανικής ουσίας και παρουσιάζει κάποια δομή οι υπόλοιπες εδαφικές στρώσεις παρουσιάζουν μετρίως ανεπτυγμένη έως αδιαμόρφωτη δομή βαριάς σύστασης. Το έδαφος του αγροτεμαχίου 2 αποτελείται από τρεις εδαφικές στρώσεις πηλώδους υφής (0-40, 40-60, 60-70 cm) με αρκετά ικανοποιητική δομή γεγονός που αντικατοπτρίζεται και στις χαρακτηριστικές καμπύλες που παρουσιάζουν μεγαλύτερη ικανότητα συγκράτησης του εδαφικού νερού καθώς και μεγαλύτερες υγρασίες κορεσμού θ_s . Το έδαφος χαρακτηρίζεται από μεγάλη ομοιομορφία σε όλο το βάθος μέχρι τα 70 cm, ενώ από εκεί και κάτω εντοπίζονται κροκάλες και άμμος.

Η κοκκομετρική σύσταση των εδαφικών στρώσεων των δύο εδαφών υπολογίσθηκε μετά από δειγματοληψίες με την πυκνομετρική μέθοδο Βουγιούκου (Πίνακας 1). Με κατάλληλη επεξεργασία αδιατάρακτων δειγμάτων και τη διαδικασία κορεσμού και εφαρμογής πιέσεων στις συσκευές πίεσης, προσδιορίστηκαν οι παράμετροι της χαρακτηριστικής καμπύλης με το πρόγραμμα RETC, ενώ η υδραυλική αγωγιμότητα κορεσμού (mm/h) μετρήθηκε με τη μέθοδο του περατόμετρου σταθερού φορτίου (Πίνακας 2).

Πίνακας 1. Φυσικές ιδιότητες του εδάφους

	Βάθος (cm)	Άμμος(%)	Πλύς(%)	Αργίλος(%)	Τύπος υφής
Θέση 1	0-30	44.36	25.36	30.28	clay-loam
	30-60	29.68	29.34	40.98	clay
	60-100	23.4	29.5	47.1	clay
Θέση 2	0-40	47.9	28.5	23.6	loam
	40-60	48.5	38.0	13.6	loam
	60-70	58.3	28.5	13.2	sandy-loam

Πίνακας 2. Υδραυλικές ιδιότητες του εδάφους

Βάθος	ρ_b	θ_r	θ_s	a	n	K_s
cm	$Mg\ m^{-3}$	$cm^3\ cm^{-3}$	$cm^3\ cm^{-3}$	cm^{-1}		$mm\ h^{-1}$
Θέση 1 (αργιλώδες έδαφος)						
0-30	1.488	0.002	0.517	0.0214	1.142	48.44
30-60	1.424	0.046	0.555	0.0552	1.150	9.42
60-100	1.344	0.002	0.568	0.0353	1.143	3.66
Θέση 2 (πηλώδες έδαφος)						
0-40	1.542	0.005	0.534	0.0127	1.208	3.5
40-60	1.475	0.004	0.565	0.0354	1.266	12.67
60-70	1.465	0.059	0.572	0.0162	1.333	10

Τα μετεωρολογικά δεδομένα για όλη την περίοδο προσομοίωσης ελήφθησαν από τον αυτόματο μετεωρολογικό σταθμό του Εργαστηρίου Γενικής και Γεωργικής Υδραυλικής και Βελτιώσεων, που είναι εγκατεστημένος δίπλα στο πειραματικό αγροτεμάχιο. Ωριαία δεδομένα μέσης, ελάχιστης και μέγιστης θερμοκρασίας ($^{\circ}C$), προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας ($W\ m^{-2}$), σχετικής υγρασίας (%) και ταχύτητας ανέμου ($m\ s^{-1}$) μετατράπηκαν σε ημερήσια, προκειμένου να υπολογισθεί η ημερήσια εξάτμιση σύμφωνα με τη σχέση των Penman-Monteith (Allen et al., 1994). Η διακύμανση της εξάτμισης καθώς και της μέσης ημερήσιας θερμοκρασίας φαίνονται στο Σχήμα 1. Από το Σχήμα αυτό παρατηρούμε ότι το μοντέλο υπολογίζει σχεδόν μηδενική εξάτμιση από τις 7/10/10 έως και τις 2/3/11. Αυτό συμβαίνει κυρίως λόγω των μικρών τιμών προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας καθ' όλη την διάρκεια της χειμερινής περιόδου.

Οι εισροές νερού στο έδαφος των αγροτεμαχίων προήλθαν, είτε από άρδευση με κατάκλυση στην αρχή της περιόδου παρατηρήσεων, είτε από βροχόπτωση. Στις 2/10/10

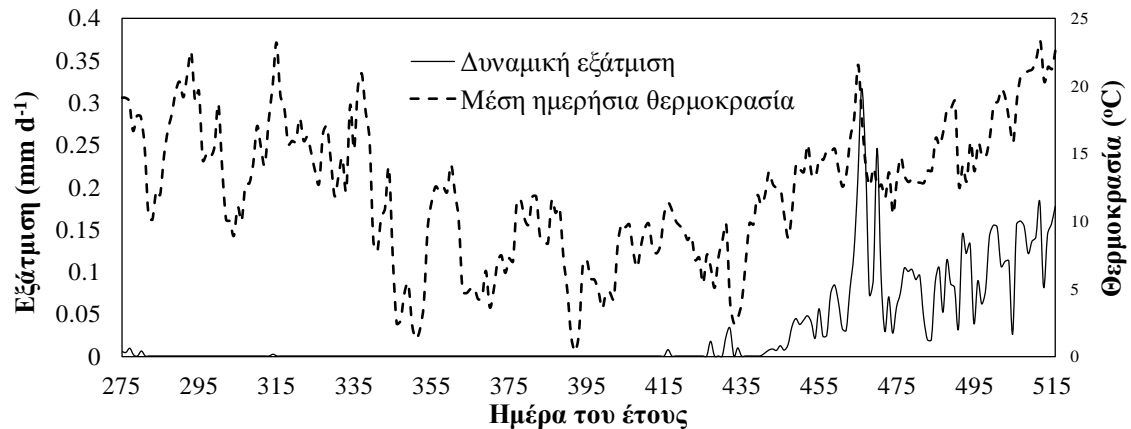
(ημέρα 275) στο αγροτεμάχιο 1 εφαρμόστηκε ύψος νερού 124 mm και στις 12/10/10 (ημέρα 286) στο αγροτεμάχιο 2 εφαρμόστηκε ύψος νερού 71 mm. Στο Σχήμα 2 φαίνονται οι αρδεύσεις και οι βροχοπτώσεις για όλη την περίοδο προσομοίωσης.

Η μέτρηση της εδαφικής υγρασίας γινόταν σε τακτά χρονικά διαστήματα την περίοδο προσομοίωσης, με το όργανο Diviner 2000 της εταιρείας Sentek Pty (Sentek, 2007) σε όλο το βάθος του εδάφους (100 cm – θέση 1 και 70 cm – θέση 2) ανά 10 cm. Οι μετρήσεις του οργάνου ήταν σχετικές, γι' αυτό και απαιτήθηκε βαθμονόμησή του και εκτίμηση των σταθερών του οργάνου. Αυτό έγινε με μη γραμμική παλινδρόμηση ανάμεσα σε μετρήσεις Scaled Frequency (SF) από το όργανο και της αντίστοιχης περιεχόμενης εδαφικής υγρασίας (θ_v), η οποία υπολογίστηκε με τη βαρυμετρική μέθοδο. Οι σχέσεις βαθμονόμησης για τις δύο θέσεις είναι οι εξής:

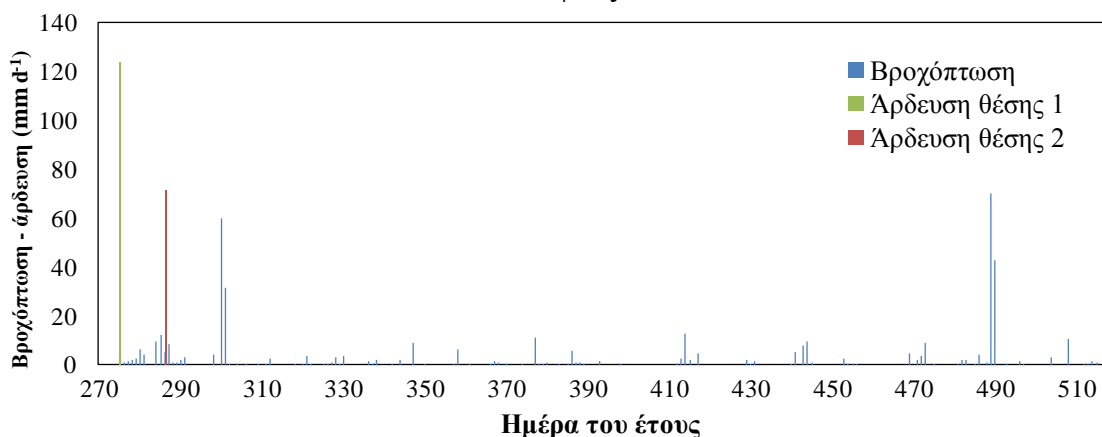
$$\theta_v = 0.72 SF^{0.379} \quad \text{θέση 1} \quad (2.8)$$

$$\theta_v = 0.77 SF^{0.396} \quad \text{θέση 2} \quad (2.9)$$

όπου θ_v η κατ' όγκο εδαφική υγρασία ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) και SF η μέτρηση που παίρνεται από το Diviner 2000.



Σχήμα 1. Μέση ημερήσια θερμοκρασία και δυναμική εξάτμιση από την επιφάνεια του εδάφους.

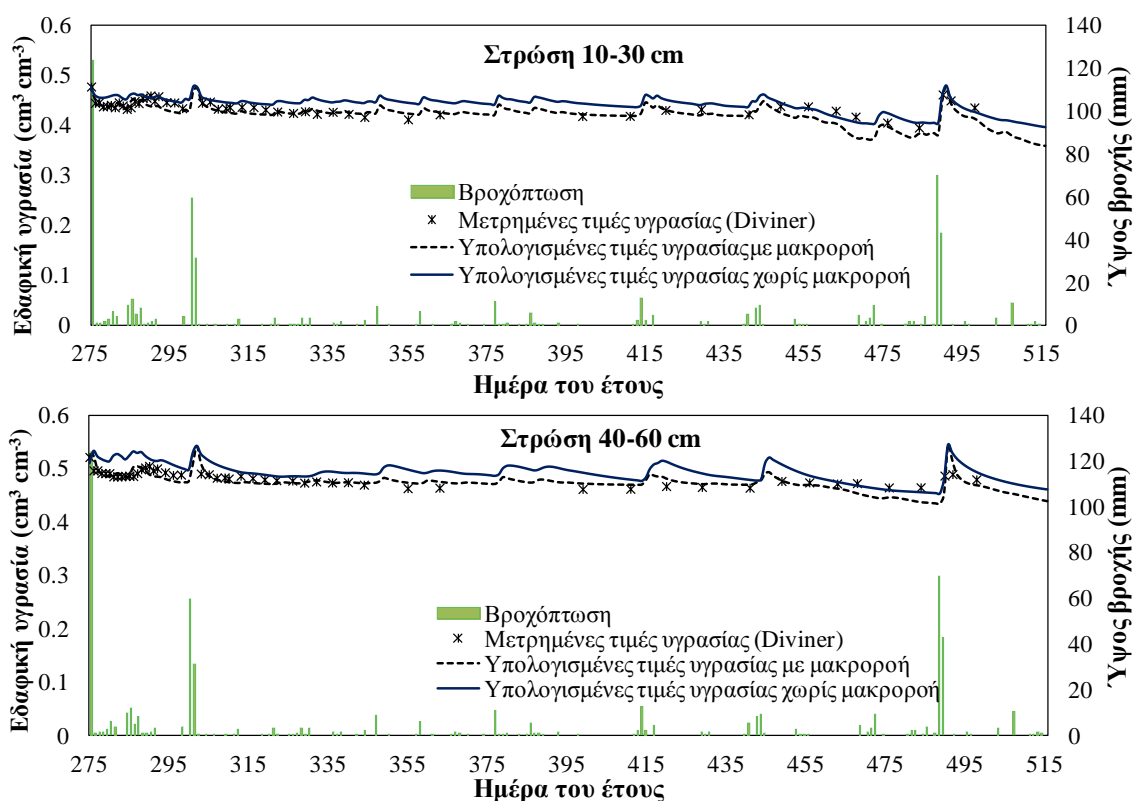


Σχήμα 2. Ημερήσια βροχόπτωση και άρδευση κατά τη διάρκεια της περιόδου προσομοίωσης από τις 2/10/10 έως και τις 31/05/11.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

3.1 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΛΑΦΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ

Στο Σχήμα 3 παρουσιάζεται η διακύμανση της εδαφικής υγρασίας σε δύο στρώσεις του εδάφους (10-30 cm και 40-60 cm) για το αργιλώδες έδαφος (θέση 1), όπως υπολογίστηκαν με το μοντέλο θεωρώντας ότι η ροή γίνεται ταυτόχρονα δια μέσου των μακροπόρων και των μικροπόρων (περίπτωση *διπλού πορώδους*) και θεωρώντας το έδαφος ομογενές αγνοώντας τη ροή στους μακροπόρους και ροή νερού μόνο δια μέσου του μικροπορώδους (περίπτωση *μονού πορώδους*). Από το Σχήμα 3 προκύπτει ότι το μοντέλο περιγράφει τη διακύμανση της εδαφικής υγρασίας με πολύ ικανοποιητικό βαθμό σε όλο το εδαφικό προφίλ. Η παραδοχή εδάφους διπλού πορώδους φαίνεται να δίνει καλλίτερες εκτιμήσεις της εδαφικής υγρασίας αφού στα ανώτερα κυρίως στρώματα, το μοντέλο με ροή απλού πορώδους δίνει υπερεκτιμήσεις της εδαφικής υγρασίας. Στον Πίνακα 3 δίνονται τα στατιστικά κριτήρια για τις εφαρμογές του μοντέλου στο αργιλώδες έδαφος.

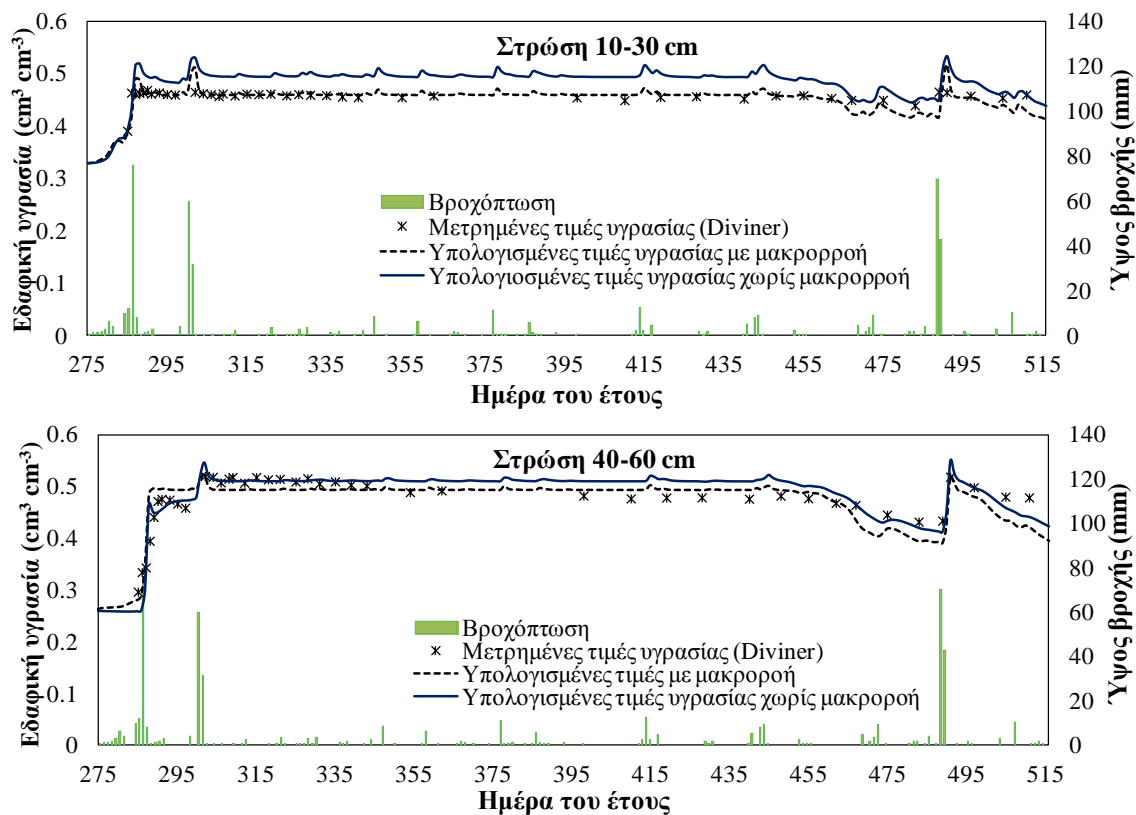


Σχήμα 3. Σύγκριση των υπολογισμένων με τις μετρημένες τιμές εδαφικής υγρασίας των εδαφικών στρώσεων (α) 10-30 cm και (β) 40-60 cm με την παραδοχή του μοντέλου MACRO να περιγράφει ροή από διπλό πορώδες και ροή από απλό πορώδες στο αργιλώδες έδαφος (θέση 1).

Πίνακας 3. Στατιστικά κριτήρια για τη θέση 1

	Με μακροροή			Χωρίς μακροροή		
	RMSE (%)	E (cm ³ cm ⁻³)	CRM	RMSE (%)	E (cm ³ cm ⁻³)	CRM
10-30 cm	2.75	-0.006	0.0132	3.66	0.012	-0.0276
40-60 cm	2.59	-0.002	0.0043	5.09	0.020	-0.0415
60-70 cm	1.57	0.002	-0.0032	2.12	0.007	-0.0135
Μέση στο εδαφικό προφίλ	2.30	-0.002	0.0047	3.62	0.013	-0.0275

Το μέσο σφάλμα E κυμαίνεται από -0.0057 έως $0.0017 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ με διπλό πορώδες και από 0.007 έως $0.021 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ με απλό πορώδες. Ο δείκτης (RMSE) κυμαίνεται από 1.57 μέχρι 2.75% θεωρώντας διπλό πορώδες και από 2.12 μέχρι 5.09% απλό πορώδες. Τέλος, ο δείκτης CRM μαρτυρά την υπερεκτίμηση της εδαφικής υγρασίας, όταν δεν θεωρούμε μακροροή και την ελαφρά υποεκτίμηση, όταν θεωρούμε ροή με διπλό πορώδες. Στο Σχήμα 4 γίνεται η σύγκριση των μέσων μετρημένων και υπολογισμένων με και χωρίς μακροροή τιμών εδαφικής υγρασίας για το πηλώδες έδαφος (θέση 2). Η σύγκριση αφορά τα ίδια βάθη (10-30 cm και 40-60 cm). Τα στατιστικά κριτήρια (Πίνακας 4) για το πηλώδες έδαφος (θέση 2) δείχνουν ότι η τιμή του E κυμαίνεται από -0.006 μέχρι $-0.001 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ για διπλό πορώδες και από 0.0103 μέχρι $0.03 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ για απλό πορώδες. Το RMSE κυμαίνεται από 3.89 μέχρι 9.75% για διπλό πορώδες και από 5.35 μέχρι 7.72% για απλό πορώδες, ενώ οι τιμές του CRM δείχνουν την υποεκτίμηση και υπερεκτίμηση της εδαφικής υγρασίας από το μοντέλο με τη θεώρηση και μη του φαινομένου της μακροροής, αντίστοιχα.



Σχήμα 4. Σύγκριση των υπολογισμένων με τις μετρημένες τιμές εδαφικής υγρασίας των εδαφικών στρώσεων (α) 10-30 cm και (β) 40-60 cm με την παραδοχή του μοντέλου MACRO να περιγράφει ροή από διπλό πορώδες και ροή από απλό πορώδες στο πηλώδες έδαφος (θέση 2).

Πίνακας 4. Στατιστικά κριτήρια για τη θέση 2

	Με μακροροή			Χωρίς μακροροή		
	RMSE (%)	E ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	CRM	RMSE (%)	E ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	CRM
10-30 cm	3.89	-0.001	0.003	7.72	0.030	-0.0655
40-60 cm	5.94	-0.005	0.011	5.35	0.002	-0.0045
60-70 cm	9.75	-0.006	0.012	7.54	0.010	-0.02
Μέση στο εδαφικό προφίλ	6.53	-0.004	0.008	6.86	0.014	-0.03

Από το Σχήμα 4 και τον Πίνακα 4 προκύπτει ότι τα αποτελέσματα του μοντέλου για τη διακύμανση της εδαφικής υγρασίας στο πηλώδες έδαφος (θέση 2) είναι μικρότερης ακρίβειας από ότι στο αργιλώδες έδαφος (θέση 1). Τα αποτελέσματα με την παραδοχή του διπλού πορώδους και πάλι δείχνουν υποεκτιμήσεις της εδαφικής υγρασίας σε σχέση με τις αντίστοιχες μετρημένες, ενώ το αντίστροφο συμβαίνει με την παραδοχή μονού πορώδους. Σημαντικό ρόλο για τη μη ταύτιση μετρημένων και υπολογισμένων τιμών υγρασίας φαίνεται να αποτελεί η βαθιά εδαφική στρώση 60-70 cm καθώς για τη θέση 2 μετά τα 70 cm επικρατεί όπως αναφέρθηκε προηγούμενα μια αδιαμόρφωτη άμμο-πετρώδης στρώση, που φαίνεται να δημιουργεί προβλήματα στην ακριβή πρόβλεψη από το μοντέλο της πραγματικής εδαφικής υγρασίας.

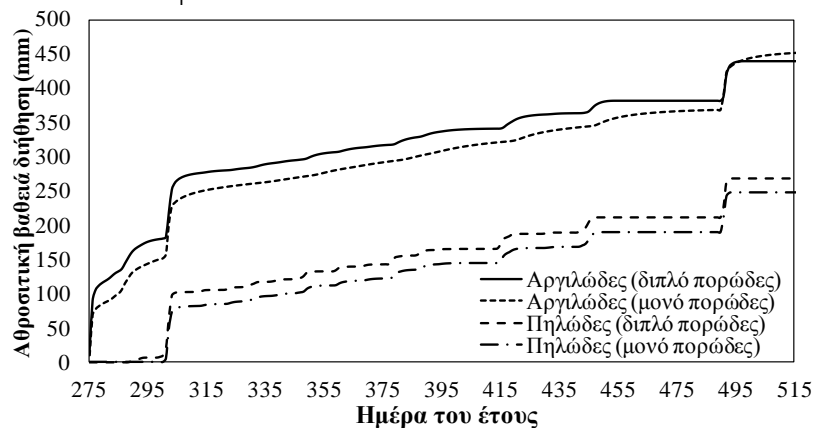
3.2 ΥΔΑΤΙΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΚΑΙ ΜΑΚΡΟΡΡΟΗ

Το υδατικό ισοζύγιο και για τις δυο παραδοχές ροής (διπλού και μονού πορώδους) στο τέλος της περιόδου προσομοίωσης στα δύο εδάφη, δίνεται στον Πίνακα 5. Οι διαφορές στις εισροές νερού οφείλονται στην διαφορά του ύψους αρδευτικού νερού και τη μεγαλύτερη εξάτμιση στο πηλώδες έδαφος, που οφείλεται στο μεγαλύτερο ρυθμό με τον οποίο δύναται να προμηθεύει νερό προς τα επιφανειακά στρώματα, όντας καλύτερα διαμορφωμένο. Η βαθιά διήθηση στο αργιλώδες έδαφος είναι πολύ μεγαλύτερη από ότι στο πηλώδες έδαφος, με αποτέλεσμα στο τέλος της περιόδου προσομοίωσης η συνολική υγρασία στο έδαφος έχει μειωθεί κατά 44.81 mm στο αργιλώδες, ενώ στο πηλώδες έδαφος έχει αυξηθεί κατά 73.59 mm.

Πίνακας 5. Υδατικό ισοζύγιο της περιόδου προσομοίωσης για τις δυο παραδοχές ροής (διπλού και μονού πορώδους) στα αγροτεμάχια των δύο εδαφών

Συνιστώσες ισοζυγίου (mm)	Θέση 1	Θέση 2
	MACRO ($\psi_b=10$ cm)	MACRO ($\psi_b=10$ cm)
Αθροιστική βροχή και άρδευση	547.78	502.99
Αθροιστική δυναμική εξάτμιση	-170.35	-160.76
Αθροιστική πραγματική εξάτμιση	-153.64	-160.76
Αθροιστική βαθιά διήθηση	-438.95	-268.64
Μεταβολή της εδαφικής υγρασίας	-44.81	73.59

Στο Σχήμα 5 δίνεται η αθροιστική βαθιά διήθηση κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης για τις δυο παραδοχές ροής (διπλού και μονού πορώδους) στα αγροτεμάχια των δυο εδαφών.

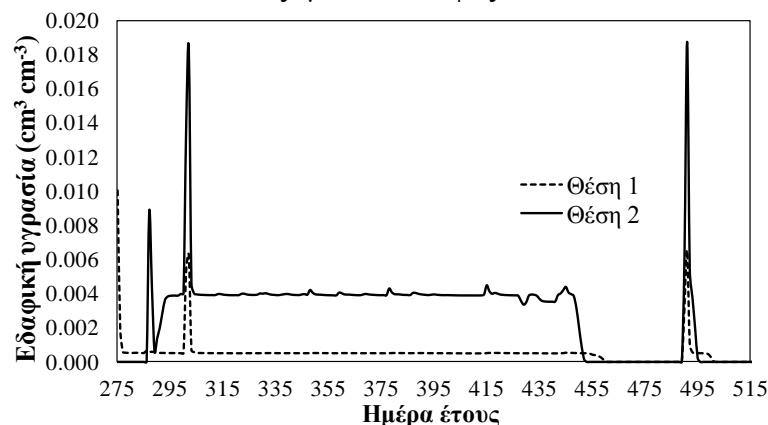


Σχήμα 5. Αθροιστική βαθιά διήθηση στο αργιλώδες και το πηλώδες έδαφος θεωρώντας ροή διπλού και μονού πορώδους.

Το φαινόμενο της μακρορροής επηρεάζει πιο έντονα την βαθειά διήθηση στο πηλώδες από ότι στο αργιλώδες έδαφος. Η παραδοχή της μακρορροής στο αργιλώδες έδαφος δίνει μείωση της βαθειάς διήθησης περίπου 2.9 % από αυτή που υπολογίζεται με το μοντέλο χωρίς μακρορροή, ενώ αντίθετα στο πηλώδες έδαφος, η βαθειά διήθηση είναι αυξημένη κατά 7.7 % όταν υπάρχει μακρορροή. Επομένως, το φαινόμενο της μακρορροής είναι πιο έντονο στο πηλώδες έδαφος (θέση 2) σε σχέση με τη θέση 1.

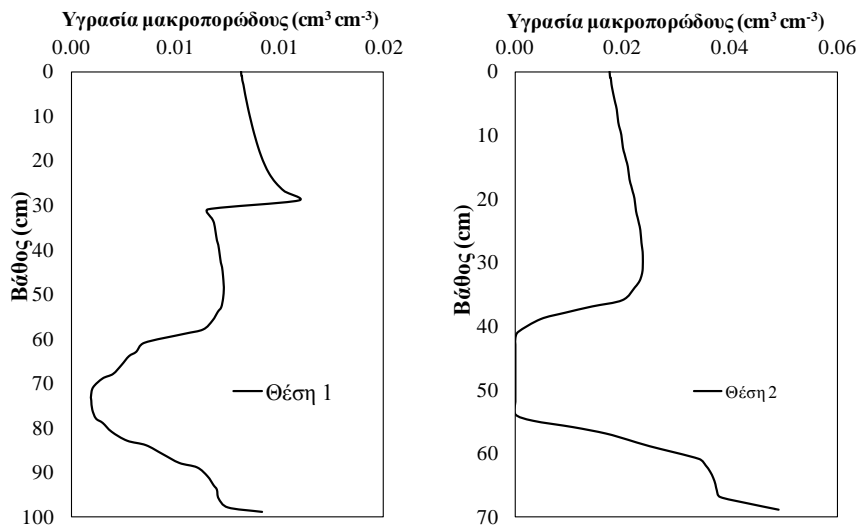
Στο Σχήμα 6 δίνεται η μέση εδαφική υγρασία που περιέχεται στο μακροπορώδες σε όλο το εδαφικό προφίλ για τις θέσεις 1 και 2 για όλη την περίοδο προσομοίωσης. Υπενθυμίζεται ότι μακρορροή συμβαίνει με δύο διαφορετικούς μηχανισμούς στο μοντέλο MACRO. Ο πρώτος συμβαίνει όταν το δυναμικό πίεσης του μικροπορώδους ξεπεράσει το οριακό ύψος πίεσης ψ_b , οπότε και το νερό κινείται προς τους μακροπόρους. Ο δεύτερος μηχανισμός λαμβάνει χώρα, όταν η ένταση της άρδευσης/βροχόπτωσης ξεπεράσει τη διηθητικότητα του εδάφους, οπότε το νερό κινείται επιφανειακά απ' ευθείας στους μακροπόρους. Ο πρώτος τρόπος αρχίζει να συμβαίνει και στα δύο εδάφη μετά τον κορεσμό του εδάφους με άρδευση και συνεχίζει να πραγματοποιείται όλη τη διάρκεια του χειμώνα έως τα μέσα της άνοιξης οπότε αρχίζει να εμφανίζεται αυξημένη η εξάτμιση. Ο τρόπος αυτός δημιουργίας μακρορροής φαίνεται να συμβαίνει μόνο στα βαθύτερα 10-15 cm των δύο εδαφών και σε αυτόν οφείλεται η ευρεία βάση των διαγραμμάτων του Σχήματος 6. Μεγαλύτερη βάση παρουσιάζει η μακρορροή για τη θέση 2 λόγω ύπαρξης της ρηχής αδιαπέρατης στρώσης και του ισχυρότερου κορεσμού των στρώσεων αυτής, σε αντίθεση με τη θέση 1, όπου το νερό κινείται σε μεγάλο βάθος χωρίς να συναντήσει κάποιο εμφανές εμπόδιο. Ο δεύτερος μηχανισμός μακρορροής πραγματοποιείται και στα δύο εδάφη μετά την εφαρμογή άρδευσης καθώς και μετά τα σημαντικά περιστατικά βροχόπτωσης της 300^{ης} και 489^{ης} ημέρας και σε αυτόν οφείλονται οι τρεις κορυφές του Σχήματος 6. Το νερό που κινείται από την επιφάνεια του εδάφους προς τους μακροπόρους υφίσταται σταδιακά διάχυση προς το μικροπορώδες και παρόλο που ποσοτικά στη θέση 2 το περιεχόμενο στους μακροπόρους νερό είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο για τη θέση 1, το νερό στη θέση 2 καταφέρνει από την επιφάνεια του εδάφους να φτάσει μέχρι ένα βάθος περίπου 45 cm ενώ στη θέση 1, το νερό των μικροπόρων φαίνεται να υπόκειται σε μικρότερη διάχυση με αποτέλεσμα να σχηματίζεται συνεχής μακρορροή και στα 100 cm του εδαφικού προφίλ. Τα παραπάνω αποτελέσματα φαίνονται παραστατικότερα στο Σχήμα 7 όπου φαίνεται η σχηματιζόμενη μακρορροή για τις θέσεις 1 και 2 μετά το επεισόδιο βροχόπτωσης της 300^{ης} ημέρας (27-10-2010) σε σχέση με το βάθος.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι τόσο για το αργιλώδες έδαφος της θέσης 1 όσο και για το πηλώδες έδαφος της θέσης 2, το φαινόμενο της επιλεκτικής ροής δεν επηρεάζει το ποσοτικό υδατικό ισοζύγιο στο έδαφος.



Σχήμα 6. Μέση εδαφική υγρασία στους μακροπόρους κατά την περίοδο της προσομοίωσης χρησιμοποιώντας το μοντέλο MACRO, για τις θέσεις 1 και 2.

Διαφορά 13 mm και 20 mm μεταξύ της υπολογισμένης βαθείας διήθησης με μακρορροή και χωρίς μακρορροή για τις θέσεις 1 και 2, αντίστοιχα κρίνεται ως πολύ μικρή. Ωστόσο και στο ένα έδαφος και στο άλλο η σχηματιζόμενη μακρορροή έχει ως αποτέλεσμα το νερό να παρακάμπτει τις ανώτερες εδαφικές στρώσεις οι οποίες είναι βιολογικά και χημικά ενεργές και έτσι οι διάφορες ρυπογόνες ουσίες, μη συγκρατούμενες από τις στρώσεις αυτές, να εμφανίζονται σε βαθύτερα στρώματα και στη συνέχεια στα υπόγεια ύδατα σε συγκεντρώσεις που κανονικά δεν θα ήταν αναμενόμενες (Šimůnek et al., 2003; Christiansen et al., 2004; Cullum, 2009). Το πηλώδες έδαφος με την καλά διαμορφωμένη δομή της θέσης 2, δίνει ποσοτικά πολύ πιο έντονα φαινόμενα μακρορροής σε σχέση με το αργιλώδες έδαφος της θέσης 1, συμπέρασμα το οποίο συμφωνεί με διάφορες θεωρητικές και μη εργασίες όπως του Jarvis (2007). Ωστόσο ενώ εδάφη όπως αυτό της θέσης 2 φαίνεται να συμβάλουν στη μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων ρυπογόνων ουσιών στα βαθύτερα στρώματα, εδάφη όπως αυτό της θέσης 1 όπου σχηματίζονται συνεχείς δίοδοι μέσω των μακροπόρων προς μεγάλα βάθη, συμβάλλουν στην ταχύτερη μεταφορά των ουσιών αυτών προς τα υπόγεια ύδατα.



Σχήμα 7. Περιεχόμενη υγρασία στους μακροπόρους (m^3/m^3) σε συνάρτηση με το βάθος, την 302^η ημέρα, μετά το περιστατικό βροχόπτωσης της 300^{ης} ημέρας (27-10-2010) για τις θέσεις 1 και 2.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το μοντέλο διπλής διαπερατότητας MACRO χρησιμοποιήθηκε για τη διερεύνηση της δυναμικής του εδαφικού νερού και της δημιουργίας του φαινομένου της επιλεκτικής ροής σε δύο ελεύθερα από καλλιέργεια εδάφη του αγροκτήματος του Α.Π.Θ. κατά τη διάρκεια της υγρής χειμερινής περιόδου 2010-2011. Λόγω δυσκολίας συλλογής δεδομένων υγρασίας στο μακροπορώδες και βαθείας διήθησης έγινε ρύθμιση του μοντέλου με βάση μετρημένες τιμές υγρασίας. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν ότι και στα δύο εδάφη η θεώρηση μακρορροής βελτιώνει τα αποτελέσματα σε σχέση με την μη θεώρηση καθώς και ότι στο αργιλώδες έδαφος τα αποτελέσματα ήταν πολύ καλύτερα από αυτά του πηλώδους εδάφους. Οι υγρές υδρολογικές συνθήκες καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης, η πολύ μικρή εξάτμιση και η ανακατανομή του εδαφικού νερού στο εδαφικό προφίλ είχαν ως αποτέλεσμα υψηλές τιμές βαθείας διήθησης και στα δύο εδάφη, με αρκετά σημαντικότερες αυτές τους αργιλώδους εδάφους χωρίς καλά διαμορφωμένη δομή. Η ύπαρξη ή μη μακροπορώδους ροής ελάχιστα επηρέασε το ποσοτικό ισοζύγιο του νερού της βαθείας

διήθησης, ωστόσο στο ποσοστό που επηρεάστηκε η βαθειά διήθηση από τη μακρορροή αυτό έγινε με διπλάσιο ρυθμό στο πηλώδες από το αργιλώδες έδαφος. Γενικά, η υγρασία στους μακροπόρους για το πηλώδες έδαφος ήταν μιας τάξης ανώτερη σε σχέση με το αργιλώδες έδαφος. Σημαντική παρατήρηση αποτελεί το γεγονός ότι ενώ στην πρώτη περίπτωση το ποσοτικά περισσότερο νερό καταφέρνει να φτάσει μέχρι ένα βάθος περίπου 45 cm, στη δεύτερη περίπτωση το κατά πολύ λιγότερο ποσοτικά νερού σχηματίζει συνεχείς υδάτινες διόδους μέχρι μεγάλα βάθη. Στη διαδικασία μακρορροής το πηλώδες έδαφος επηρεάζει την ποσότητα των ρυπογόνων ουσιών και το αργιλώδες έδαφος την ταχύτητα πορείας τους προς τα βαθειά ύδατα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Akhand, N.A., Lapen, D.R., Topp, E., Edwards, M.J., Sabourin, L., Ball Coelho, B.R., Duenk, P.W. and Payne, M., 2006. *Prediction of liquid municipal biosolid and precipitation induced tile flow in a Southern Ontario agricultural field using MACRO*. Agricultural Water Management, 83: 37–50.
- Allen, R.G., Smith, M., Perrier, A., Pereira, L.S., 1994. *An update for the definition and for the calculation of reference evapotranspiration*. International Commission on Irrigation & Drainage (ICID) Bulletin, 43, 2, 1-92.
- Andreu, L., Moreno, F., Jarvis, N.J. and Vachaud, G., 1994. *Application of the model MACRO to water movement and salt leaching in drained and irrigated marsh soils, Marismas, Spain*. Agricultural Water Management, 25: 71-88.
- Antonopoulos, V.Z., 2000. *Modeling of soil water dynamics in an irrigated corn field using direct and pedotransfer functions for hydraulic properties*. Irrigation and Drainage Systems, 14: 325–342.
- Antonopoulos, V.Z., 2006. *Water movement and heat transfer simulations in a soil under ryegrass*. Biosystems Engineering, 95: 127-138.
- Christiansen J.S., Thorsen M., Clausen T., Hansen S. and Refsgaard J.C., 2004. *Modelling of macropore flow and transport processes at catchment scale*. Journal of Hydrology, 299: 136–158.
- Cullum R.F., 2009. *Macropore flow estimations under no-till and till systems*. Catena, 78: 87–91
- Gärdenäs, A.I., Šimůnek, J., Jarvis, N.J. and van Genuchten, M.T., 2006. *Two dimensional modelling of preferential water flow and pesticide transport from a tile-drained field*. Journal of Hydrology, 329: 647–660.
- Gerke, H.H., 2006. *Preferential flow descriptions for structured soils*. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 169: 382–400.
- Germann, P., 1985. *Kinematic wave approach to infiltration and drainage into and from soil macropores*. Transaction of the ASAE, 28: 745–749.
- Jarvis N. J., 2007. *A review of non-equilibrium water flow and solute transport in soil macropores: principles, controlling factors and consequences for water quality*. European Journal of Soil Science, 58: 523–546.
- Larsbo, M. and Jarvis, N., 2003. *MACRO 5.0: A model of water flow and solute transport in macroporous soil. Technical description*. Department of Soil Sciences, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala.
- Loague, K.M. and Green, R.E., 1991. *Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application*. Journal of Contaminant Hydrology, 7: 51-73.

- Luckner, L., van Genuchten, M.T. and Nielsen, D.R. 1989. *A consistent set of parametric models for the two-phase flow of immiscible fluids in the subsurface*. Water Resources Research, 25: 2187-2193.
- Mualem, Y., 1976. *A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media*. Water Resources Research, 12: 513-522.
- Sentek, 2007. *Sentek Diviner 2000 User Guide*. Sentek, Stepney, Australia.
- Šimůnek, J., Jarvis, N.J., van Genuchten, M.T. and Gärdenäs, A., 2003. *Review and comparison of models for describing nonequilibrium and preferential flow and transport in the vadose zone*. Journal of Hydrology, 272: 14–35.
- Van den Daele, G.F.A., Barker, J.A., Connell, L.D., Atkinson, T.C., Darling, W.G. and Cooper, J.D., 2007. *Unsaturated flow and solute transport through the Chalk: tracer test and dual permeability modelling*. Journal of Hydrology, 342: 157–172.
- Van Genuchten, M.T., 1980. *A closed-form equation in predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils*. Soil Science Society of America Journal, 44: 892–898.
- Αντωνόπουλος, Β.Ζ., 1999. *Υδρολογία της ακόρεστης ζώνης του εδάφους*. Έκδοση Υπηρεσία Δημοσιευμάτων Α.Π.Θ.

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΤΑΤΟΜΩΝ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΚΑΤΩ ΑΠΟ
ΤΡΕΙΣ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΗΤΙΚΕΣ ΜΕΤΑΧΕΙΡΙΣΕΙΣ
ΣΤΗΝ ΑΝΩΤΕΡΗ ΕΔΑΦΙΚΗ ΣΤΡΩΣΗ
Γ. Κάργας, Α. Λαμπροπούλου, Π. Κερκίδης**

Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων &
Γεωργ. Μηχανικής, Εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής,
Ιερά Οδός 75, 11855 Αθήνα, e-mail: kargas@aua.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία εξετάζονται οι κατατομές υγρασίας που αναπτύσσονται σ' ένα πηλώδες έδαφος στο οποίο πραγματοποιούνται τρεις διαφορετικές καλλιεργητικές μεταχειρίσεις στην ανώτερη εδαφική στρώση. Το πείραμα πραγματοποιήθηκε στην ημίξηρη περιοχή της Αττικής κατά το διάστημα 2010-2011. Στην πρώτη περίπτωση το έδαφος καλλιεργήθηκε αρχές φθινοπώρου με περιστροφικό καλλιεργητή και στη συνέχεια γίνεται χημική καταπολέμηση της φυσικής βλάστησης (RT), στη δεύτερη το έδαφος έμεινε ακαλλιέργητο και γίνεται πάλι χημική καταπολέμηση της φυσικής βλάστησης (NT) ενώ στην τρίτη περίπτωση η φυσική βλάστηση αναπτύχθηκε ελεύθερα (NV). Από την εξέταση των κατατομών υγρασίας φαίνεται ότι κατά τη διάρκεια της περιόδου των βροχών περισσότερο νερό αποθηκεύτηκε στη μεταχείριση NV συγκριτικά με τις μεταχειρίσεις RT και NT. Μεταξύ των μεταχειρίσεων RT και NT υπάρχει μία θετική διαφορά στο νερό που αποθηκεύτηκε της τάξης του 10%. Η επίδραση της μηχανικής κατεργασίας στη διήθηση και αποθήκευση του νερού φαίνεται να είναι σημαντικότερη κατά τις πρώτες φάσεις της περιόδου των βροχών. Οι απώλειες νερού κατά τη ξηρή περίοδο είναι μεγαλύτερες στη μεταχείριση NV και ακολουθεί η RT και μετά η NT.

**INFILTRATION OF RAIN WATER UNDER TWO DIFFERENT
CULTIVATION PRACTICES IN SEMI ARID REGION
G. Kargas, A. Lambropoulou, P. Kerkides**

Agricultural University of Athens, Dep. of Natural Resources Development &
Agricultural Engineering, Lab. of Agricultural Hydraulics
75 Iera Odos Str., 11855 Athens, Greece, e-mail: kargas@aua.gr

ABSTRACT

In the present work the problem of moisture profiles evolution under different cultivation practices and under rain-fed conditions in the semi-arid region of Attika (Greece) is investigated. Three cases are examined. The first case investigated the effect of cultivation (rototillage) (RT), the second case the effect of uncultivated bare soil (NT) and the third case, the effect of natural vegetation (NV). From the soil moisture profiles, one could estimate gain and losses of water and detect the differences. It is shown that, during the rainy period more water is infiltrated and stored in the natural vegetation plots in comparison with cultivated plots and uncultivated bare soils. Between RT and NT there is about a positive difference 10% of precipitated water which has been stored in the profile. After tillage, where the effect of cultivation is more pronounced most of the precipitated water is infiltrated and stored more effectively during the early stages of the rainy period. Water losses during the dry season have been higher for the plots with natural vegetation.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι διάφορες καλλιεργητικές επεμβάσεις στην επιφανειακή εδαφική στρώση μπορεί να μεταβάλλουν σημαντικά τις υδραυλικές ιδιότητες της. Η μεταβολή των υδραυλικών ιδιοτήτων της ανώτερης εδαφικής στρώσης επηρεάζει την ανάπτυξη των κατατομών υγρασίας λόγω της άρδευσης ή της βροχόπτωσης, την επιφανειακή απορροή και τελικά την ανάπτυξη των φυτών.

Το μέγεθος των αλλαγών των υδραυλικών ιδιοτήτων εξαρτάται από το είδος του εδάφους, την καλλιεργητική πρακτική και την εδαφική υγρασία (θ). Όμως η αρχική επίδραση του οργώματος στις υδραυλικές ιδιότητες μπορεί να μειωθεί πολύ γρήγορα στο χρόνο (Strudley et. al. 2008; Fuentes et. al. 2004; Green et. al. 2003). Πιο συγκεκριμένα οι Mara et. al. (1986) έδειξαν ότι η χαρακτηριστική καμπύλη υγρασίας αλλάζει σημαντικά στην περιοχή των πιέσεων κοντά στον κορεσμό ακόμα και από τον πρώτο κύκλο διαβροχής στράγγισης. Ανάλογα παρατήρησαν και μείωση της υδραυλικής αγωγιμότητας μέχρι το φορτίο 1.5 m μετά την πρώτη άρδευση-στράγγιση.

Ειδικά στις ξηρές και ημίξηρες περιοχές στις οποίες το νερό είναι πολύ περιορισμένος φυσικός πόρος οι μεταβολές των υδραυλικών ιδιοτήτων της επιφανειακής στρώσης λόγω των φθινοπωρινών καλλιεργητικών επεμβάσεων μπορεί να επηρεάσουν τον όγκο του νερού των χειμερινών βροχοπτώσεων ο οποίος διηθείται και ανακατανέμεται στο έδαφος. Σ' αυτές τις περιοχές η αύξηση του αποθηκευμένου νερού στην εδαφική κατατομή μπορεί να βοηθήσει την ικανοποιητική ανάπτυξη των φθινοπωρινών καλλιεργειών ή να μειώσει τις απαιτήσεις σε άρδευση στις ανοιξιάτικες αρδευόμενες καλλιέργειες.

Παρ' όλη τη σημασία του οργώματος, περιορισμένος αριθμός εργασιών έχει πραγματοποιηθεί για να διερευνήσει την επίδραση του στην αποθήκευση του νερού στο έδαφος κατά την περίοδο των βροχών καθώς και μετά από αυτές ειδικά στις ξηρές και τις ημίξηρες περιοχές.

Οι Wythers et. al., (1999) μελέτησαν την εξάτμιση σε τρία γυμνά εδάφη με τη βοήθεια λυσιμέτρων. Από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι σε διάστημα 15 ημερών η εξάτμιση στο ιλυοπηλώδες ήταν 25% μεγαλύτερη από το αμμοπηλώδες και 42% μεγαλύτερη από το αργιλοπηλώδες.

Οι Moret et. al. (2006) μελέτησαν σε ημίξηρη περιοχή της Ισπανίας κατά την περίοδο της αγρανάπαυσης, που διήρκεσε 16- 18 μήνες, την επίδραση τριών διαφορετικών καλλιεργητικών μεταχειρίσεων στην αποθήκευση του νερού της βροχής στο έδαφος. Αποδείχθηκε ότι, ανεξάρτητα από το είδος της μεταχείρισης δεν υπάρχει κέρδος στο αποθηκευμένο νερό και στην αποτελεσματικότητα της βροχόπτωσης για όλη την περίοδο της αγρανάπαυσης. Η αποτελεσματικότητα της βροχόπτωσης ήταν 11% σε όλη την περίοδο. Όμως στις διάφορες υποπεριόδους της αγρανάπαυσης μπορεί να εμφανιστεί διαφορετική συμπεριφορά. Επίσης παρατήρησαν ότι η αποθήκευση αυξάνεται όταν η ένταση της βροχής είναι μεγαλύτερη από 10 mm/ημέρα.

Οι Schwartz et. al. (2010) έδειξαν ότι για μία περίοδο 114 ημερών, σε μία ημίξηρη περιοχή, από τον Απρίλιο μέχρι τον Ιούλιο, η άρση προκαλεί σημαντική μείωση της ποσότητας του νερού συγκριτικά με το ανόργωτο έδαφος στην επιφανειακή στρώση των 30 cm. Από τον Ιούλιο μέχρι τον Οκτώβριο στο οργωμένο έδαφος παρατηρήθηκε μεγαλύτερη αθροιστικά εξάτμιση κατά 19 mm αλλά ταυτόχρονα η διήθηση ήταν κατά 26 mm μεγαλύτερη.

Στην παρούσα εργασία η οποία βρίσκεται σ' εξέλιξη από το 2008, εξετάζονται οι κατατομές υγρασίας μέχρι το βάθος του 1 m σ' ένα πηλώδες έδαφος στο οποίο έχουν πραγματοποιηθεί τρεις διαφορετικές καλλιεργητικές μεταχειρίσεις (RT-NT-NV). Το χρονικό διάστημα στο οποίο παρουσιάζονται οι κατατομές είναι από τον Οκτώβριο 2010 έως τον Ιούλιο 2011.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΤΕΜΑΧΙΑ

Στην παρούσα ερευνητική εργασία η οποία συνεχίζεται για τρίτο χρόνο, εξετάζονται τρεις διαφορετικές καλλιεργητικές μεταχειρίσεις σε έξι πειραματικά τεμάχια διαστάσεων 5x5 m². Σε κάθε πειραματική χρονιά μεταβάλλονται τα πειραματικά τεμάχια στα οποία εφαρμόζονται οι καλλιεργητικές μεταχειρίσεις. Έτσι την περίοδο 2009-2010 πραγματοποιήθηκε μηχανική κατεργασία στα τεμάχια Β και D ενώ στα Α και C έγινε μόνο χημική καταπολέμηση των ζιζανίων.

Κατά την περίοδο 2010-2011 στα πειραματικά τεμάχια Α και D πραγματοποιήθηκε μηχανική κατεργασία στις 11/10/2010 (RT). Στα τεμάχια Β και C δεν πραγματοποιήθηκε μηχανική κατεργασία και με χημική καταπολέμηση των ζιζανίων παρέμειναν γυμνά καθ' όλη την πειραματική περίοδο (NT). Τα τεμάχια Ε και F δεν υπέστησαν κατεργασία, και αφέθηκε να αναπτυχθεί ελεύθερα η αυτοφυής βλάστηση (NV). Στο κέντρο κάθε τεμαχίου τοποθετήθηκε πλαστικός σωλήνας εσωτερικής διαμέτρου 2.5 cm και μήκους 120 cm για την μέτρηση της εδαφικής υγρασίας με τη βοήθεια της διηλεκτρικής συσκευής PR2. Για τη μέτρηση της επιφανειακής υγρασίας χρησιμοποιήθηκε η διηλεκτρική συσκευή ML2. Από όλα τα πειραματικά αγροτεμάχια λαμβάνονταν μετρήσεις της κατ' όγκο υγρασίας μέχρι το βάθος ενός μέτρου κάθε εβδομάδα κι έκτακτα όταν υπήρχαν φαινόμενα βροχοπτώσεων. Στα αγροτεμάχια της RT και της NT μεταχείρισης πραγματοποιήθηκε ζιζανιοκτονία με χρήση του ζιζανιοκτόνου Roundup τις ημερομηνίες: 15/10/2010- 19/11/2010- 25/11/2010- 11/3/2011- 13/4/2011- 18/5/2011- 28/6/2011.

Το ύψος του νερού βροχοπτώσης μετρήθηκε από το βροχομετρικό σταθμό του Αστεροσκοπείου Αθηνών της περιοχής Γκάζι. Ο σταθμός αυτός είναι ο κοντινότερος στις πειραματικές επεμβάσεις και απέχει περίπου 1.5 Km. Η πειραματική περίοδος χωρίζεται σε δύο επί μέρους υποπεριόδους. Σαν υγρή περίοδο ορίζουμε το διάστημα από 11/10/2010 ως 16/3/2011. Ενώ σα ξηρή περίοδο, το διάστημα από 16/3/2011 ως τις 29/7/2011, μέχρι δηλαδή και τη λήξη της πειραματικής περιόδου.

2.2 ΣΥΣΚΕΥΗ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΕΛΑΦΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ PR2

Η συσκευή PR2 (Delta -T Device Ltd, User manual for the Profile probe, 2008) μετρά τη θ σε καθορισμένα βάθη του εδάφους. Η διάμετρός της είναι περίπου 25 mm και το μήκος 120 cm. Για τη μέτρηση της θ η συσκευή εισάγεται σε σωλήνα ο οποίος έχει τοποθετηθεί μόνιμα στο έδαφος στο κέντρο κάθε πειραματικού τεμαχίου. Οι μετρήσεις λαμβάνονται με τη βοήθεια της φορητής συσκευής (HH2).

Η PR2 λειτουργεί στη συχνότητα των 100 MHz και το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που δημιουργείται επεκτείνεται σε ακτίνα 10 cm γύρω από τη συσκευή. Με τον τρόπο αυτό προσδιορίζεται η διηλεκτρική σταθερά του εδάφους που περιβάλλει την συσκευή και διαμέσου της διηλεκτρικής σταθεράς (ε) του μέσου με την βοήθεια της βιομηχανικής βαθμονόμησης της συσκευής υπολογίζεται η υγρασία του εδάφους (θ). Το σήμα εξόδου της συσκευής σε κάθε βάθος δίνεται σε Volts. Από τις τιμές των Volts διαμέσου της εξίσωσης

$$\sqrt{\varepsilon} = 1.125 - 5.536V + 67.17V^2 - 234.42V^3 + 413.56V^4 - 356.68V^5 + 121.53V^6 \quad (2.1)$$

υπολογίζεται η διηλεκτρική σταθερά. Η θ προσδιορίζεται από την εξίσωση

$$\theta = \frac{\sqrt{\varepsilon} - \alpha_0}{\alpha_1} \quad (2.2)$$

Στην περίπτωση της εργοστασιακής βαθμονόμησης οι τιμές των α_0 και α_1 δίνονται από τον Πίνακα 1.

Πίνακας 1: Προτεινόμενες τιμές των παραμέτρων α_0 , α_1

	α_0	α_1
Ανόργανα εδάφη	1.6	8.4
Οργανικά εδάφη	1.3	7.7

Στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται οι προτεινόμενες τιμές το σφάλμα υπολογισμού της θ μπορεί να είναι $\pm 0.06 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Εάν απαιτείται μεγαλύτερη ακρίβεια στον υπολογισμό της θ τότε χρειάζεται να γίνει ειδική βαθμονόμηση της συσκευής στο συγκεκριμένο έδαφος. Η ειδική βαθμονόμηση είναι αναγκαία στα βαριά αργιλώδη εδάφη, στα πολύ οργανικά ή σε ειδικές κατηγορίες π.χ εδάφη που παρουσιάζουν έντονες μαγνητικές ιδιότητες (Kargas and Kerkides (2008)).

2.3 ΣΥΣΚΕΥΗ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΕΛΑΦΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ML2

Η συσκευή ML2 (ThetaProbe Soil moisture sensor Type ML2 user manual, 1999) μετρά την κατ' όγκο υγρασία του εδάφους και χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της επιφανειακής υγρασίας.

Η σχέση της διηλεκτρικής σταθεράς με τα Volts που δίνει η συσκευή εκφράζεται από τη σχέση:

$$\sqrt{\varepsilon} = 1.07 + 6.4V - 6.4V^2 + 4.7V^3 \quad (R^2 = 0.998) \quad (2.3)$$

Εκτός ορισμένων περιπτώσεων που απαιτείται πολύ μεγάλη ακρίβεια, η συσκευή δε χρειάζεται βαθμονόμηση καθώς, το πειραματικό σφάλμα είναι της τάξεως των $\pm 0.05 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Οι συντελεστές εργοστασιακής βαθμονόμησης της συσκευής για τον υπολογισμό της θ από την εξίσωση (2) δίνονται στον Πίνακα 1.

2.4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΎΨΟΥΣ ΝΕΡΟΥ ΤΗΣ ΕΛΑΦΙΚΗΣ ΚΑΤΑΤΟΜΗΣ

Για τον υπολογισμό του ύψους νερού της εδαφικής κατατομής χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των τραπεζίων

$$\int_a^b \theta dz = \frac{b-a}{2\nu} [\theta(\alpha) + 2\theta(n_1) + 2\theta(n_2) + \dots + 2\theta(n_{n-1}) + \theta(b)] \quad (2.4)$$

όπου ν είναι ο αριθμός των διαστημάτων που χωρίζεται το βάθος z και οι αριθμοί n_1, n_2 κ.λ.π. δηλώνουν τα διάφορα βάθη. Σαν Δz λαμβάνεται διάστημα 5 cm.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

3.1 ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΕΙΣ

Στον πίνακα 2 φαίνονται τα ύψη των κατακρημνισμάτων που παρατηρήθηκαν ανά μήνα κατά την πειραματική περίοδο.

Πίνακας 2: Ύψος βροχοπτώσεων σε mm/μήνα

Μήνας	Σύνολο mm
Οκτώβριος 2010	79.2
Νοέμβριος 2010	15.6
Δεκέμβριος 2010	25.0
Ιανουάριος 2011	68.4
Φεβρουάριος 2011	77.6
Μάρτιος 2011	25.6
Απρίλιος 2011	40.0
Μάιος 2011	38.8
Ιούνιος 2011	30.4
Ιούλιος 2011	0.0

Κατά τη διάρκεια της πειραματικής περιόδου παρατηρούνται συνολικά 68 ημέρες βροχοπτώσεων, εκ των οποίων 45 ημέρες βροχής κατά την υγρή περίοδο και 23 ημέρες βροχής κατά τη ξηρή περίοδο. Από το σύνολο των ημερών που παρατηρήθηκε βροχόπτωση, μόλις 13 ημέρες είχαμε έντονα φαινόμενα, δηλαδή βροχόπτωση πάνω από 10 mm/ ημέρα, 8 κατά την υγρή περίοδο και 5 κατά τη ξηρή περίοδο. Οι συνολικές βροχοπτώσεις όλης της πειραματικής περιόδου ήταν 400.6 mm. Κατά την υγρή περίοδο σημειώθηκε συνολική βροχόπτωση 284.03 mm, ενώ κατά τη ξηρή περίοδο 116.6 mm. Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της πειραματικής περιόδου 2010-2011 αποτελεί το γεγονός των ασυνήθιστα υψηλών βροχοπτώσεων κατά τη ξηρή περίοδο. Την προηγούμενη χρονιά την περίοδο από τέλος Φεβρουαρίου έως τέλος Αυγούστου το ύψος βροχής ήταν συνολικά 30.6 mm όσο δηλαδή είναι το ύψος νερού φέτος για το μήνα Ιούνιο. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα τέσσερα (4) από τα οχτώ (8) συνολικά γεγονότα έντονης βροχόπτωσης (>10mm) της υγρής περιόδου σημειώθηκαν το μήνα Οκτώβριο. Οι μεγαλύτερες εντάσεις βροχόπτωσης παρατηρήθηκαν την 27/10/2010 με τιμή έντασης τα 15.6 mm/h και την 12/6/2011 με ένταση βροχόπτωσης 13.2 mm/h .

3.2 ΥΓΡΗ ΠΕΡΙΟΔΟΣ

Στον Πίνακα 3 παρουσιάζεται το ύψος του αποθηκευμένου νερού στην εδαφική κατατομή σε mm κατά τη διάρκεια της υγρής περιόδου σε διάφορες χρονικές στιγμές. Παρουσιάζεται επίσης η βροχόπτωση που παρατηρήθηκε σε κάθε χρονικό διάστημα (Πίνακας 3). Στο Σχήμα 1 δίνονται οι κατατομές υγρασίας στην αρχή και στο τέλος της υγρής περιόδου.

Από τα αποτελέσματα (Πίνακας 3) φαίνεται ότι κατά την υγρή περίοδο στο πειραματικό τεμάχιο Α αποθηκεύτηκαν 80.71 mm νερού ενώ στο τεμάχιο D 91.94 mm νερού. Κατά μέσο όρο στα πειραματικά τεμάχια της RT μεταχείρισης αποθηκεύτηκαν κατά την υγρή περίοδο 86.33 mm νερού, ή 30.39% της συνολικής βροχόπτωσης της περιόδου.

Την ίδια χρονική περίοδο στο πειραματικό τεμάχιο Β αποθηκεύτηκαν 71.81 mm νερού και στο τεμάχιο C 61.14 mm νερού. Κατά μέσο όρο στα τεμάχια NT αποθηκεύτηκαν 66.47 mm νερού, δηλαδή ποσοστό 23.48% της συνολικής βροχόπτωσης της αντίστοιχης περιόδου.

Πίνακας 3: Ύψος νερού σε mm σε διάφορες χρονικές στιγμές στην εδαφική κατατομή κατά την υγρή περίοδο και ύψος νερού βροχόπτωσης

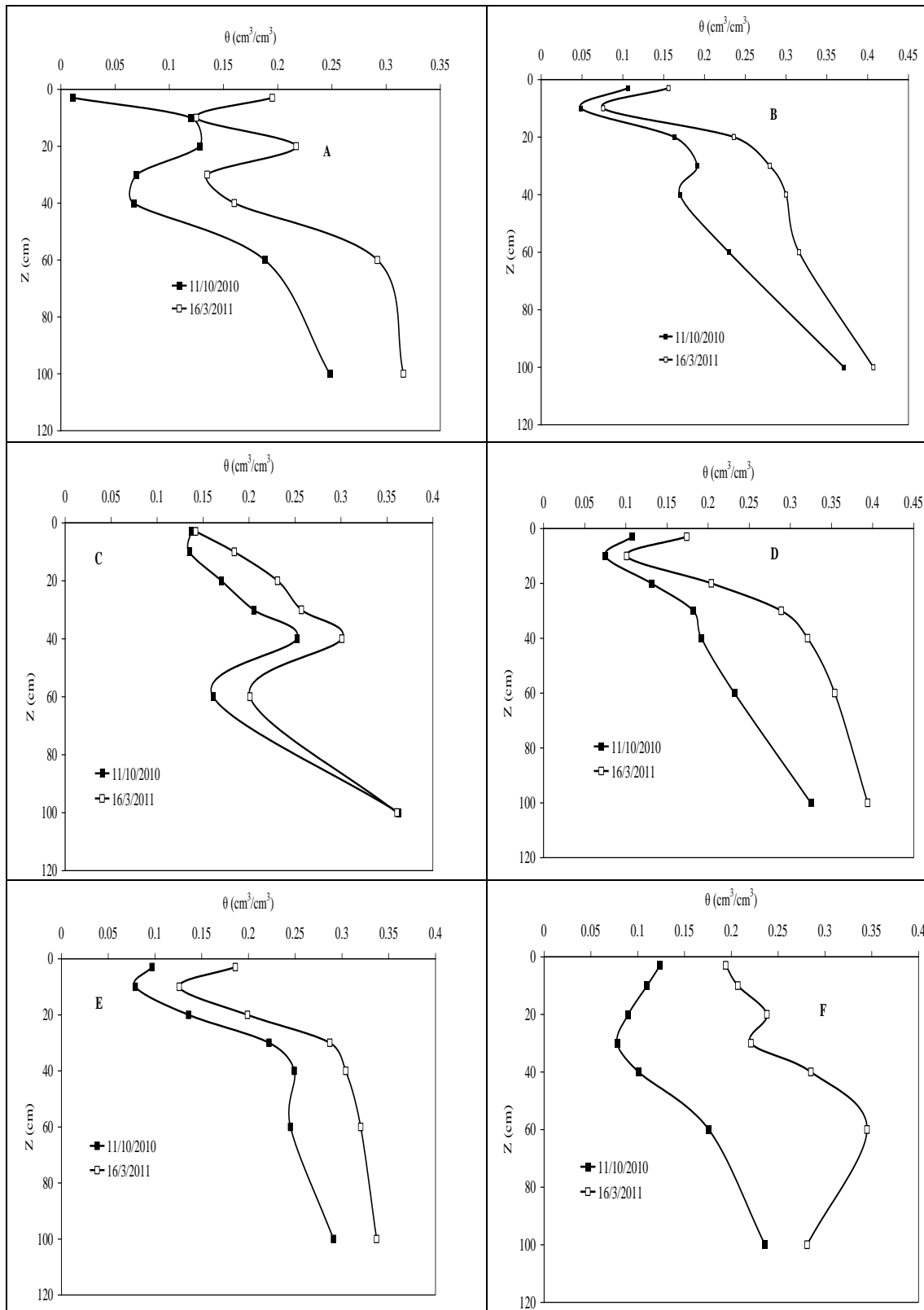
		11/10/10	1/11/10	17/12/10	11/1/11	7/2/11	16/3/11	Σύνολο
A	mm	143.04	191.72	171.52	196.74	243.9	223.75	
	Διαφορά		48.68	-20.20	25.22	47.16	-20.15	80.71
D	mm	201.91	282.45	244.53	274.86	329.65	293.85	
	Διαφορά		80.54	-37.92	30.33	54.79	-35.80	91.94
B	mm	210.02	239.06	221.73	243.86	291.2	281.83	
	Διαφορά		29.04	-17.33	22.13	47.34	-9.37	71.81
C	mm	182.96	219.88	212.67	220.85	266.15	244.1	
	Διαφορά		36.92	-7.21	8.18	45.30	-22.05	61.14
E	mm	172.73	241.93	205.42	219.57	282.4	271.27	
	Διαφορά		69.20	-36.51	14.15	62.83	-11.13	98.54
F	mm	143.2	194.45	173.83	187.85	275.68	268.82	
	Διαφορά		51.25	-20.62	14.02	87.83	-6.86	125.62
Βροχόπτωση			79.2	35.6	30.2	95.8	42.2	283

Στο πειραματικό τεμάχιο E αποθηκεύτηκαν κατά την υγρή περίοδο 98.54 mm νερού, ενώ στο τεμάχιο F αποθηκεύτηκαν συνολικά 125.62 mm νερού κατά τη διάρκεια της υγρής περιόδου. Κατά μέσο όρο, στα πειραματικά τεμάχια της NV μεταχείρισης, αποθηκεύτηκαν κατά την υγρή περίοδο 112,08 mm νερού, ποσοστό 39,46% της συνολικής βροχόπτωσης της περιόδου.

Από τα παραπάνω φαίνεται ότι στη μεταχείριση NV αποθηκεύτηκε το μεγαλύτερο ύψος νερού της βροχής.

Από τα αποτελέσματα επιβεβαιώνεται για τη χρονική περίοδο 2010-2011 όπως και την περίοδο 2009-2010 ότι το όργωμα επηρεάζει θετικά την αποθήκευση του νερού στην εδαφική κατατομή (Kargas et. al., 2012). Κατά μέσο όρο το 2010-2011 αποθηκεύτηκε στην κατατομή των οργωμένων τεμαχίων το 30.39% της βροχόπτωσης ενώ στα ανόργωτα το 23.48% ενώ τα αντίστοιχα ποσοστά την προηγούμενη χρονιά ήταν 43.4% και 33.2%. Η διαφορά και για τις δύο πειραματικές περιόδους είναι της τάξης του 7-10% περίπου. Τα ύψη βροχής ήταν αντίστοιχα για την υγρή περίοδο 2010-2011 283 mm ενώ για την υγρή περίοδο το 2009-2010 ήταν 311.8 mm. Πρέπει όμως να σημειώσουμε ότι η υγρή περίοδος για το 2009-2010 διαρκεί αρκετά μικρότερο χρονικό διάστημα, από 7/10/2009 έως 16/2/2010 συγκριτικά με την υγρή περίοδο του 2010-2011 η οποία διαρκεί από 11/10/2010 έως 16/3/2011. Επίσης από τα δεδομένα των εντάσεων βροχόπτωσης προκύπτει ότι το 2009-2010 υπήρξαν 6 γεγονότα πολύ μεγάλης έντασης βροχόπτωσης (40-55 mm/h). Τα γεγονότα αυτά έπαιξαν σημαντικό ρόλο στο μεγαλύτερο ποσοστό αποθήκευσης του νερού της βροχής και στις δύο μεταχειρίσεις κατά την πειραματική περίοδο 2009-2010.

Από τον Πίνακα 3 φαίνεται ότι στη μεταχείριση RT συγκριτικά με τις άλλες δύο αποθηκεύτηκε περισσότερο νερό στο διάστημα από 11/10/2010 έως 1/11/10. Το γεγονός αυτό προφανώς αντανακλά την επίδραση του οργώματος στη διήθηση του νερού. Η τάση αυτή φαίνεται να ισχύει και κατά το διάστημα από 17/12/10 έως 11/1/2011. Στο αμέσως επόμενο διάστημα έως 7/2/2011 η τάση αυτή φαίνεται να εξαφανίζεται και μάλιστα προηγείται στην αποθήκευση με μεγάλη διαφορά η μεταχείριση NV ενώ οι άλλες δύο επιδεικνύουν σχετικά παρόμοια συμπεριφορά



Σχήμα 1: Τα προφίλ υγρασίας για τα τεμάχια A,B,C,D, E και F στην αρχή και στο τέλος της υγρής περιόδου

3.3 ΞΗΡΗ ΠΕΡΙΟΔΟΣ

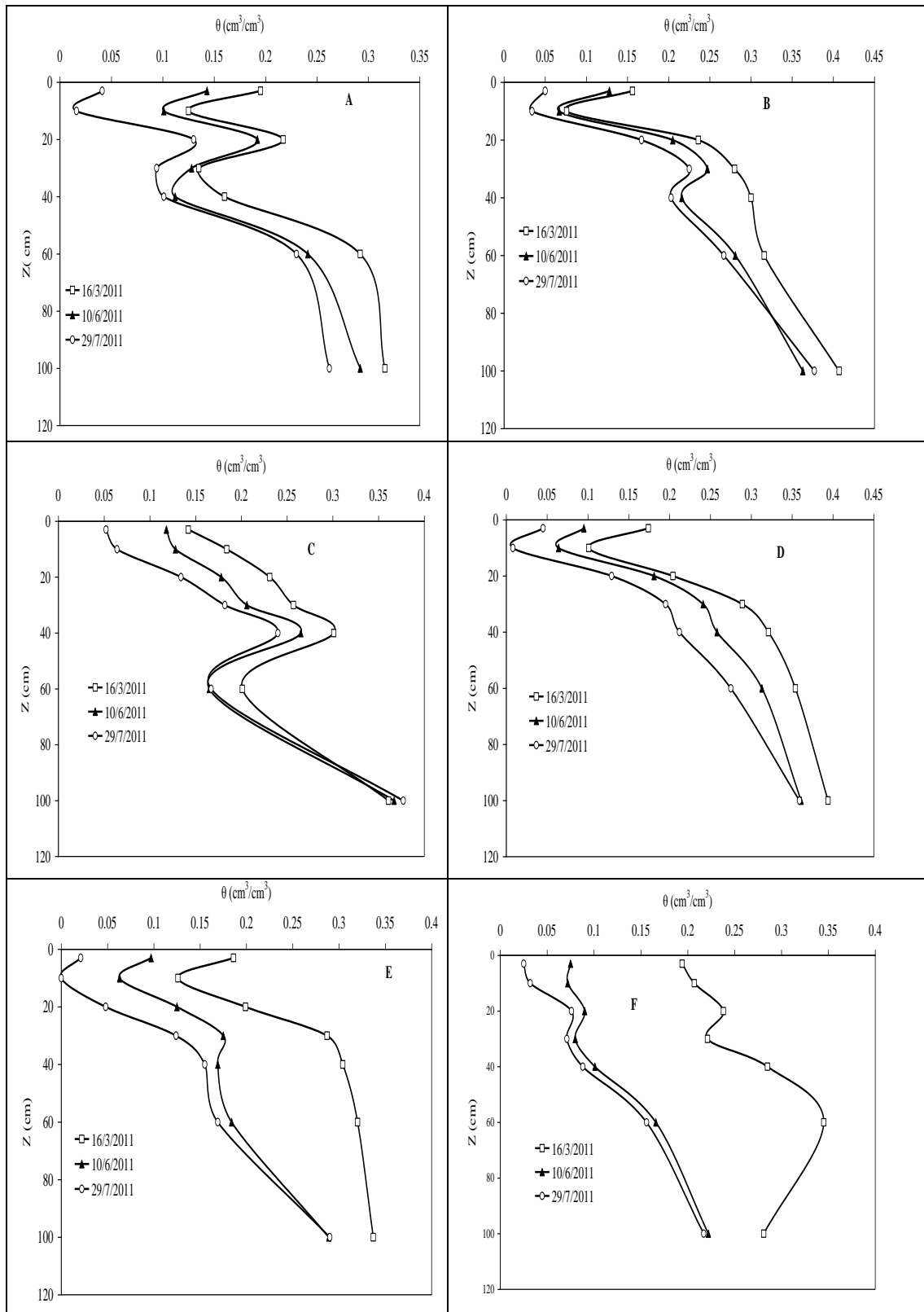
Στον πίνακα 4 παρουσιάζεται το ύψος του αποθηκευμένου νερού σε mm στην εδαφική κατατομή κατά τη ξηρή περίοδο σε διάφορες χρονικές στιγμές.

Πίνακας 4: Ύψος νερού σε mm σε διάφορες χρονικές στιγμές στην εδαφική κατατομή κατά τη ξηρή περίοδο και ύψος νερού βροχόπτωσης

		16/3/11	18/5/11	10/6/11	13/7/11	29/7/11	Σύνολο
A	mm	223.75	188.17	190.35	164.17	161	
	Διαφορά		-35.58	2.18	-26.18	-3.17	-62.75
D	mm	293.85	248.01	253.95	223.11	219.96	
	Διαφορά		-45.84	5.94	-30.84	-3.15	-73.89
B	mm	281.83	241.58	242.29	231.35	228.84	
	Διαφορά		-40.25	0.71	-10.94	-2.51	-52.99
C	mm	244.1	227.28	213.67	207.27	199.29	
	Διαφορά		-16.82	-13.61	-6.40	-7.98	-44.81
E	mm	271.27	162.49	175.26	155.29	149.53	
	Διαφορά		-108.78	12.77	-19.97	-5.76	-121.74
F	mm	268.82	150.04	133.6	120.66	121.18	
	Διαφορά		-118.78	-16.44	-12.94	0.52	-147.64
Βροχόπτωση			55.8	37.4	23.4	0	116.6

Από τα αποτελέσματα (Πίνακας 4 και Σχήμα 2) φαίνεται ότι στο πειραματικό τεμάχιο B κατά το διάστημα από 16/3/2011 μέχρι 29/7/2011 υπήρξαν απώλειες 57,99 mm νερού ενώ στο C 44,81 mm. Κατά μέσο όρο οι απώλειες στα πειραματικά τεμάχια της NT μεταχείρισης ήταν 48,92 mm. Αντίστοιχα στα τεμάχια της RT μεταχείρισης οι απώλειες ήταν για το A 62,75 mm και για το D 73,89 mm νερού. Ο μέσος όρος των απωλειών ήταν 68,32 mm νερού. Στην NV μεταχείριση το τεμάχιο E παρουσίασε απώλειες 121,74 mm ενώ το F είχε απώλειες 147,67 mm. Οι απώλειες της NV μεταχείρισης κατά μέσο όρο ήταν 134,69 mm.

Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι οι απώλειες του νερού κατά τη ξηρή περίοδο είναι ανάλογες του ύψους του νερού που αποθηκεύτηκε κατά την υγρή περίοδο. Έτσι η σειρά του ύψους των απωλειών είναι NV>RT>NT. Οι αυξημένες απώλειες στην NV μεταχείριση συγκριτικά με τις άλλες δύο είναι προφανές ότι οφείλονται στην ύπαρξη των φυτών, το ριζικό σύστημα των οποίων αντλεί νερό από τα βαθύτερα στρώματα για να καλύψει τις ανάγκες αυτών σε νερό. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι στη NV μεταχείριση οι απώλειες υπερβαίνουν την αποθήκευση της υγρής περιόδου κατά 22.61 mm. Στο γεγονός αυτό μπορεί να συνέβαλαν οι ιδιαίτερα υψηλές βροχοπτώσεις κατά τη ξηρή περίοδο με συνέπεια να υπάρχει νερό διαθέσιμο για να καλυφθούν οι αυξημένες ανάγκες των φυτών για αυτό το διάστημα.



Σχήμα 2: Τα προφίλ υγρασίας για τα τεμάχια A,B,C,D, E και F σε διάφορες χρονικές στιγμές της ξηρής περιόδου

Αντίθετα στις δύο άλλες μεταχειρίσεις οι απώλειες υπολείπονται της αποθήκευσης κατά 15.07 mm στη NT (B και C τεμάχια) και κατά 17.98 στην RT (A και D τεμάχια).

Παρόμοια τάση παρατηρήθηκε και κατά την πειραματική περίοδο 2009-2010 μεταξύ των δύο μεταχειρίσεων όπου όμως στη ΝΤ μεταχείριση περιλαμβάνονταν τα τεμάχια Α και C ενώ στην ΡΤ τα τεμάχια Β και D (Kargas et. al. 2012). Έτσι στα γυμνά εδάφη κατά τη ξηρή περίοδο αργά ή γρήγορα ανάλογα με τις κλιματικές συνθήκες εμφανίζεται ξήρανση της ανώτερης εδαφικής στρώσης και έτσι η υδραυλική αγωγιμότητά της πρακτικά μηδενίζεται με αποτέλεσμα το σημαντικό περιορισμό της εξατμισοδιαπνοής.

Από τα δεδομένα του Πίνακα 4 επίσης προκύπτει ότι οι απώλειες είναι σημαντικές κατά το πρώτο δίμηνο της ξηρής περιόδου σε όλες τις μεταχειρίσεις. Μάλιστα στη ΝV μεταχείριση οι απώλειες αυτού του διαστήματος πλησιάζουν το 85% των συνολικών απωλειών. Ανάλογο και πιο έντονο φαινόμενο είχε παρατηρηθεί και την προηγούμενη πειραματική περίοδο η οποία ήταν ιδιαίτερα ξηρή αφού από 16/2/2010 έως τέλος Αυγούστου το ύψος βροχής ήταν 30,6 mm.

3.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΤΕΜΑΧΙΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΠΑΡΟΔΟ ΕΝΟΣ ΕΤΟΥΣ

Στον Πίνακα 5 παρουσιάζονται τα ύψη νερού που είναι αποθηκευμένα στην εδαφική κατατομή σε δύο ημερομηνίες με διαφορά ενός χρόνου. Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι ανεξάρτητα από τη μεταχείριση η οποία πραγματοποιήθηκε στα πειραματικά τεμάχια τελικά αυτά εμφανίζονται να έχουν αποθηκευμένο ουσιαστικά, μετά την πάροδο ενός έτους, το ίδιο ύψος νερού με το προηγούμενο έτος. Οι μικρές αυξήσεις στο αποθηκευμένο ύψος νερού που παρατηρούνται στις 29/7/2011 συγκριτικά με 16/7/2010 προφανώς οφείλονται στις αυξημένες βροχοπτώσεις κατά τη ξηρή περίοδο. Το αποτέλεσμα αυτό φαίνεται να συμπίπτει με αυτό των Moret et. al. (2006) σε ημίξηρη περιοχή. Δηλαδή ότι ανεξάρτητα από το είδος της μεταχείρισης δεν υπάρχει κέρδος στο αποθηκευμένο νερό και στην αποτελεσματικότητα της βροχόπτωσης κατά τη διάρκεια της περιόδου της αγρανάπαυσης η οποία διαρκεί 16-18 μήνες. Επίσης παρόλο ότι αυτό το φαινόμενο συμβαίνει για μεγάλη χρονική περίοδο, όπως και στη δική μας πειραματική εργασία, στις επιμέρους υποπεριόδους εμφανίζονται σημαντικές διαφορές όσον αφορά στο αποθηκευμένο νερό της εδαφικής κατατομής μεταξύ των διαφορετικών καλλιεργητικών μεταχειρίσεων.

Πίνακας 5: Σύγκριση ύψους νερού σε mm των πειραματικών τεμαχίων δύο διαφορετικές χρονικές στιγμές.

	A	B	C	D	E	F
16/7/2010	158.00	222.45	186.75	204.05	137.76	119.89
29/7/2011	161.00	228.84	199.29	219.96	149.53	121.18

Στις ξηρές και τις ημίξηρες περιοχές, οι οποίες καλύπτουν το μεγαλύτερο μέρος της χώρας μας, φαίνεται από τα αποτελέσματα των πειραμάτων ότι το φθινοπωρινό όργανο αυξάνει την ποσότητα του νερού που αποθηκεύεται στο έδαφος με αποτέλεσμα τα φυτά κατά τη χειμερινή καλλιέργεια ή στην έναρξη της ανοιξιάτικης καλλιέργειας να έχουν στη διάθεσή τους μεγαλύτερη υγρασία, κάτι που επιβεβαιώνεται και από το συγκεκριμένο πείραμα για τη χρονική περίοδο 2010-2011. Τα αποτελέσματα αυτά βέβαια ισχύουν για το συγκεκριμένο έδαφος και το συγκεκριμένο τρόπο μηχανικής κατεργασίας. Επίσης από τα πειραματικά αποτελέσματα φαίνεται η μεγάλη επίδραση που έχει η φυτοκάλυψη τόσο κατά την περίοδο των βροχών, αυξάνοντας κατά πολύ τον όγκο του νερού που αποθηκεύεται στο έδαφος, όσο και κατά τη ξηρή περίοδο με τη συμβολή της στις αυξημένες απώλειες νερού.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Fuentes J, Flury M. and D. Bezdicsek. 2004. *Hydraulic properties in a silt loam soil under natural prairie, conventional till and no-till*. Soil Sci. Soc. Am. Journal 68:1679-1688.
- Green T. Ahuja L. and J. Benjamin. 2003. *Advances and challenges in predicting agricultural management effects on soil hydraulic properties*. Geoderma 116: 3-27.
- Kargas G., P. Kerkides, A. Poulouvassilis 2012. *Infiltration of rain water in semi-arid areas under three land surface treatments*. Soil and Tillage Research 120:15-24.
- Kargas G. and Kerkides P. 2008. *Water content determination in mineral and organic porous media by ML2 theta probe*. Irrigation and Drainage 57:435-449.
- Mapa R., Green R. and L. Santo. 1986. *Temporal variability of soil hydraulic properties with wetting and drying subsequent to tillage*. Soil Sci. Soc. Am. Journal 50: 1133-1138.
- Moret D, Arrue J.L, Lopez M.V, R.Gracia. 2006. *Influence of fallowing practices on soil water and precipitation storage efficiency in semiarid Aragon (NE Spain)*. Agricultural water management 82:161-176.
- Schwartz R.C, R.L. Baumhardt, S.R. Evett 2010. *Tillage effects on soil water redistribution and bare soil evaporation throughout a season*. Soil and Tillage Research 110: 221-229.
- Strudley M., Green T. and J. Ascough. 2008. *Tillage effect on soil hydraulic properties in space and time: State of the science*. Soil and Tillage Research 99: 4-48.
- Wythers K., W. Lauenroth and J. Paruelo. 1999. *Bare soil evaporation under semiarid field conditions*. Soil Sci. Soc. Am. Journal 63:1341-1349.
- User Manual for the Profile Probe.2008. Delta Device Ltd Cambridge, UK.
- User manual for ML2 THETA PROBE, 1999. Delta-T Device Ltd Cambridge, UK.

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΥΟ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΤΗΣ ΑΛΑΤΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΙΚΟΥ ΔΙΑΛΥΜΑΤΟΣ ΑΠΟ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΣΥΣΚΕΥΩΝ

Γ. Κάργας¹, Δ. Χριστοφίδου, Π. Κερκίδης

¹Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων & Γεωργ. Μηχανικής, Εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής, Ιερά Οδός 75, 11855 Αθήνα
e-mail: kargas@aua.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του εδαφικού διαλύματος (σ_p) αποτελεί σημαντική παράμετρο εκτίμησης της αειφόρου γεωργικής ανάπτυξης και διαχείρισης των υδατικών πόρων. Στην παρούσα εργασία συγκρίνονται δύο μοντέλα πρόβλεψης της σ_p με χρήση δεδομένων από τις διηλεκτρικές συσκευές WET και 5TE. Οι συσκευές μετρούν τη διηλεκτρική σταθερά (ϵ) και τη φαινομενική ηλεκτρική αγωγιμότητα (σ_b) του εδάφους και μέσω αυτών υπολογίζεται η σ_p και η εδαφική υγρασία (θ). Για την πρόβλεψη της σ_p συγκρίνονται το γραμμικό μοντέλο (Hilhorst, 2000) και το μοντέλο των Rhoades et. al., (1976). Η αξιολόγηση των μοντέλων έγινε σε δύο πορώδη μέσα (αμμώδες, αργιλοπηλώδες) και σε τέσσερα διαφορετικά επίπεδα αλατότητας διαλύματος KCL (0.28, 1.25, 3.4 και 6 dS/m). Το γραμμικό μοντέλο με τα δεδομένα της WET φαίνεται να υπερεκτιμά τη σ_p για τιμές μέχρι 1.2 dS/m, ενώ την υποεκτιμά σημαντικά για μεγαλύτερες τιμές. Με την 5TE η σ_p παρουσιάζει μεγάλη διασπορά ιδιαίτερα για μεγάλες τιμές της. Το μοντέλο Rhoades et.al., (1976) αποδείχτηκε πιο αξιόπιστο δίνοντας πιστότερα αποτελέσματα και με τις δύο συσκευές.

Λέξεις κλειδιά: Αλατότητα, διηλεκτρική σταθερά, μοντέλα

COMPARISON OF TWO MODELS IN PREDICTING PORE WATER ELECTRICAL CONDUCTIVITY IN DIFFERENT POROUS MEDIA

G. Kargas¹, D. Christophidou, P. Kerkides¹

¹Agricultural University of Athens, Laboratory of Agricultural Hydraulics, Sector of Water Resources Management^a
75 Iera Odos St. 11855, Athens, Greece. E-mail: kerkides@aua.gr

ABSTRACT

In this paper a comparison of two models, the linear model by Hilhorst (2000) and the model of Rhoades et.al., (1976), predicting conductivity of the soil pore water (σ_p) is attempted using data obtained by two sensors, the WET and the 5TE. The evaluation of the models was performed in two different porous media (sand and clay loam) and in four levels of salinity. For the linear model, the WET ϵ - σ_b relationship is highly linear for all porous media tested, where σ_p is overestimated for salinity values up to 1.2 dS/m media except the sand, while for larger values it is significantly underestimated. The 5TE ϵ - σ_b relationship is also relatively linear for all soil types. There is a considerable scatter in σ_p and an opposite behavior than that for WET in larger σ_p values. The model of Rhoades et. al., (1976) gives in all cases better results and very close to actual values of σ_p .

Key words: Salinity, dielectric constant, models

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εδαφική αλατότητα αποτελεί σημαντικό παράγοντα που επηρεάζει την ανάπτυξη των καλλιεργειών και την παραγωγικότητα τους. Η συνηθισμένη διαδικασία για την εκτίμηση της εδαφικής αλατότητας είναι η λήψη εδαφικών δειγμάτων, η δημιουργία κορεσμένης εδαφικής πάστας και η λήψη του εκχυλίσματος κορεσμού (U.S. Salinity Laboratory Staff, 1954). Όμως, η μέθοδος αυτή είναι κοπιαστική και χρονοβόρα όταν πρόκειται για μεγάλο αριθμό δειγμάτων. Επιπλέον, τα δείγματα πρέπει να μεταφερθούν στο εργαστήριο για να μετρηθεί η ηλεκτρική αγωγιμότητα.

Η ανάπτυξη της μεθόδου TDR (Time Domain Reflectometry) η οποία παρέχει τη δυνατότητα για αυτόματες και επί τόπου μετρήσεις της φαινόμενης ηλεκτρικής αγωγιμότητας (σ_b) μπορεί να συμβάλει σημαντικά στη χρονική ανάλυση της συγκέντρωσης και της κίνησης των αλάτων στην εδαφική κατατομή. Παρόλα αυτά, η εκτίμηση της συγκέντρωσης των αλάτων από τη σ_b απαιτεί είτε καθορισμό σχέσης που να συνδέει απευθείας τη σ_b και τη συγκέντρωση των αλάτων είτε ένα ενδιάμεσο βήμα ώστε η συγκέντρωση να μπορεί να καθοριστεί από την ηλεκτρική αγωγιμότητα σ_p του νερού του εδαφικού πορώδους, (Amente et. al., 2000).

Η εκτίμηση της σ_b μέσω της μεθόδου TDR εξαρτάται από τη σ_p , την κατ' όγκο υγρασία θ και τα χαρακτηριστικά του εδάφους. Έχουν προταθεί διάφορα μοντέλα για τη συσχέτιση της σ_b και της σ_p (Rhoades et. al., 1976; Rhoades et. al., 1989; Mualem and Friedman 1991; Malicki et. al., 1994; Malicki and Walczak 1999; Hilhorst 2000; Amente et. al., 2000). Στο μοντέλο των Rhoades et. al., (1976) χρησιμοποιούνται εμπειρικές σταθερές, που ποικίλλουν για τα διάφορα εδάφη, και προκειμένου να καθοριστούν απαιτούνται εκ των προτέρων μετρήσεις των σ_b , σ_p και θ . Από την άλλη, ο Hillhorst (2000) παρουσίασε ένα γραμμικό μοντέλο που συνδέει τη διηλεκτρική σταθερά (ϵ) του εδάφους με τη σ_b . Ο Persson (2002), χρησιμοποιώντας μετρήσεις TDR, έδειξε ότι πράγματι η συνάρτηση $\epsilon = f(\sigma_b)$ είναι γραμμική, αλλά η μέση κλίση ήταν μικρότερη από ότι αναμενόταν. Οι Hamed et. al., (2003) συνέκριναν το γραμμικό μοντέλο και το μοντέλο Rhoades et. al., (1976) με μετρήσεις των συσκευών Sigma Probe και TDR, καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι, αν και η σχέση $\epsilon - \sigma_b$ ήταν γραμμική, το γραμμικό μοντέλο δε δίνει ικανοποιητικές προβλέψεις της σ_p . Οι Regalado et. al., (2007) έδειξαν ότι οι τιμές της σ_b που υπολογίστηκαν από τη συσκευή WET και από τη TDR συμπίπτουν, ενώ η σχέση $\epsilon - \sigma_b$ ήταν γραμμική για δύο εδαφικούς τύπους. Όμως, το μοντέλο Hillhorst (2000) απέτυχε να προβλέψει τη σ_p και με τα δεδομένα των δύο συσκευών. Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι μόνο σε λίγες περιπτώσεις έχει εξεταστεί το γραμμικό μοντέλο και κυρίως όσον αφορά τον αισθητήρα WET. Οι Kargas & Kerkides (2010), χρησιμοποιώντας μετρήσεις με τον WET έδειξαν ότι το γραμμικό μοντέλο μπορεί να προβλέψει τη σ_p με κάποια ακρίβεια στα χονδρόκοκκα πορώδη μέσα, ενώ η σχέση $\epsilon - \sigma_b$ ήταν γραμμική σε όλες τις περιπτώσεις μέσων που εξετάστηκαν. Φάνηκε, επίσης, ότι η κλίση εξαρτάται από τον τύπο του εδάφους αλλά και από τη σ_p .

Από τη μέχρι τώρα έρευνα δεν έχει γίνει κάποια αξιολόγηση του γραμμικού μοντέλου, με δεδομένα της συσκευής 5TE, η οποία είναι σχετικά νέα, φθηνότερη και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μετρήσεις ρουτίνας. Επιπλέον, παρά την ικανοποιητική απόδοση του μοντέλου Rhoades et. al., (1976) με χρήση δεδομένων από συσκευές TDR, μέχρι τώρα το μοντέλο δεν έχει αξιολογηθεί σε διηλεκτρικές συσκευές που λειτουργούν σε χαμηλές συχνότητες.

Οι στόχοι αυτής της μελέτης είναι: α) η αξιολόγηση του γραμμικού μοντέλου χρησιμοποιώντας δεδομένα από τους αισθητήρες 5TE και WET σε αμμώδες και αργιλοπηλώδες (clay-loam) έδαφος και σε διάφορα επίπεδα αλατότητας του εδαφικού

διαλύματος. β) η σύγκριση των μοντέλων Rhoades et.al.,(1976) και Hilhorst ως προς την πρόβλεψη της σ_p .

2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΕΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΙΣ

2.1 ΜΟΝΤΕΛΟ RHOADES et. al., (1976)

Σύμφωνα με το μοντέλο των Rhoades et. al., (1976) η συνολική ηλεκτρική αγωγιμότητα του εδάφους σ_b , ισούται με το άθροισμα της αγωγιμότητας της υγρής φάσης (σ_p) και της επιφανειακής αγωγιμότητας (σ_s). Υποθέτοντας ότι η σ_b σχετίζεται γραμμικά με την σ_p και θεωρώντας ότι μόνο το μέρος της επιφάνειας των στερεών του εδάφους που έρχεται σε επαφή με την υγρή φάση φέρει ηλεκτρικό φορτίο, τότε η σ_b δίνεται από την εξίσωση

$$\sigma_b = \sigma_p \theta \cdot T + \sigma_s \quad (2.1)$$

όπου η σ_s στα μη νατριωμένα εδάφη δεν εξαρτάται από την αλατότητα του εδαφικού διαλύματος και την υγρασία. Ο συντελεστής μεταφοράς T ενσωματώνει τη μαιανδρική φύση των γραμμών ροής και την όποια μείωση στην κινητικότητα των ιόντων κοντά στη διεπιφάνεια στερεής/ υγρής και υγρής /αέριας φάσης.

$$T = a \cdot \theta + b \quad (2.2)$$

όπου a και b είναι σταθεροί όροι.

Η (2.1) μπορεί να πάρει την μορφή
$$\frac{\sigma_b}{\sigma_p} = T\theta + \frac{\sigma_s}{\sigma_p} \quad (2.3)$$

η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί πιο εύκολα σε εφαρμογές, όπως ο υπολογισμός της σ_s και των a και b παραμέτρων.

Από τη (2.3) φαίνεται ότι για κάθε σ_p παίρνουμε διαφορετική καμπύλη $\sigma_b/\sigma_p = f(\theta, \sigma_s; a, b)$. Από τις καμπύλες αυτές, μπορούν να υπολογιστούν οι αντίστοιχες τιμές σ_s για κάθε τιμή σ_p . Για τον υπολογισμό της σ_s για το κάθε έδαφος έχει προταθεί γραφική μέθοδος από τους Rhoades et. al, (1976). Αναμενόμενο είναι η σ_s να εξαρτάται από τον τύπο του εδάφους και να είναι μεγαλύτερη στα εδάφη με μεγάλη ειδική επιφάνεια. Οι Rhoades et. al. (1989) πρότειναν μία άλλη ανεξάρτητη μέθοδο για τον υπολογισμό της σ_s , όχι μέσω γραφικής προσέγγισης αλλά από το ποσοστό της αργίλου, χρησιμοποιώντας τη σχέση

$$\sigma_s = c[\% \text{ clay}] + d \quad (2.4)$$

όπου $c=0.23$ dS/m και $d=0.021$ dS/m. Η (2.4) αναμένεται να μεταβάλλεται μεταξύ των διαφορετικών εδαφών και των τύπων των αργιλικών ορυκτών. Δεν πρέπει να αγνοηθεί και η επίδραση των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών των διηλεκτρικών αισθητήρων και πιο συγκεκριμένα της συχνότητας λειτουργίας τους.

Ο καθορισμός των παραμέτρων a και b του συντελεστή T μπορεί να γίνει με τη λύση της $T=a\theta+b=(\sigma_b-\sigma_s)/\theta \sigma_p$ ως προς θ .

Εφόσον η σ_b θεωρητικά θα είναι πάντα μεγαλύτερη από την σ_s , θα ισχύει πάντα ότι $T=a\theta+b>0$. Αυτό σημαίνει ότι $\theta>-b/a$, επειδή διαφορετικά $\sigma_p <0$, κάτι που είναι αδύνατο. Για το λόγο αυτό, πρέπει να οριστεί κατώτατη οριακή τιμή της θ ($\theta_t=-b/a$),

κάτω από την οποία το μοντέλο δε θα ισχύει. Επιπλέον, η σταθερά b πρέπει να έχει αρνητική τιμή, αφού η θ_t είναι θετική και από τον ορισμό $dT/d\theta = \alpha > 0$.

2.2 ΓΡΑΜΜΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ HILLHORST (2000)

Ο Hillhorst (2000), στηριζόμενος στις εργασίες των Malicki et. al., (1994) και Malicki & Walczak (1999), σύμφωνα με τις οποίες η σ_b κι η ε σχετίζονται σε μεγάλο βαθμό γραμμικά για ένα ευρύ φάσμα εδαφικών τύπων, παρουσίασε μία σχέση των σ_p - σ_b - ε . Η σχέση $\sigma_p = f(\sigma_b; \varepsilon)$ είναι:

$$\sigma_p = \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon - \varepsilon_0} \sigma_b \quad (2.5)$$

όπου ε_p είναι η διηλεκτρική σταθερά του εδαφικού νερού, που μπορεί να υποτεθεί ότι είναι ίση με αυτή του νερού ($\varepsilon_p = 80$), και ε_0 είναι η τιμή της ε όταν $\sigma_b = 0$. Κατ' αυτό τον τρόπο η (2.5) μπορεί να λυθεί ως προς $\varepsilon = f(\sigma_b; \sigma_p)$

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_p}{\sigma_p} \sigma_b + \varepsilon_0 \quad (2.6)$$

και έτσι
$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial \sigma_b} = \frac{\varepsilon_p}{\sigma_p} \quad (2.7)$$

όπου η κλίση είναι αντιστρόφως ανάλογη της σ_p του εδαφικού νερού. Από τη γραμμική σχέση $\varepsilon = f(\sigma_b)$, μπορεί να βρεθεί η κλίση $\partial \varepsilon / \partial \sigma_b$ και ο σταθερός όρος (ε_0).

Ο Hillhorst βρήκε ότι η ε_0 παίρνει τιμές από 1.9 ως 7.6. Αν και η ε_0 μπορεί να βρεθεί πειραματικά για κάθε εδαφικό τύπο, προτάθηκε ως αντιπροσωπευτική τιμή για όλους τους τύπους εδαφών η τιμή 4.1. Η (2.5) μπορεί να εφαρμοστεί στις περιπτώσεις όπου $\theta > 0.1 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Το μοντέλο του Hillhorst φαίνεται να είναι μια απλουστευμένη ειδική περίπτωση του μοντέλου των Rhoades et. al. (1976), με την έννοια ότι δεν λαμβάνει υπόψη ότι η σ_p μπορεί να επηρεαστεί από την αγωγιμότητα της επιφάνειας των στερεών του εδάφους την οποία θεωρεί 0 (Regalado et. al., 2007).

3. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

3.1 ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ WET

Πρόκειται για έναν καινούριο διηλεκτρικό αισθητήρα, που εκτιμά τη διηλεκτρική σταθερά με ηλεκτρομαγνητικό κύμα συχνότητας 20MHz. Ο αισθητήρας ανιχνεύει τις μεταβολές στο ηλεκτρομαγνητικό κύμα και στέλνει την πληροφορία αυτή στο μετρητή υγρασίας HH2, με τον οποίο είναι συνδεδεμένος (Delta -T Devices Ltd, 2005). Η ε_0 έχει την προεπιλεγμένη τιμή 4.1. Η σ_p υπολογίζεται από το γραμμικό μοντέλο το οποίο εφαρμόζεται για $\theta > 0.1 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Οι προβλέψεις του αισθητήρα WET για την σ_b μπορούν να θεωρηθούν εξίσου καλές με αυτές της μεθόδου TDR, σύμφωνα με τους Regalado et. al., (2007).

3.2. ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ 5TE

Ο αισθητήρας 5TE λειτουργεί σε συχνότητα 70MHz παρέχει μετρήσεις των ϵ , σ_b και της θερμοκρασίας. Εκτιμά την θ και την ηλεκτρική αγωγιμότητα του εδαφικού νερού (σ_p) από το γραμμικό μοντέλο του Hilhorst (2000). Για μεγαλύτερη ακρίβεια στις εκτιμήσεις της, ο κατασκευαστής προτείνει η τιμή ϵ_0 να είναι 6.

3.3. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΑ ΥΓΡΑ

Προκειμένου να αξιολογηθεί η ακρίβεια των αισθητήρων εξετάστηκε η μεταβολή της ϵ σε διαλύματα KCL αλατότητας από 0-8 dS/m.

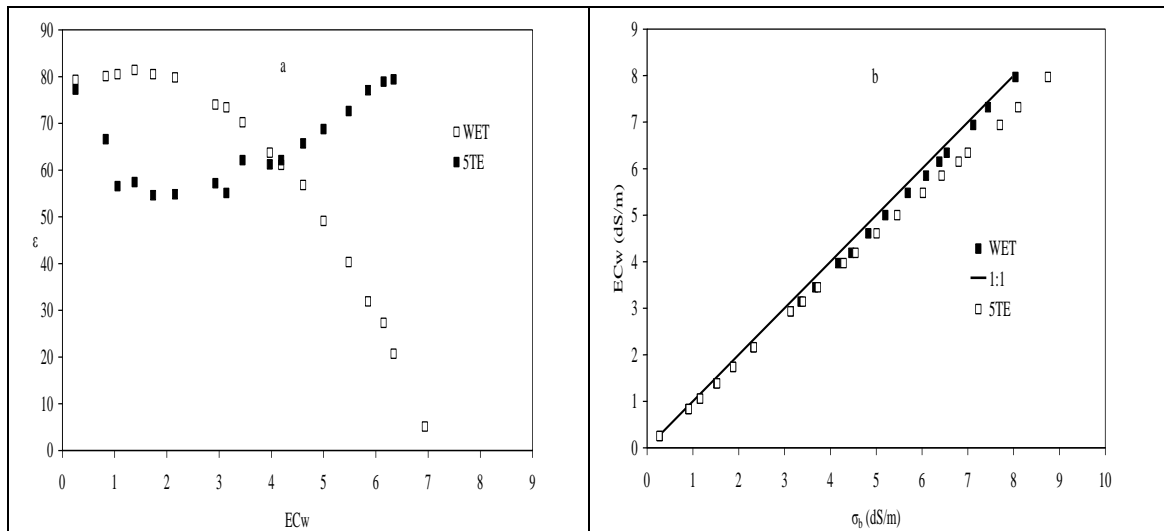
3.4. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΑ ΕΛΑΦΗ

Χρησιμοποιήθηκαν δύο πορώδη μέσα (αμμώδες και αργιλοπηλώδες έδαφος). Τα πορώδη μέσα ξηράθηκαν σε φούρνο στους 105°C για 24 ώρες. Έπειτα, συσκευάστηκε συγκεκριμένη μάζα κάθε ξηρού πορώδους μέσου σε PVC κατασκευές διαστάσεων 25*15*10 cm, προκειμένου να έχουμε σταθερή φαινόμενη πυκνότητα για το κάθε πορώδες μέσο. Στα ξηρά δείγματα, προστίθεται διάλυμα KCl γνωστής συγκέντρωσης, ώστε να επιτευχθεί η προκαθορισμένη υγρασία, από μηδενική ως σχεδόν τον κορεσμό, με σταθερά βήματα $\Delta\theta=0.05\text{m}^3/\text{m}^3$. Οι αισθητήρες τοποθετήθηκαν κάθετα στη μέση του κυλίνδρου. Οι μετρήσεις πάρθηκαν με τη συσκευή ανάγνωσης δεδομένων Decagon ProCheck για τον αισθητήρα 5TE και την HH2 για τον αισθητήρα WET. Για κάθε τύπο εδάφους και για κάθε επίπεδο υγρασίας και αλατότητας, εκτός από την ϵ και τη θ , προσδιορίστηκε η σ_b και υπολογίστηκε άμεσα η σ_p με το γραμμικό μοντέλο Hilhorst (2000) από τους δύο αισθητήρες. Επίσης με τη βοήθεια των δεδομένων των σ_b και θ υπολογίστηκε η σ_p με βάση το μοντέλο του Rhoades.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

4.1. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΑ ΥΓΡΑ

Στο σχήμα 1a φαίνεται η επίδραση της αλατότητας στον προσδιορισμό της ϵ για τους δύο αισθητήρες. Η ϵ για τον WET μειώνεται αισθητά, όταν η EC ξεπερνά τα 3 dS/m και μπορεί να πάρει ακόμα και αρνητικές τιμές για $EC > 8$ dS/m. Ο Hilhorst (2000) ανέφερε την τιμή 3 dS/m, πάνω από την οποία οι προβλέψεις της ϵ δεν είναι αξιόπιστες, για μία παρόμοια συσκευή (Sigma Probe – 30 MHz). Οι Regalado et.al., (2007), όπως και οι Kargas & Kerkides (2010), παρατήρησαν παραπλήσια αποτελέσματα. Για τον 5TE, η ϵ αρχικά μειώνεται μέχρι την τιμή 56.5 με την αύξηση της EC μέχρι 1.5 dS/m και παραμένει σχετικά σταθερή μέχρι την τιμή $EC= 3.15$ dS/m. Στην συνέχεια με την αύξηση της EC μέχρι τα 6.15 dS/m η ϵ αυξάνεται. Μετά παραμένει σταθερή στην τιμή $\epsilon=81-82$ με την αύξηση της EC. Από το σχήμα 1b φαίνεται ότι οι δύο αισθητήρες παρέχουν ικανοποιητικές τιμές για την EC. Υπάρχουν κάποιες αποκλίσεις σε μεγάλες τιμές EC, οι οποίες είναι μεγαλύτερες για τον 5TE. Η σύγκριση για κάθε συσκευή στα διαλύματα έγινε για τη σ_b , αφού δεν υπάρχει τρόπος να διαχωριστεί από την σ_p στα υγρά διαλύματα. Από τα παραπάνω συνάγεται ότι οι δύο αισθητήρες συμπεριφέρονται διαφορετικά όσον αφορά στην αλατότητα.

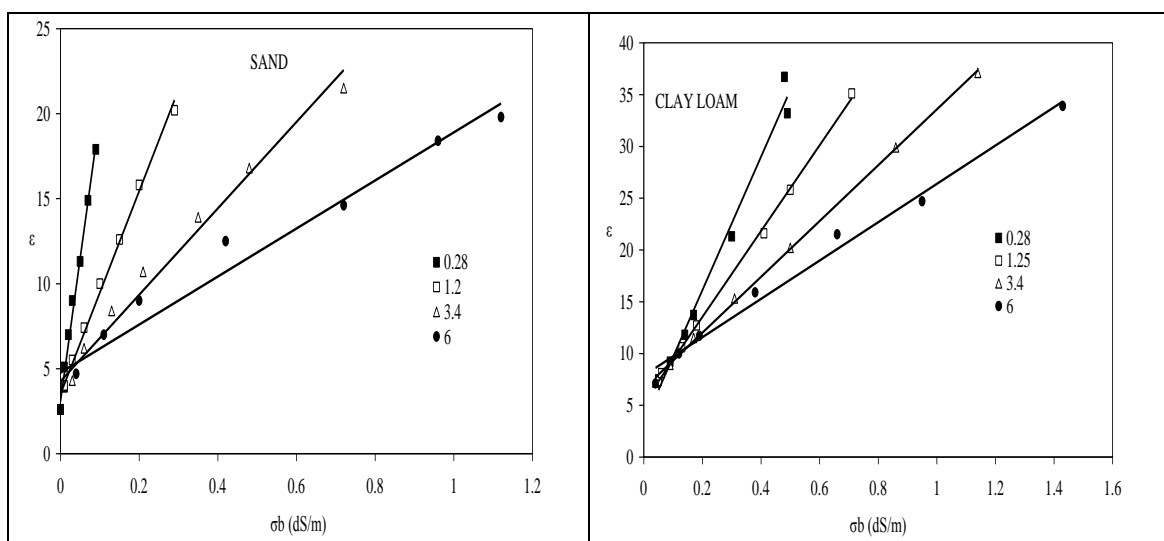


Σχήμα 1: α) Οι τιμές της ϵ συναρτήσει των τιμών EC για τα διάφορα διαλύματα KCL και β) η EC συναρτήσει της σ_b για τους αισθητήρες WET και STE

4.2. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΕΛΑΦΙΚΟΥ ΝΕΡΟΥ

4.2.1. Αισθητήρας WET

Στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται η σχέση ϵ - σ_b για τον αισθητήρα WET για τα 2 εξεταζόμενα εδάφη και για τα διάφορα επίπεδα αλατότητας. Αποδεικνύεται από τα αποτελέσματα, όπως και σε προηγούμενη μελέτη (Kargas & Kerkides, 2010), ότι η σχέση ϵ - σ_b είναι ισχυρά γραμμική για τα δύο πορώδη μέσα μέχρι και την τιμή $EC = 6$ dS/m. Ο συντελεστής R^2 είναι μεγαλύτερος από 0.99 σε όλες τις περιπτώσεις. Από το Σχήμα 2 και τον Πίνακα 1 φαίνεται ότι οι κλίσεις των καμπύλων μέχρι κάποιο συγκεκριμένο επίπεδο σ_p εξαρτώνται από δύο παράγοντες, τον τύπο του εδάφους και το επίπεδο αλατότητας. Συγκεκριμένα, σε μικρά επίπεδα αλατότητας η κλίση φαίνεται να εξαρτάται και από τον τύπο του εδάφους, με τα λεπτόκοκκα εδάφη να δίνουν μικρότερες κλίσεις. Φαίνεται, ακόμα, ότι για τιμές σ_p μικρότερες από 1.2 dS/m οι κλίσεις είναι μικρότερες από τη θεωρητική τιμή τους, δηλ. $\epsilon/\sigma_p = 80/\sigma_p$ ενώ, αντίθετα, προσεγγίζουν τις αντίστοιχες θεωρητικές για $EC > 3$ dS/m (Πίνακας 1).



Σχήμα 2: Η σχέση ϵ - σ_b για τον αισθητήρα WET για τα 2 εξεταζόμενα εδάφη και για τα διάφορα επίπεδα αλατότητας.

Πίνακας 1: Η κλίση και η τεταγμένη επί την αρχή της $\varepsilon = f(\sigma_b)$ για τα δύο πορώδη μέσα και τα διάφορα επίπεδα σ_p με τον αισθητήρα WET. Στην τελευταία στήλη δίνεται η θεωρητική τιμή της κλίσης ε_p/σ_p σύμφωνα με το μοντέλο Hilhorst

	Ηλεκτρική αγωγιμότητα διαλύματος (dS.m ⁻¹)	Κλίση $\frac{\partial \varepsilon}{\partial \sigma_b}$ (dS/m) ⁻¹	ε_0	Θεωρητική τιμή της κλίσης $\frac{\varepsilon_p}{\sigma_p}$ (dS/m) ⁻¹
S	0.28	167.9	3.08	285.7
	1.20	59.60	3.49	66.66
	3.40	25.41	4.25	23.50
	6.00	14.12	4.76	13.30
CL	0.28	65.01	3.01	285.7
	1.20	42.95	4.50	66.66
	3.40	28.27	5.58	23.50
	6.00	19.90	6.53	13.30

Η ε_0 αυξάνεται με την αύξηση της αλατότητας (Πίνακας 1). Τα ευρήματα αυτά συμφωνούν με αυτά των Bouksila et.al., (2008) αλλά διαφέρουν από αυτά των Hamed et.al., (2006), που ανέφεραν ότι η ε_0 επηρεάζεται κυρίως απ' τον τύπο του εδάφους. Επιπλέον, οι τιμές της ε_0 διαφέρουν από την προτεινόμενη 4.1 του Hilhorst (2000). Μάλιστα, η διαφορά αυτή γίνεται πολύ μεγάλη στα λεπτόκοκκα μέσα. Στο εγχειρίδιο χρήσης προτείνεται μέθοδος ειδικής βαθμονόμησης για την εύρεση της ε_0 , η οποία, όμως, έδωσε ακόμα και αρνητικές τιμές όταν εφαρμόστηκε, κάτι που δεν μπορεί να συμβαίνει. Χρησιμοποιώντας τη συγκεκριμένη τιμή ε_0 της άμμου στην (2.5) παρατηρείται βελτίωση της πρόβλεψης της σ_p .

Στη συνέχεια εξετάστηκε το μοντέλο Rhoades et.al. (1976) και εκτιμήθηκαν οι παράμετροι a, b και σ_s , εφαρμόζοντας τη μέθοδο της γραφικής προσέγγισης που προαναφέρθηκε. Οι τιμές των παραμέτρων (Πίνακας 2) είναι παρόμοιες με αυτές των Rhoades et.al.,(1976) για τα εδάφη ίδιας υφής.

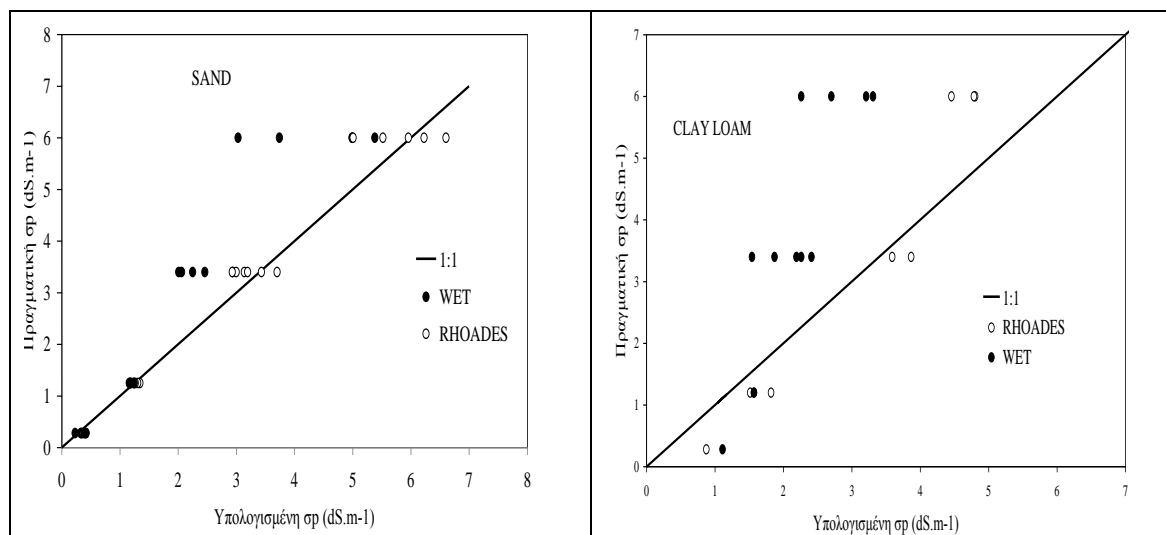
Πίνακας 2: Τιμές των παραμέτρων a, b και σ_s του μοντέλου των Rhoades et. al.,(1976) για τον αισθητήρα WET.

	σ_p (dS/m)	a	b	σ_s	R ²
S	0.28	2.891	-0.161	0.008	0.995
	1.2	1.865	0.009	0.005	0.997
	3.4	2.058	-0.166	0.044	0.996
	6	1.079	0.218	-0.072	0.984
	all	2.036	-0.082	0.025	0.912
CL	0.28	11.05	1.318	0.017	0.943
	1.2	5.793	-0.448	0.052	0.985
	3.4	3.711	-0.398	0.081	0.996
	6	2.603	-0.291	0.102	0.997
	all	3.674	-0.592	0.268	0.875

Από τον Πίνακα 2 είναι φανερό ότι σε κάθε έδαφος η σ_s για όλες τις τιμές της σ_p αυξάνεται με την αύξηση της περιεκτικότητας σε άργιλο, κάτι που είναι αναμενόμενο κι από τον ορισμό της σ_s . Οι τιμές της σ_s που βρέθηκαν παραπάνω από τα δεδομένα του WET αισθητήρα χρησιμοποιήθηκαν στην (2.4) και υπολογίστηκαν οι παράμετροι c ($=0,0076$ dS/m) και d ($=0,0804$ dS/m) με $R^2(=0,919)$. Οι διαφορές με τα αποτελέσματα άλλων ερευνητών (Hamed et.al., (2003) για δεδομένα από TDR και Leao et al., (2010) για τη συσκευή Hydra (50MHz)) πιθανά να αντικατοπτρίζουν τη διαφορά των συχνοτήτων λειτουργίας των συσκευών. Όσο για τις παραμέτρους a και b , φαίνεται ότι η a αυξάνεται, ενώ η b μειώνεται από το αμμώδες στο αργιλοπηλώδες μέσο.

Στο Σχήμα 3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της σύγκρισης των τιμών της σ_p όπως αυτές υπολογίστηκαν με το γραμμικό μοντέλο του Hilhorst, (2000) και το μοντέλο των Rhoades et. al., (1976) από δεδομένα της συσκευής WET. Το γραμμικό μοντέλο υπερεκτιμά την σ_p για αλατότητα <1.2 dS/m στο αργιλοπηλώδες έδαφος, ενώ σε υψηλότερη αλατότητα την υποεκτιμά σημαντικά. Στην άμμο, οι προβλέψεις της σ_p για αλατότητα 0.28 και 1.25 dS/m συμπίπτουν με τις πραγματικές τιμές, ενώ για 3.4 και 6 dS/m η σ_p υποεκτιμάται. Το μοντέλο των Rhoades et. al., (1976), με τον αισθητήρα WET, δίνει σε όλες τις περιπτώσεις αποτελέσματα πιο κοντά στις πραγματικές τιμές από ότι το γραμμικό. Ως μειονέκτημά του μπορεί να θεωρηθεί η αδυναμία του να δώσει αξιόπιστες προβλέψεις για $\theta < \theta_t = -b/a$ και ότι το όριο αυτό εξαρτάται κυρίως από τον τύπο του πορώδους μέσου. Παρόμοιες παρατηρήσεις έχουν αναφερθεί και από τους Mortl et.al., (2011) με τη συσκευή Hydra (50MHz) σε οργανικά και ανόργανα εδάφη.

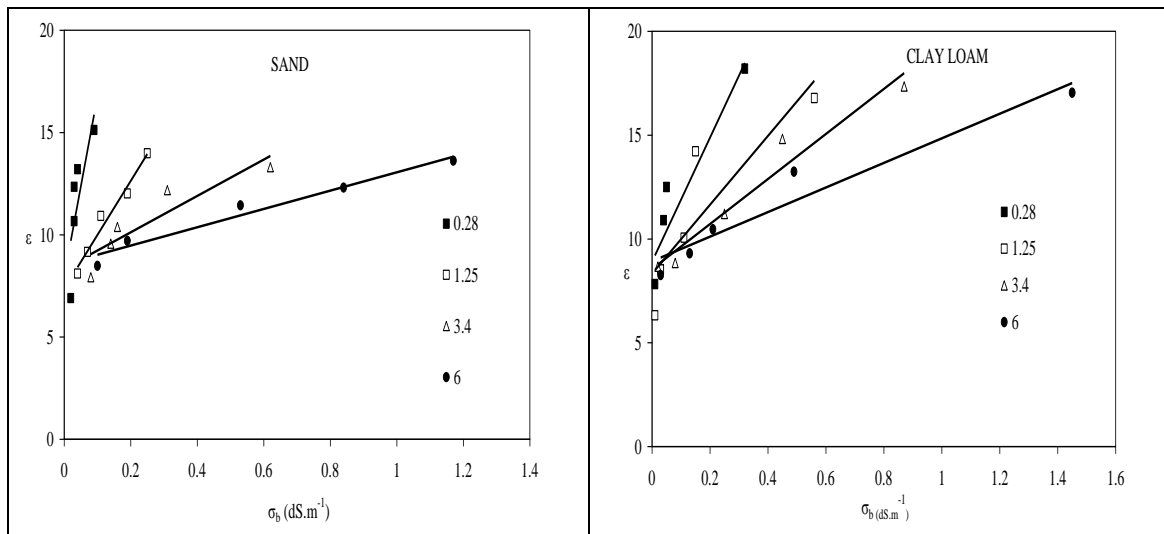
Παρατηρείται, ακόμα, ότι οι προβλεπόμενες τιμές της σ_p για μικρές θ και μικρές τιμές σ_p αποκλίνουν σημαντικά από τις πραγματικές και αποκτούν ακόμα και αρνητικές τιμές σε κάποιες περιπτώσεις. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στο ότι οι τιμές της σ_s είναι μεγαλύτερες αυτών της σ_b . Το γεγονός αυτό μπορεί να οφείλεται σε υποεκτίμηση της σ_b για χαμηλές τιμές θ ή σε υπερεκτίμηση της σ_s . Αυτό το πρόβλημα τείνει να εξαφανιστεί για μεγαλύτερες τιμές σ_p . Γενικότερα, μπορεί να πει κανείς ότι το μοντέλο των Rhoades et al.,(1976), όταν χρησιμοποιεί δεδομένα από αισθητήρα WET, μπορεί να εφαρμοστεί σε όλες σχεδόν τις περιπτώσεις όπου η θ είναι σχετικά υψηλή και τα επίπεδα αλατότητας είναι μεγαλύτερα από κάποιο όριο (1-2 dS/m).



Σχήμα 3: Σύγκριση μεταξύ των προβλεπόμενων τιμών σ_p με το γραμμικό μοντέλο (WET) και μοντέλο των Rhoades et.al., (1976)

4.2.2. Αισθητήρας 5TE

Από τα αποτελέσματα, (Σχήμα 4), συνάγεται ότι η σχέση ε - σ_b είναι γραμμική και για τους δύο τύπους εδαφών και για EC μέχρι 6 dS/m. Οι τιμές του R^2 κυμαίνονται από 0.920 έως 0.995 και είναι μικρότερες από αυτές του WET αισθητήρα.



Σχήμα 4: Σχέση $\varepsilon = f(\sigma_b)$ για τα διάφορα επίπεδα αλατότητας για τον αισθητήρα 5TE.

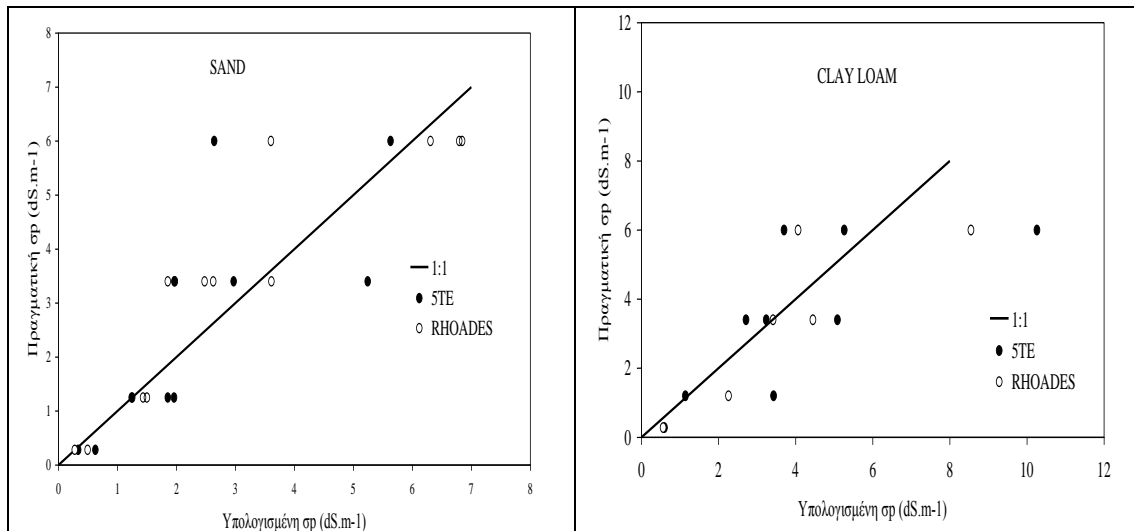
Η γραμμικότητα μάλιστα μειώνεται σημαντικά αν ληφθούν υπόψη οι τιμές των ε και σ_b που αντιστοιχούν σε μικρές θ . Η κλίση των ευθειών ε - σ_b από τα δεδομένα του αισθητήρα 5TE είναι πολύ μικρότερη από αυτή του WET, για τα ίδια επίπεδα αλατότητας. Επίσης, η κλίση για όλες τις EC είναι σαφώς μικρότερη από τη θεωρητική, σε αντίθεση με τον WET, ενώ φαίνεται να επηρεάζεται λιγότερο από τον τύπο του εδάφους σε σχέση με τον WET και περισσότερο από την αλατότητα.

Η ε_0 για τον αισθητήρα 5TE (Πίνακας 3) φαίνεται να είναι ανεξάρτητη από τα επίπεδα αλατότητας και τον τύπο του εδάφους, σε αντίθεση με τον WET. Επίσης, οι τιμές ε_0 διαφέρουν από την προτεινόμενη απ' τον κατασκευαστή

Πίνακας 3: Η κλίση της $\varepsilon = f(\sigma_b)$ και η ε_0 για τα δύο πορώδη μέσα και τα διάφορα επίπεδα αλατότητας για τον αισθητήρα 5TE. Στην τελευταία στήλη δίνεται η θεωρητική τιμή της κλίσης ε_p/σ_p σύμφωνα με το μοντέλο του Hilhorst (2000)

	Ηλεκτρική αγωγιμότητα διαλύματος ($\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$)	Κλίση $\frac{\partial \varepsilon}{\partial \sigma_b}$ ($\text{dS}/\text{m})^{-1}$	ε_0	Θεωρητική τιμή της κλίσης $\frac{\varepsilon_p}{\sigma_p}$ ($\text{dS}/\text{m})^{-1}$
S	0.28	88.16	7.94	285.7
	1.20	26.37	7.35	66.66
	3.40	8.89	8.33	23.50
	6.00	4.48	8.57	13.30
CL	0.28	29.89	8.90	285.7
	1.20	16.59	8.32	66.66
	3.40	10.84	8.54	23.50
	6.00	5.91	8.92	13.30

Από το Σχήμα 5 φαίνεται ότι το γραμμικό μοντέλο με δεδομένα από τον 5TE δίνει αποτελέσματα με μεγάλη διασπορά για τις διάφορες τιμές της σ_p .



Σχήμα 5: Σύγκριση μεταξύ των προβλεπόμενων τιμών σ_p με το γραμμικό μοντέλο (5TE) και μοντέλο των Rhoades et.al., (1976)

Η σ_p υπερεκτιμάται ελαφρά για αλατότητες 0.28 και 1.25 dS/m στην άμμο, ενώ υποεκτιμάται όσο η αλατότητα αυξάνεται. Στο αργιλοπηλώδες έδαφος η διασπορά των τιμών είναι πολύ μεγάλη, ιδιαίτερα όσο αυξάνεται η αλατότητα με συνέπεια η όποια εκτίμηση να είναι επισφαλής.

Από τον Πίνακα 4 φαίνεται ότι, όπως και στην περίπτωση του WET, η επιφανειακή αγωγιμότητα σ_s αυξάνεται όσο τα εδάφη γίνονται πιο λεπτόκοκκα. Η χρήση της (2.4) εφαρμόζεται με παρόμοιο τρόπο όπως στον αισθητήρα WET δίνοντας εκτιμήσεις για τις παραμέτρους c και d με τις ακόλουθες τιμές 0.0058 dS/m και 0.069 dS/m αντίστοιχα και $R^2=0.916$. Από τα αποτελέσματα συνάγεται ότι οι δύο αισθητήρες δίνουν διαφορετική σχέση σ_s και (%) αργίλου και αυτό μπορεί να οφείλεται στη συχνότητα λειτουργίας. Μπορεί να παρατηρήσει κανείς εδώ ότι στα εδάφη όπου το ποσοστό αργίλου είναι σχεδόν μηδενικό (άμμος) οι τιμές d εκφράζουν την σ_s σύμφωνα με την (2.4) και από αυτή την άποψη οι τιμές της σ_s για τους δύο αισθητήρες είναι διαφορετικές. Για τις παραμέτρους a και b , οι οποίες σχετίζονται με την μαιανδρικότητα των γραμμών ροής του εδάφους, φαίνεται ότι, ενώ η a αυξάνεται, η b μειώνεται από τα χονδρόκοκκα στα λεπτόκοκκα εδάφη. Παρόμοια συμπεριφορά επέδειξε και ο αισθητήρας WET.

Πίνακας 4: Τιμές των παραμέτρων a , b και σ_s του μοντέλου των Rhoades et. al.,(1976) για τον αισθητήρα 5TE.

	σ_p (dS/m)	a	b	σ_s	R^2
S	0.28	3.911	-0.773	0.021	0.894
	1.2	2.17	-0.222	0.017	0.995
	3.4	2.689	-0.567	0.122	0.951
	6	2.658	-0.419	0.120	0.992
	<i>all</i>	<i>1.537</i>	<i>-0.052</i>	<i>0.006</i>	<i>0.89</i>
CL	0.28	51.020	-20.900	0.590	0.870
	1.2	16.910	-6.505	0.770	0.933
	3.4	5.483	-1.499	0.340	0.994
	6	6.511	-2.110	0.570	0.943
	<i>all</i>	<i>3.990</i>	<i>-0.992</i>	<i>0.240</i>	<i>0.83</i>

Οι προβλέψεις των τιμών της σ_p από το μοντέλο του Rhoades, χρησιμοποιώντας δεδομένα από τον 5TE, είναι καλύτερες από αυτές του γραμμικού μοντέλου. Δύο αδύναμα σημεία του μοντέλου των Rhoades et al. είναι: πρώτον, η αποτυχία του να προβλέψει την αλατότητα για $\theta < \theta_t$, η οποία εξαρτάται κυρίως από το τύπο του πορώδους μέσου. Στις περιπτώσεις που εξετάστηκαν, το όριο δεν ήταν το ίδιο για τον WET. Δεύτερο, η μη ικανοποιητική απόδοση σε χαμηλές τιμές αλατότητας το οποίο μπορεί να οφείλεται στη λάθος πρόβλεψη της σ_b .

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Και οι δύο αισθητήρες παρέχουν σχετικά ακριβείς προβλέψεις της ε σε υγρά γνωστής ε , με εξαίρεση τον 5TE σε ενδιάμεσες τιμές, όπου παρατηρείται υπερεκτίμηση. Το μοντέλο Rhoades δίνει πολύ καλύτερα αποτελέσματα από το γραμμικό μοντέλο Hilhorst (2000) για τις δύο συσκευές. Για τον WET το γραμμικό μοντέλο σε υψηλές τιμές της αλατότητας την υποεκτιμά. Για τον αισθητήρα 5TE το γραμμικό μοντέλο έχει αντίθετη συμπεριφορά στα ίδια επίπεδα αλατότητας. Στα λεπτόκοκκα μέσα υπάρχει μια γενικότερη απόκλιση των τιμών της σ_p και η κλίση της $\varepsilon - \sigma_b$ φαίνεται να επηρεάζεται από την αλατότητα και λιγότερο από τον εδαφικό τύπο συγκριτικά με τη συσκευή WET. Αυτό πιθανότερα να οφείλεται στην υψηλότερη συχνότητα λειτουργίας. Η ε_0 για τον 5TE φαίνεται να είναι σχετικά ανεξάρτητη από αυτούς τους παράγοντες. Για τον WET, η σχέση $\varepsilon - \sigma_b$ είναι ισχυρά γραμμική για όλους τους εδαφικούς τύπους. Οι κλίσεις, μέχρι ένα επίπεδο αλατότητας, εξαρτώνται από τον εδαφικό τύπο και από την αλατότητα, ενώ πάνω από αυτό το όριο φαίνεται να επηρεάζονται κυρίως από την αλατότητα. Αδύναμο σημείο για το μοντέλο Rhoades et al (1976) είναι ότι περιγράφει ανεπαρκώς την εξάρτηση της σ_b από τη θ και την σ_p , όταν η $\theta < \theta_t$, όπου το όριο αυτό εξαρτάται κυρίως από τον τύπο του πορώδους μέσου. Γενικά, φαίνεται ότι η απόκριση των αισθητήρων στην αλατότητα είναι καλύτερη, όταν κυριαρχεί η φάση του κινούμενου νερού.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Amente G, Baker M and C. Reece 2000. *Estimation of soil electrical conductivity from bulk soil electrical conductivity in sandy soil*. Soil Sci. Soc. Amer. Journal 64:1931-1939.
- Bouksila F., Persson M., Berndtsson R. and A. Bahri. 2008. *Soil water content and salinity using different dielectric methods in saline gypsiferous soil*. Hydrological Sciences 53(1):253-265.
- Decagon devices, Inc. 2008. Operator's Manual Version 3.
- Delta –T Devices Ltd. 128. Low road Burwell CAMBRIDGE CB5 0EJ. UK
www:http://www.delta-t.co.uk. User manual for the WET sensor (type WET-2), 2005.
- Hamed Y, M. Persson and R. Berndtsson, 2003. *Soil solution electrical conductivity measurements using different dielectric techniques*. Soil Sci. Soc. Amer. Journal 67: 1071-1077.
- Hamed Y, G. Samy and M. Persson, 2006. *Evaluation of the WET sensor compared to time domain reflectometry*. Hydrological Sciences 51:671-681.
- Hilhorst M.A. 2000. *A pore water conductivity sensor*. Soil Sci. Soc. Amer. Journal 64: 1922-1925.

- Kargas G. and Kerkides p. 2010. *Evaluation of a dielectric sensor for measurements of soil water electrical conductivity*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 136(8):553-558.
- Leao T., Perfect E. and Tyner J. 2010. *New semi-empirical formulae for predicting soil solution conductivity from dielectric properties at 50MHz*. Journal of Hydrology 393:321-330.
- Malicki M. and R. Walczak, 1999. *Evaluating soil salinity status from electrical conductivity and permittivity*. Eur. Journal soil science 50:505-514.
- Malicki M., Walczak R, Koch S and Fluhler H. 1994. *Determining soil salinity from simultaneous readings of its electrical conductivity and permittivity using TDR*. In :Proceedings of the symposium on Time Domain Reflectometry in Environmental, Infrastructure and Mining Applications (Evanston, Illinois, 7-9 September, 1994),328-336. US Bureau of Mines, special publication SP 19-94, NTIS PB-105789.
- Mortl A, Munoz-Carpena R, Kaplan D. and Y. Li 2011. *Calibration of a combined dielectric probe for soil moisture and pore water salinity measurement in organic and mineral coastal wetland soils*. Geoderma 161:50-62.
- Mualem Y. and S. Friedman, 1991. *Theoretical prediction of electrical conductivity in saturated and unsaturated soil*. Water Resour. Res. 27:2771-2777.
- Persson M., 2002. *Evaluating the linear dielectric constant – electrical conductivity model using time domain reflectometry*. Hydrological Sciences 47: 269-277.
- Regalado C., A. Ritter and R. M. Rodriguez-Gonzalez, 2007. *Performance of the commercial WET capacitance sensor as compared with Time domain reflectometry in volcanic soils*. Vadoze zone Journal 6:244-254.
- Rhoades J, P. Ratts and R. Prather, 1976. *Effects of liquid-phase electrical conductivity, water content, and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity*. Soil Sci. Soc. Amer. Journal 40:651-655.
- Rhoades J.D., Manteghi N.A, Shouse P.J., Alves W.J. 1989. *Soil electrical conductivity and soil salinity: new formulations and calibrations*. Soil Sci. Soc. Amer. Journal 53:433-439.
- U.S. Salinity Laboratory Staff. 1954. *Diagnosis and Improvement of saline and alkali soils*. USDA Handb. 60. U.S. Gov. Print. Office, Washington, DC.
- Vogeler I., Clothier B.E., Green S.R., Scotter D.R., Tilman R.W. 1996. *Characterizing water and solute movement by TDR and disc permeametry*. Soil Sci. Soc. Amer. Journal 60:5-12

Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΗΤΙΚΩΝ ΜΕΤΑΧΕΙΡΙΣΕΩΝ ΣΤΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΩΝ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΤΗΣ ΑΝΩΤΕΡΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ

Γ. Κάργας¹, Π. Κερκίδης

Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων &
Γεωργ. Μηχανικής, Εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής,
Ιερά Οδός 75, 11855 Αθήνα
¹e-mail: kargas@aua.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η μεταβολή στο χρόνο των υδραυλικών ιδιοτήτων της ανώτερης εδαφικής στρώσης ενός γυμνού πηλώδους εδάφους το οποίο έχει υποστεί μηχανική κατεργασία με περιστροφικό καλλιεργητή και στο οποίο τα ζιζάνια απομακρύνονται με χημική καταπολέμηση. Οι ιδιότητες που εξετάζονται είναι η χαρακτηριστική καμπύλη υγρασίας (ΧΚΥ) και η υδραυλική αγωγιμότητα στον κορεσμό (K_s). Η μηχανική κατεργασία προκαλεί μεταβολή της ΧΚΥ κυρίως στα μικρά φορτία πίεσης (H) κοντά στον κορεσμό και αύξηση της υγρασίας κορεσμού (θ_s). Επίσης η K_s μειώνεται με τη μηχανική κατεργασία ενώ στη συνέχεια φαίνεται να μεταβάλλεται σαν αποτέλεσμα κυρίως της βροχόπτωσης και των διαδοχικών κύκλων διαβροχής-ξήρανσης του εδάφους. Με τη χρήση του μοντέλου Mualem-Van Genuchten υπολογίζεται η σχέση της υδραυλικής αγωγιμότητας $K(\theta)$ πριν και μετά την μηχανική κατεργασία. Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι η σχέση $K(\theta)$ μεταβάλλεται ισχυρά στο χρόνο κάτι το οποίο συνήθως δεν λαμβάνεται υπόψη στα μοντέλα πρόβλεψης της διήθησης του νερού στο έδαφος.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ Υδραυλικές ιδιότητες, καλλιεργητικές μεταχειρίσεις, έδαφος

THE EFFECT OF CULTIVATION PRACTICES ON SOIL HYDRAULIC PROPERTIES OF UPPER SOIL LAYER

G. Kargas¹, P. Kerkides

Agricultural University of Athens, Department of Natural Resources and
Agricultural Engineering, 75 Iera Odos, 11855, Athens, Greece
¹e-mail: kargas@aua.gr

ABSTRACT

In the present work the temporal variation of hydraulic properties of the upper soil layer in a bare loam soil which has been roto tilled has been studied. The soil hydraulic properties which have been determined were the soil moisture curve (SMC) and the hydraulic conductivity K . From the results it was shown that the SMC changed in the range of pressure head near saturation while the θ at saturation increased. The K_s decreased after tillage while during the year it changed on the cause of rainfall and subsequent wetting –drying cycles. The Mualem-van Genuchten model was used to calculate the relationship $K(\theta)$. From the results it was found that the relationship $K(\theta)$ changed significantly after tillage. This phenomenon usually is not considered in the numerical models that calculate the infiltration rate and depth of water in the soil.

KEY WORDS: Hydraulic properties, cultivation practices, soil.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι διάφορες καλλιεργητικές επεμβάσεις στην επιφανειακή εδαφική στρώση μπορεί να μεταβάλλουν σημαντικά την κατανομή του μεγέθους των πόρων με άμεση συνέπεια τη μεταβολή των υδραυλικών ιδιοτήτων της. Από τη μέχρι τώρα έρευνα έχει τεκμηριωθεί ότι οι μεταβολές αυτές εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες (Strudley et al. 2008). Έχει διαπιστωθεί ότι το όργωμα του εδάφους μειώνει τη φαινόμενη πυκνότητα στερεών (ρ_b) λόγω της χαλάρωσης της ανώτερης εδαφικής στρώσης και επηρεάζει τη χαρακτηριστική καμπύλη υγρασίας (ΧΚΥ) και την υδραυλική αγωγιμότητα ειδικά στα φορτία πίεσης κοντά στον κορεσμό. Οι Lindstrom and Onstad (1984) παρατήρησαν ότι η άροση προκαλεί αύξηση του πορώδους που οφείλεται κυρίως στη μεταβολή των πόρων που αντιστοιχούν σε εύρος αρνητικής πίεσης από 0-60 cm. Οι Mapa et al., (1986) έδειξαν ότι οι αλλαγές στη ΧΚΥ για τα εδάφη που εξέτασαν εντοπίζονται κυρίως στο εύρος πίεσης από 0-300 cm. Ο Poulouvassilis (1990) διαπίστωσε ότι το καλλιεργημένο έδαφος έχει μεγαλύτερη τιμή υγρασίας κορεσμού και παρουσιάζει μικρότερη αναλογία μεγάλων πόρων στο εύρος πιέσεων 0-60 cm συγκριτικά με το ακαλλιεργητο έδαφος καθώς και μεγαλύτερη αναλογία μικρών πόρων. Οι Kargas et al. (2012) παρατήρησαν σε γυμνό πηλώδες έδαφος αύξηση της θ_s μετά ακριβώς από τη μηχανική κατεργασία του. Στην αύξηση του πορώδους συμβάλλει το μεγαλύτερο κλάσμα των μικρότερων πόρων που δημιουργούνται με την ταυτόχρονη καταστροφή των μεγάλων. Διαφορά μεταξύ των δύο καταστάσεων έχει παρατηρηθεί και στη συνέχεια του πορώδους. Κατά συνέπεια, οι αλλαγές αυτές μπορεί να μεταβάλλουν τη ΧΚΥ σε κάποιο εύρος πίεσης.

Όσον αφορά στην υδραυλική αγωγιμότητα κάποιοι ερευνητές αναφέρουν ότι η κατεργασία προκαλεί αύξηση της υδραυλικής αγωγιμότητας (K) με το όργωμα (Mc Garry et al. 2000; Kribaa et al. 2001; Moret and Arrue 2007), ενώ άλλοι αναφέρουν μείωση (Mapa et al. 1986; Benjamin 1993; Mahboudi et al. 1993; Azooz and Arshad 1996, 2001) και κάποιοι ερευνητές (Ehlers W. and van der Ploeg 1976; Poulouvassilis, 1990; Kargas et al. 2012) αναφέρουν ότι η $K(\theta)$ στο ανόργωτο έδαφος ήταν μεγαλύτερη από αυτή στο οργωμένο σε υψηλές υγρασίες αλλά ήταν χαμηλότερη από χαμηλές έως μέτριες υγρασίες ($0.35-0.4 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$). Οι Hu and Mermound (2001) βρήκαν ότι η K_s συσχετίζεται με τη φαινομενική πυκνότητα με μια μη γραμμική σχέση. Μάλιστα έδειξαν ότι μία αύξηση της φαινομενικής πυκνότητας κατά 10% προκαλεί μείωση της K_s μεγαλύτερη από 50%. Οι Zhou et. al., (2008) αναφέρουν ότι το ποσοστό της υγρασίας κατά τη μέτρηση μπορεί να επηρεάζει τη τιμή της K_s . Σε συνθήκες χαμηλής υγρασίας παρατηρήθηκε αύξηση των μεγάλων πόρων που οδηγεί σε αύξηση της K_s συγκριτικά με συνθήκες υψηλής υγρασίας. Φαίνεται ότι το μέγεθος των αλλαγών αυτών εξαρτάται από το είδος και τη δομή του εδάφους, την οργανική ουσία, τις καλλιεργητικές τεχνικές, την ύπαρξη ή μη φυτοκάλυψης και την κατ' όγκο εδαφική υγρασία (θ) στην οποία πραγματοποιήθηκε η μέτρηση.

Έχει επίσης αποδειχθεί ότι οι επιδράσεις των καλλιεργητικών τεχνικών στις υδραυλικές ιδιότητες της ανώτερης εδαφικής στρώσης δεν είναι μόνιμες, αλλά μεταβάλλονται στον χρόνο μετά το όργωμα (Green et al. 2003; Fuentes et al. 2004; Strudley et al. 2008; Xu et al. 2009). Στο γεγονός αυτό συμβάλλει η ένταση της βροχόπτωσης η οποία προκαλεί καταστροφή των συσσωματωμάτων και οι διαδοχικοί κύκλοι διαβροχής-ξήρανσης οι οποίοι μπορεί να μεταβάλλουν την K λόγω της μεταβολής του μεγέθους και της αναλογίας των μεσοπόρων (Messing and Jarvis, 1993; Schwen et al. 2011). Οι Ahuja et al. (1998) πρότειναν μία μεθοδολογία προσδιορισμού της ΧΚΥ του καλλιεργημένου εδάφους, όπως μεταβάλλεται στον χρόνο με τη χρήση των μεταβολών της φαινομενικής πυκνότητάς του ή του πορώδους. Οι Leij et al. (2002) παρουσίασαν ένα μοντέλο πρόβλεψης της εξέλιξης της κατανομής του μεγέθους των

πόρων μετά το όργωμα και εξέτασαν την δυνατότητα εφαρμογής του στην πρόβλεψη της ΧΚΥ και της $K(\theta)$. Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι η πρόβλεψη της ΧΚΥ είναι αρκετά καλή ενώ για την $K(\theta)$ η εφαρμογή του μοντέλου Mualem-van Genuchten (1980) απέτυχε για τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν.

Επίσης άλλοι ερευνητές εξέτασαν την επίδραση του σχηματισμού κρούστας στην επιφάνεια του εδάφους ειδικά πάνω στην $K(\theta)$. Ο σχηματισμός της σχετίζεται περισσότερο με την ένταση της βροχόπτωσης παρά με το ύψος της. Όπως αναφέρει ο Hillel (1998) η κρούστα χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη φαινόμενη πυκνότητα, αναλογικά μικρότερους πόρους και K_s σε σχέση με το υποκείμενο έδαφος. Έτσι ο σχηματισμός της μειώνει το ύψος του νερού που διηθείται στο έδαφος.

Παρόλα αυτά στις αριθμητικές προσομοιώσεις για τη μελέτη της διήθησης και ανακατανομής του εδαφικού νερού οι υδραυλικές ιδιότητες θεωρούνται σταθερές στο χρόνο. Μπορεί να υποστηριχτεί ότι το μεγαλύτερο μέρος της έρευνας έχει προσανατολιστεί στη μελέτη των υδραυλικών ιδιοτήτων και των αλλαγών ακριβώς μετά τις διάφορες καλλιεργητικές επεμβάσεις (Messing and Jarvis, 1993; Moret and Argue, 2007; Aschonitis et al. 2012). Έτσι υπάρχει σχετικά μεγάλο ερευνητικό κενό στη μελέτη της μεταβολής στο χρόνο των υδραυλικών και φυσικών ιδιοτήτων των εδαφών μετά το όργωμα.

Στην παρούσα εργασία διερευνούμε τη μεταβολή στο χρόνο της ΧΚΥ σε ένα καλλιεργημένο γυμνό έδαφος δια μέσου της μεταβολής των συντελεστών της εξίσωσης van Genuchten (1980) καθώς και τη μεταβολή της K_s και της συνάρτησης $K(\theta)$.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ

Ο προσδιορισμός της ΧΚΥ γίνεται σε αδιατάρακτα εδαφικά δείγματα με τη χρήση της συσκευής sand kaolin box (Romano et.al., 2002). Από ένα οριζοντιωμένο πειραματικό τεμάχιο διαστάσεων 5X5 σε κάθε χρονική στιγμή λαμβάνονται 5 εδαφικά δείγματα από το επιφανειακό στρώμα βάθους 0-5 cm στα οποία γίνεται προσδιορισμός της ΧΚΥ. Η ΧΚΥ κάθε χρονικής στιγμής προκύπτει από τον μέσο όρο των 5 επαναλήψεων. Οι χρονικές στιγμές λήψης των δειγμάτων ήταν 6/10/2010, 11/10/2010, 12/1/2011, 16/5/2011 και 22/11/2011. Στις 11/10/2010 πραγματοποιήθηκε μηχανική κατεργασία του εδάφους με περιστροφικό καλλιεργητή. Η δειγματοληψία 11/10/2011 έγινε ακριβώς μετά τη μηχανική κατεργασία. Ο προσδιορισμός της ΧΚΥ έγινε μέχρι φορτίο πίεσης $H = -250$ cm περίπου. Για την αναλυτική έκφραση της ΧΚΥ χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση van Genuchten (van Genuchten, 1980). Για τον προσδιορισμό των συντελεστών της εξίσωσης χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό RETC (van Genuchten et al. 1991).

Η εξίσωση van Genuchten δίνεται από την εξίσωση

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (aH)^n\right]^m} \quad (2.1)$$

όπου θ είναι η κατ' όγκο υγρασία (cm^3/cm^3) σ' ένα δεδομένο φορτίο πίεσης H (cm), θ_r η υπολειπόμενη υγρασία cm^3/cm^3 , θ_s η υγρασία κορεσμού (cm^3/cm^3), a (cm^{-1}) και n ,

$m=1-1/n$ αδιάστατες μεταβλητές. Η τιμή $\frac{1}{a}$ σχετίζεται με την τιμή του φορτίου πίεσης

H στην οποία εμφανίζεται είσοδος του αέρα σε κορεσμένο δείγμα εδάφους.

Η τιμή του H στο σημείο καμπής της εξίσωσης (1) δίνεται από την εξίσωση

$$H = \frac{1}{a} m^{1-m} \quad (2.2)$$

ενώ η κλίση της καμπύλης (1) στο σημείο καμπής δίνεται από την εξίσωση

$$S = m^{1+m} n a (\theta_s - \theta_r) (1+m)^{-m-1} \quad (2.3)$$

Η ισοδύναμη διάμετρος των πόρων στο σημείο καμπής, υποθέτοντας ότι οι πόροι είναι κυλινδρικού σχήματος, δίνεται από την εξίσωση

$$d = \frac{4a\sigma \cos(\gamma)}{\rho g m^{1-m}} \quad (2.4)$$

όπου σ η επιφανειακή τάση (N/m), γ η γωνία επαφής, ρ η πυκνότητα του νερού (Kg/m^3), g η επιτάχυνση της βαρύτητας (m/s^2) (Πουλοβασίλης, 2010).

Με την εξέταση της τιμής του H καθώς και της τιμής της d στο σημείο καμπής μπορούν να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για τη μεταβολή στο χρόνο της ακτίνας του μεγαλύτερου κλάσματος πόρων.

2.2 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ K_s

Για τον προσδιορισμό της K_s χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του σταθερού φορτίου πίεσης σε αδιατάρακτα επιφανειακά εδαφικά δείγματα. Για τον υπολογισμό της K_s εφαρμόστηκε πάλι η διαδικασία των πέντε επαναλήψεων όπως στην περίπτωση της ΧΚΥ και η τιμή της K_s εξάγεται από τον μέσο όρο των πέντε τιμών.

Η εξίσωση υπολογισμού της K_s γίνεται με την εφαρμογή του νόμου Darcy

$$K_s = \frac{\frac{V}{tA}}{\frac{H}{L} + 1} \quad (2.5)$$

όπου V ο όγκος του ύδατος που συλλέγεται σε ορισμένο χρονικό διάστημα t από τη βάση της στήλης, A η διατομή του δείγματος, L το μήκος του και H το φορτίο πίεσης στην επιφάνεια του δείγματος. Για τον υπολογισμό της σχέσης $K(\theta)$ χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο Mualem-van Genuchten (Mualem 1976; van Genuchten 1980)

$$K(\theta) = K_s (S_e)^{0.5} \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (2.6)$$

$$\text{όπου } S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$$

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

3.1 ΕΔΑΦΟΛΟΓΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Στον Πίνακα 1 δίνεται η μηχανική σύσταση του εδάφους που πραγματοποιήθηκε το πείραμα μέχρι το βάθος 100 cm. Από τα δεδομένα προκύπτει ότι πρόκειται για πηλώδες έδαφος τουλάχιστον μέχρι το βάθος των 30 cm.

Πίνακας 1: Μηχανική σύσταση του εδάφους

Βάθος	Άμμος (%)	Ιλύς(%)	Άργιλος (%)	
0-10	38.8	39.5	21.7	Loam
10-20	37.3	39.0	23.7	Loam
20-30	35.0	42.6	22.4	Loam
30-40	32.0	41.6	26.4	Loam-Clay Loam
40-60	32.0	40.6	27.4	Loam-Clay Loam
60-100	34.4	35.9	29.7	Clay Loam

Στον Πίνακα 2 δίνεται το ύψος της βροχόπτωσης μεταξύ των διαφορετικών χρονικών στιγμών των δειγματοληψιών για τον προσδιορισμό της ΧΚΥ

Πίνακας 2: Ύψη νερού βροχής σε mm μεταξύ των διαφόρων ημερομηνιών δειγματοληψίας εδάφους

	6/10/10	11/10/10	12/1/11	16/5/11	22/11/11
Ύψος (mm)	0	3.2	149.6	189.2	107.4
Ημέρες βροχής		4	23	34	23

Όπως προκύπτει από τον Πίνακα 2 οι ημέρες βροχής ήταν 84. Από τα δεδομένα προκύπτει ότι οι ημέρες βροχής με ημερήσιο ύψος βροχής μεγαλύτερο από 10 mm ήταν 14 ενώ μεγαλύτερο από 20 mm ήταν 4. Συνεπώς στο μεγαλύτερο μέρος των ημερών βροχής (66) τα ύψη βροχής ήταν μικρότερα από 10 mm ανά ημέρα.

3.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΤΙΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

3.2.1 Επίδραση στη Χαρακτηριστική Καμπύλη Υγρασίας.

Από το Σχήμα 1 φαίνεται ότι η μηχανική κατεργασία αυξάνει την υγρασία κορεσμού και μεταβάλλει την κατανομή του μεγέθους των πόρων στο διάστημα πίεσης 0-100 cm συγκριτικά με αυτήν πριν τη μηχανική κατεργασία. Μετά τη μηχανική κατεργασία στις διαφορετικές χρονικές στιγμές οι διαφορές των ΧΚΥ εντοπίζονται πάλι στο διάστημα πίεσης 0-100 cm. Μέχρι 12/1/11 η μεταβολή της ΧΚΥ φαίνεται να είναι μικρή ενώ μετά οι μεταβολές είναι μεγαλύτερες και εντοπίζονται κυρίως πάλι στο διάστημα πίεσης 0-100 cm. Το διάστημα αυτό πίεσης αντιστοιχεί σε διάμετρο πόρων μεγαλύτερη από 30 μm. Εάν χρησιμοποιήσουμε την κατάταξη των πόρων σύμφωνα με

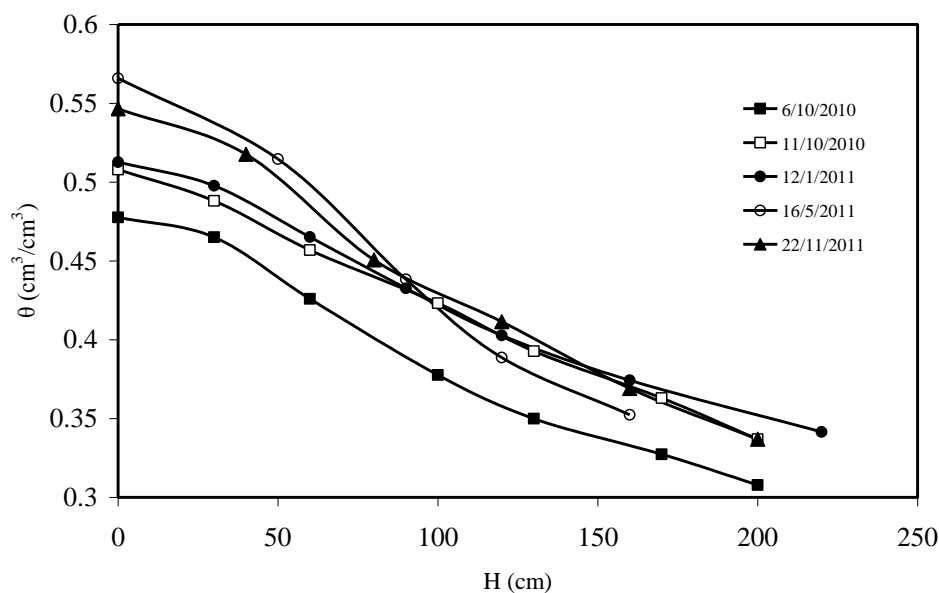
τον Luxmoore (1981) στην οποία οι μακροπόροι αντιστοιχούν σε ένα εύρος πίεσης 0-3 cm και οι μεσοπόροι από 3-300 cm όπου οι πρώτοι αντιστοιχούν σε ακτίνα πόρων >500μm και οι δεύτεροι από 500 έως 5 μm, προκύπτει ότι στο συγκεκριμένο έδαφος έχουμε πάρα πολύ μικρό κλάσμα μακροπόρων αλλά σημαντική παρουσία μεσοπόρων. Στις αντίστοιχες χρονικές στιγμές στις οποίες έγινε προσδιορισμός των ΧΚΥ ο σχετικός όγκος των μεσοπόρων είναι 0.229, 0.228, 0.219, 0.323 και 0.271 (cm³/cm³). Όμως σε κάθε χρονική στιγμή εμφανίζεται διαφορά στο ποσοστό μιας ορισμένης ακτίνας μεσοπόρων που βρίσκεται στη μεγαλύτερη συχνότητα (Πίνακας 3). Το όργωμα φαίνεται να αυξάνει την τιμή του H στο σημείο καμπής της ΧΚΥ με συνέπεια να μειώνεται η ισοδύναμη ακτίνα των πόρων με την μεγαλύτερη συχνότητα. Έτσι η διάμετρος μειώνεται από 45.47 μm σε 38.48 μm ενώ η τιμή της κλίσης της ΧΚΥ παραμένει σχεδόν ίδια (0.0011 και 0.0010 αντίστοιχα). Στη συνέχεια φαίνεται ότι στις 12/1/11 η τιμή του H, η τιμή της S και η ακτίνα των πόρων αποκτούν σχεδόν ίδιες τιμές με αυτές πριν το όργωμα. Δηλαδή τους πρώτους τρεις μήνες μετά την κατεργασία του εδάφους φαίνεται η επίδραση πάνω σε αυτές τις παραμέτρους να εξαφανίζεται. Στις 16/5/11 η τιμή του H στο σημείο καμπής παραμένει σταθερή αλλά αυξάνεται σημαντικά η κλίση της καμπύλης με συνέπεια να αυξάνεται το ποσοστό των πόρων με την αντίστοιχη ισοδύναμη διάμετρο πόρων (περίπου 45 μm). Στις 22/11/11 φαίνεται να μειώνεται λίγο η τιμή του H ενώ μειώνεται σημαντικά η τιμή της S ενώ η διάμετρος των πόρων αυξάνεται περισσότερο και από τη διάμετρο των πόρων πριν το όργωμα.

Συνεπώς μετά τη συγκεκριμένη μηχανική κατεργασία στο συγκεκριμένο έδαφος εμφανίζεται μεταβολή στο μέγεθος και στο ποσοστό μεγαλύτερης συχνότητας των μεσοπόρων. Είναι άξιο παρατήρησης το γεγονός ότι η θs μετά τις 11/10/10 συνεχίζει να αυξάνεται μέχρι 16/5/2011. Πιθανότατα το φαινόμενο αυτό να σχετίζεται με την αύξηση της κλίσης S και του μεγαλύτερου όγκου που καταλαμβάνουν οι μεσοπόροι.

Στον Πίνακα 3 παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων της εξίσωσης (1) για τις ΧΚΥ στις πέντε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Από τον Πίνακα 3 φαίνεται ότι η παράμετρος α μειώνεται μετά ακριβώς το όργωμα ενώ η θs αυξάνεται. Στη συνέχεια παρατηρείται αύξηση της α μέχρι 16/5/2011 ενώ στις 22/11/11 μείωση. Παρόμοια τάση εμφανίζεται και στις τιμές της θs μετά το όργωμα. Ανάλογη συμπεριφορά της παραμέτρου α, δηλαδή επίδραση του χρόνου, έχουν παρατηρήσει και οι Schwen et. al., (2011). Η παράμετρος n αυξάνεται μετά το όργωμα μέχρι 16/5/11 και μειώνεται στις 22/11/11. Η παράμετρος n έχει την ίδια συμπεριφορά με την θs στις διάφορες χρονικές στιγμές.

Πίνακας 3: Οι παράμετροι α, n, m της εξίσωσης (1) καθώς και οι τιμές του φορτίου πίεσης H στο σημείο καμπής και η κλίση S της (1) στο H για την ΧΚΥ σε κάθε χρονική στιγμή. d η διάμετρος των πόρων στο φορτίο H.

HMEP	α(cm ⁻¹)	n	m=1- 1/n	θs	θr	H (cm)	S(cm ⁻¹)	d (μm)
6/10/10	0.00851	1.629	0.386	0.477	0.004	65.52	0.0011	45.47
11/10/10	0.00736	1.652	0.394	0.507	0.006	77.43	0.0010	38.48
12/1/11	0.00892	1.703	0.413	0.512	0.100	66.72	0.0011	44.66
16/5/11	0.01034	1.937	0.483	0.564	0.082	66.49	0.0021	44.81
22/11/11	0.00927	1.697	0.410	0.546	0.044	63.83	0.0014	46.68



Σχήμα 1: Η ΧΚΥ πριν (6/10/2010) και μετά την μηχανική κατεργασία (11/10/2010) σε διαφορετικές χρονικές στιγμές

3.2.2 Επίδραση στην Υδραυλική αγωγιμότητα

Στον πίνακα 4 δίνονται οι τιμές της K_s στις αντίστοιχες ημέρες δειγματοληψίας

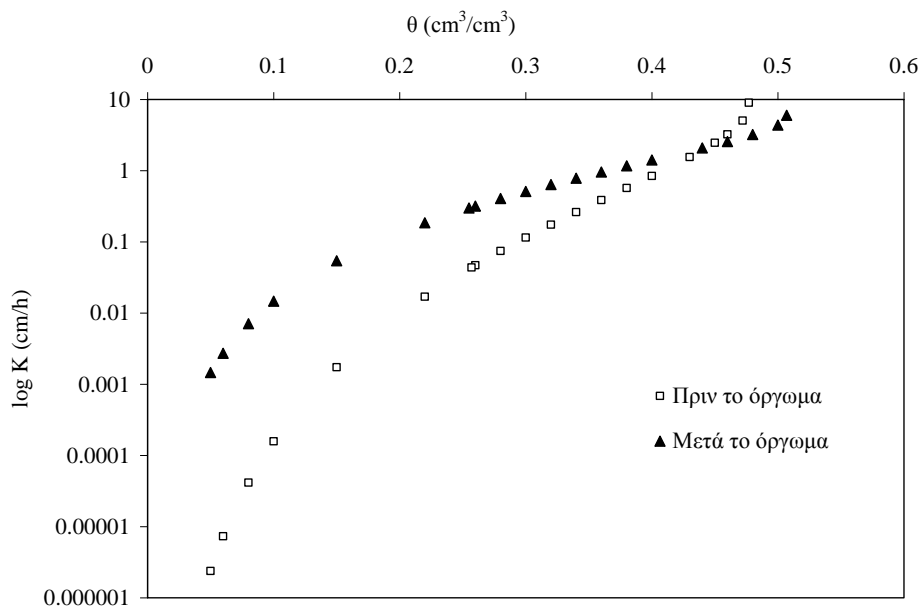
Πίνακας 4: Οι τιμές της K_s στις διάφορες χρονικές στιγμές δειγματοληψίας εδάφους

	6/10/10	11/10/10	12/1/11	16/5/11	22/11/11
K_s (cm/min)	0.152	0.091	0.071	0.102	0.247

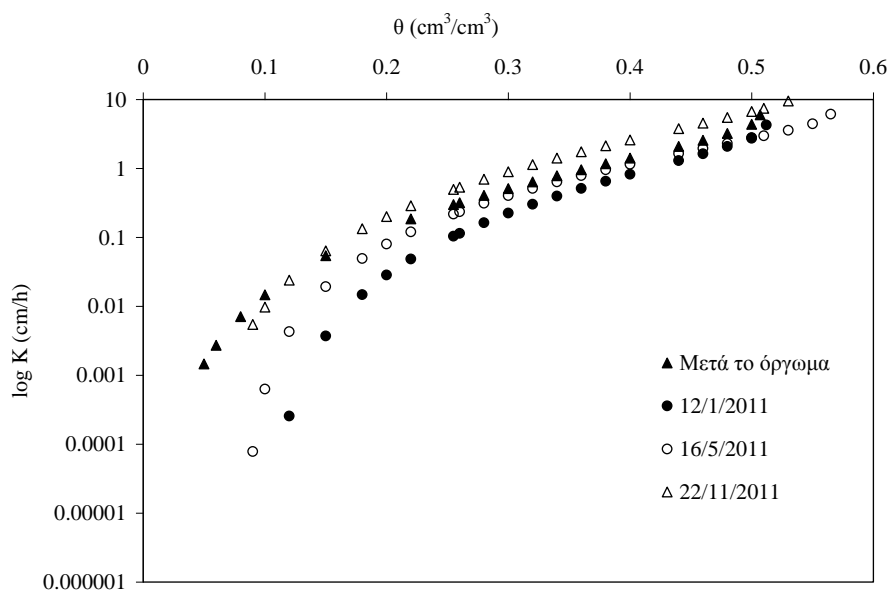
Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι ακριβώς μετά τη μηχανική κατεργασία του εδάφους η K_s μειώνεται σημαντικά. Από τον Πίνακα 3 προκύπτει ότι η διάμετρος των πόρων με τη μεγαλύτερη συχνότητα μειώνεται κατά 7 μm ενώ η κλίση είναι σχετικά σταθερή. Προφανώς η μείωση αυτή της διαμέτρου έχει παίξει σημαντικό ρόλο στην μείωση της K_s . Επίσης σε αυτό μπορεί να έχει συμβάλει και η καταστροφή της συνέχειας που μπορεί να είχε αποκτήσει το πορώδες πριν τη μηχανική κατεργασία (Benjamin, 1993). Στις 12/1/11 παρατηρείται επιπλέον μείωση της K_s η οποία πιθανότατα οφείλεται στο σχηματισμό κρούστας στο έδαφος λόγω της επίδρασης των βροχοπτώσεων. Το σύνολο των βροχοπτώσεων από 11/10/10 έως 12/1/11 ήταν 149.6 mm (Πίνακας 2) με 6 ημερήσιες τιμές βροχόπτωσης μεγαλύτερες από 10mm και μία περίπτωση μεγαλύτερη από 20 mm. Επίσης η επιφανειακή υγρασία την ημερομηνία δειγματοληψίας ήταν $0.169 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Ανάλογο φαινόμενο στην συμπεριφορά της K_s παρατήρησαν και οι Mubarak et.al., (2009) καθώς και οι Schwen et al. (2011) οι οποίοι αναφέρουν ότι οι υδραυλικά ενεργοί πόροι μειώνονται σημαντικά μετά το φθινοπωρινό όργωμα λόγω της βροχόπτωσης κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου και η μείωση αυτή ακολουθείται από βαθμιαία αύξηση την άνοιξη λόγω των διαδοχικών κύκλων στράγγισης-διαβροχής. Στη συνέχεια παρατηρείται αύξηση της K_s στις 16/5/11. Το διάστημα από 12/1/11 έως 16/5/11 το ύψος βροχόπτωσης ήταν 189.2 mm με τέσσερις περιπτώσεις ημερήσιας βροχόπτωσης μεγαλύτερης από 10 mm. Το διάστημα αυτό υπήρξε και η πιο σημαντική ημερήσια βροχόπτωση 43.4 mm (13/2/11). Το μεγαλύτερο μέρος της βροχόπτωσης αυτής της περιόδου έπεσε όμως μέχρι το Μάρτιο και έτσι για

μεγάλο διάστημα μέχρι 16/5/11 υπήρξε ξήρανση του εδάφους. Η επιφανειακή υγρασία τη στιγμή της δειγματοληψίας ήταν $0.119 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Στη συνέχεια 22/11/11 η τιμή της K_s αυξάνεται σημαντικά και υπερβαίνει κατά πολύ την τιμή που είχε στις 6/11/10. Το ύψος βροχής στο διάστημα αυτό από 16/5/11, δηλαδή για 6 περίπου μήνες, ήταν 107.4 mm με τέσσερις περιπτώσεις ημερήσιας βροχόπτωσης μεγαλύτερης από 10 mm. Η επιφανειακή υγρασία 22/11/11 ήταν ($0.08 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$). Από τα δεδομένα αυτά φαίνεται ότι ίσως να παίζει ρόλο στην τιμή της K_s η περιεκτικότητα σε υγρασία του εδάφους τη στιγμή της δειγματοληψίας όπως αναφέρουν οι Zhou et al. (2008) οι οποίοι όπως προαναφέραμε παρατήρησαν ότι κάτω από ξηρότερες συνθήκες παρατηρήθηκε αύξηση της K_s η οποία αποδόθηκε στην αύξηση του μακροπορώδους.

Από τον Πίνακα 3 φαίνεται (22/11/11) ότι ενώ η διάμετρος των πόρων είναι σχεδόν ίδια, η κλίση στο σημείο καμπής είναι μεγαλύτερη συγκριτικά με την κλίση στις 6/10/10 πράγμα που σημαίνει ότι έχουμε αύξηση του ποσοστού των πόρων με την μεγαλύτερη συχνότητα. Από μέτρηση της K_s η οποία έγινε στις 30/8/11 προέκυψε τιμή 0.133 cm/min πράγμα το οποίο δείχνει ότι μετά τον Μάιο υπάρχει τάση αύξησής της. Πιθανοί παράγοντες, εκτός από την υγρασία του εδάφους που προαναφέρθηκε, οι οποίοι μπορεί να συνέβαλαν στην μεγάλη αύξηση της K_s (22/11/11) ίσως είναι οι διαδοχικοί κύκλοι διαβροχής-αποστράγγισης και η βιολογική δραστηριότητα που αναπτύσσεται στο έδαφος. Οι παράγοντες αυτοί μπορεί να δημιουργούν ένα αποτελεσματικότερο δίκτυο μεσοπόρων και από άποψη συνέχειας με αποτέλεσμα την μεγάλη αύξηση της K_s .



Σχήμα 2: Η σχέση $K(\theta)$ πριν και μετά ακριβώς τη μηχανική κατεργασία.



Σχήμα 3: Η εξέλιξη της $K(\theta)$ στις διάφορες χρονικές στιγμές σύμφωνα με το μοντέλο Mualem-van Genuchten

Στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται η σχέση $K(\theta)$ με την εφαρμογή του μοντέλου Mualem-van Genuchten πριν και ακριβώς μετά τη μηχανική κατεργασία του εδάφους. Από το Σχήμα 2 φαίνεται ότι η σχέση $K(\theta)$ από μικρές θ έως την τιμή $0.4 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ δίνει μεγαλύτερες τιμές στην K του οργωμένου εδάφους. Η σχέση αυτή των δύο $K(\theta)$ μπορεί να εξηγήσει και τη μεγαλύτερη διήθηση του νερού της βροχής που παρατηρείται στην εδαφική κατατομή του γυμνού οργωμένου εδάφους συγκριτικά με το ανόργωτο γυμνό έδαφος ειδικά στην αρχική περίοδο των χειμερινών βροχοπτώσεων (Kargas et al. 2012). Επίσης από το Σχήμα 2 φαίνεται ότι οι διαφορές μεταξύ των δύο $K(\theta)$ είναι μεγαλύτερες στις μικρές με μεσαίες θ συγκριτικά με τις μεγάλες θ . Ανάλογο φαινόμενο είχαν παρατηρήσει οι Hu et al. (2008) καθώς και οι Schwen et al. (2011).

Στο Σχήμα 3 παρουσιάζεται η σχέση $K(\theta)$ με βάση το μοντέλο Mualem-van Genuchten στις διάφορες χρονικές στιγμές. Πιο συγκεκριμένα η σχέση $K(\theta)$ στις 12/1/11 βρίσκεται μεταξύ των καμπύλων πριν και μετά το όργωμα. Συνεπώς εμφανίζεται η τάση να προσεγγίζεται η καμπύλη $K(\theta)$ πριν το όργωμα. Όμως στις επόμενες χρονικές στιγμές η σχέση $K(\theta)$ τείνει να ξαναγυρίσει σε αυτήν του οργωμένου και μάλιστα 22/11/11 αποκτά μεγαλύτερες τιμές K σε όλες τις τιμές θ από $0.15 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ μέχρι τον κορεσμό. Οι τιμές της $K(\theta)$ 22/11/11 είναι σχεδόν διπλάσιες στην προαναφερόμενη περιοχή των θ . Πιο συγκεκριμένα σε μία μέση υγρασία $0.255 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ η K πριν το όργωμα ήταν 0.043 cm/h , ακριβώς μετά το όργωμα έγινε 0.298 cm/h , 12/1/11 έγινε 0.104 cm/h , 16/5/11 0.218 cm/h και 22/11/11 0.496 cm/h . Έτσι φαίνεται ότι η σχέση $K(\theta)$ μεταβάλλεται ισχυρά στον χρόνο κάτι που πολύ λίγο λαμβάνεται υπόψη στα μοντέλα πρόβλεψης της διήθησης και ανακατανομής του νερού στο έδαφος.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Ahuja L., Fiedler F., G. Duna, J. Benjamín and A. Garrion. 1998. *Changes in soil water retention curves due to tillage and natural reconsolidation*. Soil Sci. Soc. Am. Journal 62:1228-1233.
- Aschonitis V., Kostopoulou S. and Antonopoulos V. 2012. *Methodology to assess the effects of rice cultivation under flooded conditions on van Genuchten' model parameters and pore size distribution*. Transport Porous media 91: 861-876.

- Azooz R.H and Arshad M.A. 1996. *Soil infiltration and hydraulic conductivity under long-term no tillage and conventional tillage systems*. Can. J. Soil Sci. 76 (2), 143-152.
- Azooz R.H and Arshad M.A. 2001. *Soil water drying and recharge rates as affected by tillage under continuous barley and barley-canola cropping systems in northwestern Canada*. Can. J. Soil Sci 81(1): 45-52.
- Benjamin J. 1993. *Tillage effects on near surface soil hydraulic properties*. Soil and Tillage Res. 26:277-288.
- Ehlers W. and van der Ploeg 1976. *Evaporation, drainage and unsaturated hydraulic conductivity of tilled and untilled fallow soil*. Z. Phlanzenern. Bodenk 1976, Heft 3:373-386
- Fuentes J, Flury M. and D. Bezdicek. 2004. *Hydraulic properties in a silt loam soil under natural prairie, conventional till and no-till*. Soil Sci. Soc. Am. Journal 68:1679-1688
- Green T. Ahuja L. and J. Benjamin. 2003. *Advances and challenges in predicting agricultural management effects on soil hydraulic properties*. Geoderma 116: 3-27.
- Hillel D. 1998. *Environmental soil physics* p.405-410. Academic Press,USA.
- Hu D.and A. Mermound 2001. *Topsoil properties as affected by tillage practices in North China*. Soil and Tillage Research 60:11-19
- Kargas G., P. Kerkides, A. Poulouvasilis 2012. *Infiltration of rain water in semi-arid areas under three land surface treatments*. Soil and Tillage Research 120:15-24
- Kribaa M., V. Hallaire, P. Curmi, R. Lahmar 2001. *Effect of various cultivation methods on structure and hydraulic properties of a soil in a semi-arid climate*. Soil and Tillage Research 60:43-53.
- Leij F., Ghezzehei and Or . 2002. *Modeling the dynamics of the soil pore size distribution* Soil and Tillage Research 64: 61-78.
- Lindstrom M. and C. Onstad 1984. *Influence of tillage systems on soil physical parameters and infiltration after planting*. Journal Soil Water Conserv. 39:149-152.
- Luxmoore R.J. 1981. *Micro-, meso-, and macroporosity of soil*. SSSAJ 45:671-672
- Mahboudi A., A. Lal and N. Faussey. 1993. *28 years of tillage effects on two soils in Ohio*. Soil Sci. Soc. Am. Journal 57(2):506-512
- Mapa R., Green R. and L. Santo. 1986. *Temporal variability of soil hydraulic properties with wetting and drying subsequent to tillage*. Soil Sci. Soc. Am. Journal 50: 1133-1138.
- McGarry D., Bridge B.J., Radford B.J., 2000. *Contrasting soil physical properties after zero and traditional tillage of an alluvial soil in the semi-arid subtropics*. Soil Till. Res. 53: 105-115.
- Moret D. and J.L. Arrue 2007. *Dynamics of soil hydraulic properties during fallow by tillage*. Soil and Tillage Research 96:103-113
- Mualem Y. 1976. *A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media*. Water Res. Res.12, 513-522.
- Mubarak I., Mailhal J., Angulo-Jaramillo., Ruelle P., Boivin P and Khaledian M. 2009. *Temporal variability in soil hydraulic properties under drip irrigation*. Geoderma 150:158-165.
- Poulouvasilis 1990. *The effect of cultivation practices on the physical properties of the upper soil layer. (Project No 5110). Final report*. Laboratory of Agricultural Hydraulics. Agricultural University of Athens.

- Romano N., Hopmans J., and Dane J. 2002. Suction table. In: J. Dane and G.C. Topp (Eds), *Methods of soil analysis, Part 4, Physical methods*. SSSAJ, Inc. Madison, Wisconsin, USA. Pp.692-698.
- Schwen A., Bodnet G., Scholl P., Buchan G. and Loiskandl 2011. *Temporal dynamics of soil hydraulic properties and the water conducting porosity under different tillage*. Soil and Tillage Research 113:89-98
- Strudley M., Green T. and J. Ascough. 2008. *Tillage effect on soil hydraulic properties in space and time: State of the science*. Soil and Tillage Research 99: 4-48.
- van Genuchten M. Th., 1980. *A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils*. Soil Sci. Soc. Am. Journal 44, 892-898.
- van Genuchten MT, Leij FJ, Yates SR. 1991. *The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils*. U.S.D.A., Riverside, California.
- Xu W., Shao M., Wang O., Fan J. and Horton R. 2009. *Temporal changes of soil hydraulic properties under different land uses*. Geoderma 149:355-366
- Zhou X., Lin H. and E. White 2008. *Surface soil hydraulic properties in four soil series under different land uses and their temporal changes*. Catena 73:180-188.
- Πουλοβασίλης Α. 2010. *Εισαγωγή στις Αρδύσεις* σελ.64. Εκδόσεις ΕΜΒΡΥΟ.

H

**ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ
ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑ**

**ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΙΩΝ ΣΕ ΚΟΡΕΣΜΕΝΑ ΠΟΡΩΔΗ ΜΕΣΑ: ΕΠΙΔΡΑΣΗ
ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ
(ΜΕΓΕΘΟΣ ΠΟΡΩΔΟΥΣ ΜΕΣΟΥ, ΕΝΔΟΠΟΡΩΔΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑ,
ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΚΟΛΛΟΕΙΔΩΝ)**

Βασιλική Η. Συγγούνα¹, Κωνσταντίνος Β. Χρυσικόπουλος¹

¹Εργαστήριο Τεχνολογίας του Περιβάλλοντος, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα 26500
e-mails: kikisygouna@upatras.gr, gios@upatras.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο κύριος σκοπός αυτής της μελέτης ήταν να εκτιμηθεί η συμπεριφορά προσκόλλησης ιών (βακτηριοφάγων MS2 και ΦΧ174) σε χαλαζιακή άμμο χρησιμοποιώντας τρία διαφορετικά μεγέθη κόκκων και τρεις ενδοπορώδεις ταχύτητες. Τα πειραματικά αποτελέσματα αξιολογήθηκαν χρησιμοποιώντας την κλασσική θεωρία διήθησης κολλοειδών (CFT). Επιπλέον, στη μελέτη αυτή ερευνήθηκε η αλληλεπίδραση των ιών με κολλοειδή αργίλων (καολινίτης: KGa-1b και μοντμοριλλονίτης: STx-1b) σε πειράματα προσκόλλησης διαλείποντος έργου αλλά και σε πειράματα ταυτόχρονης μεταφοράς (συμμεταφοράς). Τέλος, εκτεταμένοι-DLVO υπολογισμοί της ενέργειας αλληλεπίδρασης εξηγούν ότι η προσκόλληση των ιών στα κολλοειδή αργίλων κατά κύριο λόγο διέπεται από υδρόφοβες αλληλεπιδράσεις.

**TRANSPORT OF VIRUSES IN WATER SATURATED POROUS MEDIA:
EFFECT OF VARIOUS PSYSICOCHEMICAL PARAMETERS (GRAIN
SIZE, PORE WATER VELOCITY, PRESENCE OF COLLOIDS)**

Vasiliki I. Syngouna¹, Constantinos V. Chrysikopoulos¹

¹Environmental Engineering Laboratory, Department of Civil Engineering,
University of Patras, Patras 26500, Greece.
e-mails: kikisygouna@upatras.gr, gios@upatras.gr

ABSTRACT

The main objective of this study was to evaluate the attachment behavior of model viruses (bacteriophages: MS2 and ΦΧ174) onto quartz sand of three different grain sizes for three pore water velocities. The experimental results were evaluated using the classical colloid filtration theory (CFT). Moreover, in this study the interaction of viruses with clay colloids (kaolinite: KGa-1b and montmorillonite: STx-1b) was investigated with batch as well as virus-clay cotransport experiments. In both batch and co-transport experiments, MS2 and ΦΧ174 were attached in greater amounts onto KGa-1b than STx-1b with MS2 having greater affinity than ΦΧ174 for both clays. Finally, extended-DLVO interaction energy calculations explained that the attachment of viruses onto model clay colloids was primarily caused by hydrophobic interaction.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι παθογόνοι ιοί που υπάρχουν στα υπόγεια νερά προέρχονται από πηγές ρύπανσης, όπως πηγάδια έγχυσης, λεκάνες επαναφόρτισης, άρδευση, χώρους υγειονομικής ταφής, χωματερές, νεκροταφεία, ρωγμές αγωγών αποχέτευσης, διαρροές σηπτικών δεξαμενών, και αστικών απορροών. Πολλές μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί για την εξέταση της αλληλεπίδρασης μικροοργανισμών με το έδαφος, την άμμο, το αμμοχάλικο ή άλλα κοκκώδη υλικά χρησιμοποιώντας στήλες εργαστηριακής κλίμακας υπό καλά-ελεγχόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες (Jin et al., 1997; Syngouna and Chrysikopoulos, 2011).

Θεωρητικές και πειραματικές μελέτες έχουν εξετάσει την επίδραση της χημείας του διαλύματος του νερού των πόρων (Bolster et al., 2001), της ταχύτητας του ρευστού (Hendry et al., 1999; Syngouna and Chrysikopoulos, 2011), της περιεκτικότητας σε υγρασία της στερεάς μήτρας, της θερμοκρασίας, του μεγέθους των κόκκων (Sim and Chrysikopoulos, 2000; Bolster et al., 2001; Anders and Chrysikopoulos, 2009; Syngouna and Chrysikopoulos, 2011) και της παρουσίας αιωρούμενων κolloειδών (Walshe et al., 2010; Jin et al., 1997) στη μεταφορά των μικροοργανισμών και τη συγκράτησή τους στα πορώδη μέσα. Τα αιωρούμενα αργιλικά ορυκτά (τα μικρότερα ανόργανα συστατικά στα εδάφη) παίζουν ουσιαστικό ρόλο στη μετακίνηση των ρύπων και των βιοκolloειδών, ενώ προσροφώνται ή συνδέονται στην επιφάνεια τους (Walshe et al., 2010; Chrysikopoulos and Syngouna, 2011). Η σταθερότητα των κolloειδών συχνά προβλέπεται από τη θεωρία Derjaguin-Landau-Verwey-Overbeek (DLVO) (Derjaguin and Landau, 1941; Verwey and Overbeek, 1948), η οποία αναπτύχθηκε για λεία και ομοιογενή σωματίδια με ιδανικές γεωμετρίες. Παρά την επιτυχία της θεωρίας DLVO, πολλοί ερευνητές έχουν τροποποιήσει τη θεωρία DLVO ώστε να συμπεριλάβουν το μέγεθος της Lewis οξεοβασικής αλληλεπίδρασης (XDLVO) (van Oss, 1993).

Οι στόχοι αυτής της μελέτης ήταν αρχικά να χαρακτηριστεί η μεταφορά και η αφαίρεση των βακτηριοφάγων MS2 και ΦX174 σε εργαστηριακές στήλες που πληρώθηκαν με καθαρή χαλαζιακή άμμο, και να εξεταστεί η επίδραση του μεγέθους των κόκκων και της ενδοπορώδους ταχύτητας. Υπολογίστηκαν οι συντελεστές απόδοσης συγκρούσεων των δυο ιών που εξετάστηκαν και συζητήθηκαν οι παράγοντες που ελέγχουν την απόθεση τους. Επιπλέον στη μελέτη αυτή διερευνήθηκε η συμ-μεταφορά ιών και κolloειδών αργίλων σε κορεσμένες στήλες με πληρωτικό υλικό γυάλινα σφαιρίδια. Τέλος, οι ιδιότητες της επιφάνειας των ιών, των αργίλων και των γυάλινων σφαιριδίων χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των DLVO και XDLVO προφίλ της δυναμικής ενέργειας.

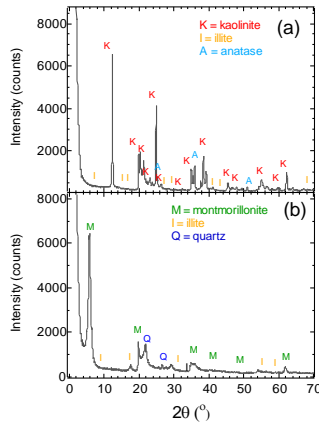
2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1. ΒΑΚΤΗΡΙΟΦΑΓΟΙ ΚΑΙ ΠΟΣΟΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ

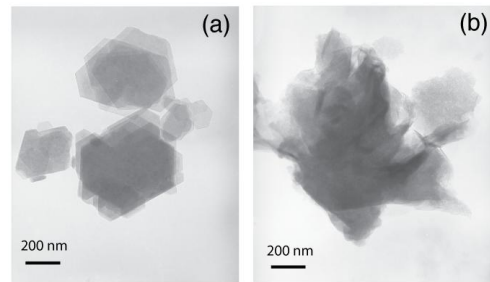
Ο βακτηριοφάγος MS2 (F-specific μονόκλωνου RNA φάγος με διάμετρο που κυμαίνεται από 24 έως 26 nm) και ο ΦX174 (σωματικός φάγος μονόκλωνου DNA με διάμετρο που κυμαίνεται από 25 έως 27 nm), χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή τη μελέτη ως υποκατάστατα για τους ανθρώπινους ιούς. Και οι δύο βακτηριοφάγοι μολύνουν το βακτήριο *E. coli*, και αναλύθηκαν με τη μέθοδο επικάλυψης διπλού στρώματος, όπως περιγράφεται από τους Syngouna and Chrysikopoulos (2011). Στα πειράματα διαλείποντος έργου και στα πειράματα συμ-μεταφοράς για το διαχωρισμό των ιών που είναι προσροφημένοι στα κolloειδή αργίλων από τους αιωρούμενους ιούς στην υγρή φάση, ακολουθήθηκε η διαδικασία από τους Chrysikopoulos and Syngouna (2011).

2.2. ΑΡΓΙΛΟΙ

Οι άργιλοι που χρησιμοποιούνται στην παρούσα μελέτη είναι ο καολινίτης (KGa-1b, ένας καλά-κρυσταλλικός καολίνης από την Ουάσιγκτον County, της Γεωργίας) και ο μοντμοριλλονίτης (STx-1b, ένας πλούσιος σε ασβέστιο Ca-μοντμοριλλονίτης, λευκός, από την κομητεία Gonzales, Τέξας), που αγοράστηκαν από την Εταιρεία Αργιλικών Ορυκτών (CMS, Clay Minerals Society), Columbia, ΗΠΑ (Σχήμα 1). Δύο αντιπροσωπευτικές εικόνες ηλεκτρονικής μικροσκοπίας μετάδοσης (TEM) κολλοειδούς κλάσματος αργίλου <2 μm φαίνονται στο Σχήμα 2.



Σχήμα 1. Περίθλαση ακτίνων-Χ του (α) KGa-1b, και (β) STx-1b, «όπως διατίθενται στην αγορά» (ή μη επεξεργασμένα).



Σχήμα 2. Μικρογραφήματα μετάδοσης ηλεκτρονίων (α) KGa-1b, και (β) STx-1b.

2.3. ΥΛΙΚΟ ΠΛΗΡΩΣΗΣ ΤΗΣ ΣΤΗΛΗΣ

Σε αυτή τη μελέτη χρησιμοποιήθηκαν τρία μεγέθη χαλαζιακής άμμου: (α) χονδρόκοκκη (1.18-1.7 mm ή κόσκινο No 16), (β) μεσόκοκκη (0.425-0.600 mm ή κόσκινο No 40), και (γ) λεπτόκοκκη (0.150-0.212 mm ή κόσκινο No 100). Γυάλινα σφαιρίδια διαμέτρου 2 mm (Fisher Scientific, New Jersey) χρησιμοποιήθηκαν ως πληρωτικό υλικό στις στήλες για τα πειράματα συμ-μεταφοράς ιών και κολλοειδών αργίλων. Πριν από κάθε πείραμα, η άμμος και τα σφαιρίδια καθαρίζονταν με 0.1 M HNO₃ (70%) για 3h για την αφαίρεση των επιφανειακών προσμίξεων που θα μπορούσαν να ενισχύσουν τη φυσικοχημική απόθεση των ιών, ξεπλενόταν με απιονισμένο νερό, και εμβαπτιζόταν σε 0.1 M NaOH για 3h, και ξεπλενόταν πάλι με απιονισμένο νερό. Μετά από τα βήματα καθαρισμού, η άμμος και τα γυάλινα σφαιρίδια ξηραίνονταν σε φούρνο στους 105 °C, και έπειτα αποθηκευόταν σε αποστειρωμένα δοχεία μέχρι τη χρήση της στα πειράματα.

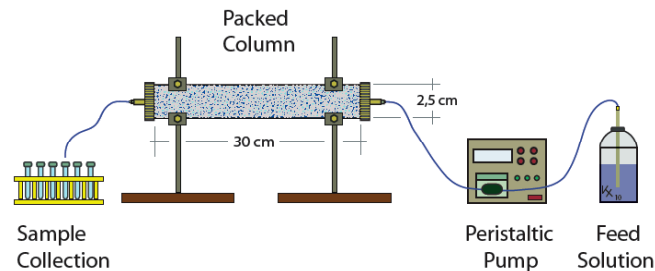
2.4. ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Το δυναμικό ζήτα των βακτηριοφάγων, της άμμου, των γυάλινων σφαιριδίων και των αργίλων που χρησιμοποιούνται στην παρούσα μελέτη μετρήθηκε σε pH 7 σε ddH₂O από ένα όργανο Zetasizer (NanoZS90, Malvern Instruments, Southborough, MA). Όλα τα δυναμικά ζήτα και οι μετρήσεις υδροδυναμικής διαμέτρου ελήφθησαν εις τριπλούν.

2.5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΡΟΗΣ ΣΕ ΣΤΗΛΕΣ

Για τα πειράματα εξέτασης της επίδρασης του μεγέθους των κόκκων και της ενδοπορώδους ταχύτητας, γυάλινες στήλες (διαμέτρου 2.5 cm και μήκους 30 cm) γεμίζονταν υγρές με άμμο υπό δόνηση για την ελαχιστοποίηση της παγίδευσης αέρα και της στρωματοποίησης. Το πορώδες της στήλης άμμου καθοριζόταν σε κάθε πείραμα. Πριν από κάθε πείραμα, η πληρωμένη με άμμο στήλη εξισορροπούσε με άντληση 10 όγκων πόρων (PV) διαλύματος PBS μέσω της στήλης με σταθερή ογκομετρική παροχή $Q=2.5, 1.5$ και 0.8 mL/min, που αντιστοιχεί σε ταχύτητες ροής Darcy $q=0.51, 0.31$ και 0.16 cm/min, αντίστοιχα. Αιώρημα ιόν σε διάλυμα PBS περνούσε τη στήλη για 3 όγκους πόρων με ίδια Q και ακολουθούσαν 5 όγκοι πόρων διαλύματος PBS χωρίς ιούς.

Για τα πειράματα εξέτασης της επίδρασης παρουσίας κολλοειδών αργίλων (πειράματα συμμεταφοράς), η στήλη γέμιζε με γυάλινα σφαιρίδια. Η υπολογισμένη ξηρή φαινόμενη πυκνότητα ήταν 1.61 g/cm³, και το πορώδες ήταν 0.42. Η συνεχής ροή αποστειρωμένου ddH₂O διαμέσου της γεμισμένης στήλης σε τρεις διαφορετικές παροχές των 2.5, 1.5 και 0.8 ml/min, που αντιστοιχούν σε ενδοπορώδεις ταχύτητες $U=q/\theta=1.21, 0.74$ και 0.38 cm/min αντίστοιχα, διατηρήθηκε με περισταλτική αντλία. Χλωριόντα, με τη μορφή χλωριούχου καλίου, επιλέχθηκαν ως μη αντιδρών ιχνηθέτες για τα πειράματα μεταφοράς σε στήλη (Chrysikopoulos, 1993). Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τα πειράματα μεταφοράς ιών και κολλοειδών αργίλων παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.



Σχήμα. 3: Σχηματική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης

2.6. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΔΙΑΛΕΙΠΟΝΤΟΣ ΕΡΓΟΥ

Η προσκόλληση των MS2 και ΦΧ174 στα KGa-1b και STx-1b μελετήθηκε με πειράματα ισορροπίας διαλείποντος έργου που πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια μιας περιόδου 7 ωρών. Ο χρόνος αποκατάστασης της ισορροπίας επιλέχθηκε να είναι αρκετά μικρός, ώστε να συμβεί ελάχιστη ή και καθόλου αδρανοποίηση των ιών. Επιπλέον, προκαταρκτικά πειράματα έδειξαν ότι η ισορροπία επετεύχθη μέσα σε μόλις μια χρονική περίοδο 3h. Η μέθοδος αποτελείται από προσθήκη διαλύματος του ιού σε δοκιμαστικό σωλήνα φυγοκέντρησης των 50 ml που περιέχει μια επιλεγμένη συγκέντρωση κολλοειδούς αργίλου (113.579 ± 25 mg/L του KGa-1b ή 160 ± 6.5 mg/L του STx-1b) σε ddH₂O, με σφράγιση, και ελαφριά ανάδευση για 7 ώρες σε θερμοκρασία 25°C. Χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές συγκεντρώσεις των ιών, που κυμαίνονται 10^3 έως 10^9 PFU/ mL.

3. ΘΕΩΡΙΑ

3.1. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΙΩΝ/ΚΟΛΛΟΕΙΔΩΝ

Η μονοδιάστατη μεταφορά ιών/κολλοειδών σε ομοιογενή, κορεσμένα πορώδη μέσα με πρώτης τάξης προσκόλληση (ή διήθηση) και αδρανοποίηση διέπεται από την ακόλουθη μερική διαφορική εξίσωση (Sim and Chrysikopoulos, 1995):

$$\frac{\partial C(t, x)}{\partial t} + \frac{\rho}{\theta} \frac{\partial C^*(t, x)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C(t, x)}{\partial x^2} - U \frac{\partial C(t, x)}{\partial x} - \lambda C(t, x) - \lambda^* \frac{\rho}{\theta} C^*(t, x) \quad (3.1)$$

όπου C είναι η συγκέντρωση των ιών/κολλοειδών σε αιώρηση, C^* είναι η συγκέντρωση ιών/κολλοειδών που προσκολλώνται στα στερεά, D είναι ο συντελεστής υδροδυναμικής διασποράς:

$$D = \alpha_L U + \mathcal{D}_e \quad (3.2)$$

όπου α_L είναι η διαμήκης τάση διασποράς, $\mathcal{D}_e = \tau^*$ είναι ο συντελεστής αποτελεσματικής μοριακής διάχυσης ($\tau^* \geq 1$ είναι το δαιδαλώδες των πόρων, και D ο συντελεστής μοριακής διάχυσης), U είναι η ενδοπορώδης ταχύτητα, ρ είναι το φαινόμενο ειδικό βάρος της στερεάς μήτρας, λ είναι ο συντελεστής μετασχηματισμού των αιωρούμενων ιών (π.χ., αδρανοποίηση των αιωρούμενων ιών), λ^* είναι ο συντελεστής μετασχηματισμού των προσκολλημένων ιών, θ είναι το πορώδες του πορώδους μέσου και t είναι ο χρόνος. Ο ρυθμός προσκόλλησης των ιών/κολλοειδών πάνω στη στερεά μήτρα περιγράφεται από την ακόλουθη πρώτη τάξης εξίσωση (Sim and Chrysikopoulos, 1999):

$$\frac{\rho}{\theta} \frac{\partial C^*(t, x)}{\partial t} = k_c C(t, x) - k_r \frac{\rho}{\theta} C^*(t, x) - \lambda^* \frac{\rho}{\theta} C^*(t, x) \quad (3.3)$$

όπου k_c είναι ο συντελεστής ρυθμού προσκόλλησης, και k_r είναι ο συντελεστής ρυθμού αποκόλλησης. Η αναλυτική λύση της εξίσωσης που διέπει τη μεταφορά ιών/κολλοειδών (1) από κοινού με την εξίσωση (3) έχει παραχθεί από τους Sim and Chrysikopoulos (1995). Σημειώστε ότι οι διάφορες παράμετροι του μοντέλου μπορούν να υπολογιστούν με προσαρμογή της αναλυτικής λύσης στα πειραματικά δεδομένα με το πρόγραμμα μη γραμμικής συσχέτισης ελαχίστων τετραγώνων COLLOIDFIT (Sim and Chrysikopoulos, 1995).

3.2 ΧΡΟΝΙΚΕΣ ΡΟΠΕΣ

Τα δεδομένα συγκέντρωσης ιών/κολλοειδών στη θέση $x=L$ αναλύθηκαν με τις κανονικοποιημένες χρονικές ροπές (absolute temporal moments):

$$M_n(x) = \frac{m_n(x)}{m_0(x)} = \frac{\int_0^\infty t^n C_i(x, t) dt}{\int_0^\infty C_i(x, t) dt} \quad (3.4)$$

όπου ο δείκτης $n=0, 1, 2, \dots$ δείχνει την τάξη της στιγμής, και ο δείκτης i δείχνει τους ιούς MS2, ΦX174 και τα κολλοειδή αργίλων KGa-1b και STx-1b. Επιπλέον, η ανάκτηση μάζας, M_r , του ιχνηθέτη ή των αιωρούμενων σωματιδίων υπολογίζεται από την ακόλουθη έκφραση:

$$M_r(L) = \frac{m_0(L)}{C_{i_0} t_p} = \frac{\int_0^\infty C_i(L, t) dt}{\int_0^{t_p} C_i(0, t) dt} \quad (3.5)$$

όπου L είναι το μήκος του πορώδους μέσου.

3.3. ΘΕΩΡΙΑ ΔΙΗΘΗΣΗΣ ΚΟΛΛΟΕΙΔΩΝ

Η κλασική θεωρία διήθησης κολλοειδών (CFT) χρησιμοποιήθηκε για την ποσοτική σύγκριση της προσκόλλησης των ιών στη χαλαζιακή άμμο. Ο αδιάστατος συντελεστής απόδοσης συγκρούσεων, α (ο λόγος των συγκρούσεων που έχουν ως αποτέλεσμα την προσκόλληση ως προς τον συνολικό αριθμό των συγκρούσεων μεταξύ των σωματιδίων και των κόκκων του συλλέκτη), υπολογίστηκε από κάθε καμπύλη συγκέντρωσης των ιών από το μοντέλο Rajagopalan and Tien (1976):

$$\alpha = -\frac{2d_c \ln(RB)}{3(1-\theta)\eta_0 L} \quad (3.6)$$

όπου d_c είναι η μέση διάμετρος των κόκκων συλλέκτη, η_0 είναι ο αδιάστατος συντελεστής σύλληψης μοναδιαίου συλλέκτη για ευνοϊκή απόθεση, και RB είναι ο λόγος ανάκτησης μάζας του ιού, $M_{r(i)}$, στην εκροή σε σχέση με αυτή του ιχνηθέτη, $M_{r(t)}$:

$$RB = \frac{M_{r(i)}}{M_{r(t)}} \quad (3.7)$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι η CFT ισχύει για διήθηση σε καθαρή κλίνη όπου υποτίθεται ότι οι αποτιθέμενοι ιοί δεν επηρεάζουν την επόμενη απόθεση ιών. Η σχέση μεταξύ k_c και d_c ορίζεται ως εξής (Harvey and Garabedian, 1991)

$$\frac{k_c}{\alpha} = \frac{3(1-\theta)}{2d_c} U\eta_0 \quad (3.8)$$

όπου η ενδοπορώδης ταχύτητα ορίζεται ως

$$U = \frac{q}{\theta} \quad (3.9)$$

Ο συντελεστής σύλληψης μοναδιαίου συλλέκτη για ευνοϊκή απόθεση, η_0 , υπολογίστηκε από τη σχέση (Tufenkji and Elimelech, 2004).

3.4. ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΙΩΝ-ΚΟΛΛΟΕΙΔΩΝ ΑΡΓΙΛΩΝ

Η κλασική θεωρία DLVO υπολογίζει τη συνολική ενέργεια αλληλεπίδρασης ανάμεσα σε δύο λείες, ομοιογενείς επιφάνειες με ιδανικές γεωμετρίες ως το άθροισμα της ελκτικής ενέργειας λόγω δυνάμεων van der Waals, Φ_{vdw} , της ηλεκτροστατικής απωστικής ενέργειας που προκύπτει από την επικάλυψη της ηλεκτρικής διπλοστιβάδας, Φ_{dl} , και σε πολύ στενή απόσταση διαχωρισμού της απωστικής ενέργειας Born, Φ_{Born} (Loveland et al., 1996):

$$\Phi_{DLVO}(h) = \Phi_{vdw}(h) + \Phi_{dl}(h) + \Phi_{Born}(h) \quad (3.10)$$

όπου h [m] είναι η απόσταση διαχωρισμού μεταξύ των προσεγγιζόμενων επιφανειών.

3.5. ΕΚΤΕΤΑΜΕΝΗ ΘΕΩΡΙΑ DLVO ΤΗΣ ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΚΟΛΛΟΕΙΔΩΝ

Σύμφωνα με τη θεωρία XDLVO, η συνολική ενέργεια αλληλεπίδρασης μεταξύ των επιφανειών θεωρείται ως το άθροισμα της κλασικής DLVO, Φ_{DLVO} , και Lewis οξεοβασικής, Φ_{AB} , ενέργειας αλληλεπίδρασης σε μια απόσταση διαχωρισμού, h [m], ανάμεσα σε δύο προσεγγιζόμενες επιφάνειες (Bergendahl and Grasso, 1999):

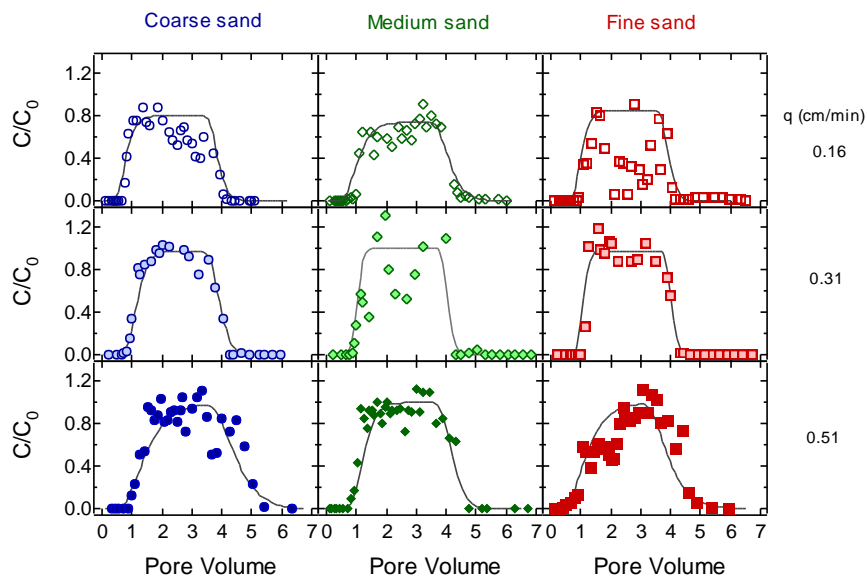
$$\Phi_{XDLVO}(h) = \Phi_{DLVO}(h) + \Phi_{AB}(h) \quad (3.11)$$

Η Lewis οξεοβασική ενέργεια αλληλεπίδρασης, Φ_{AB} , μειώνεται εκθετικά με την απόσταση (van Oss, 1994).

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

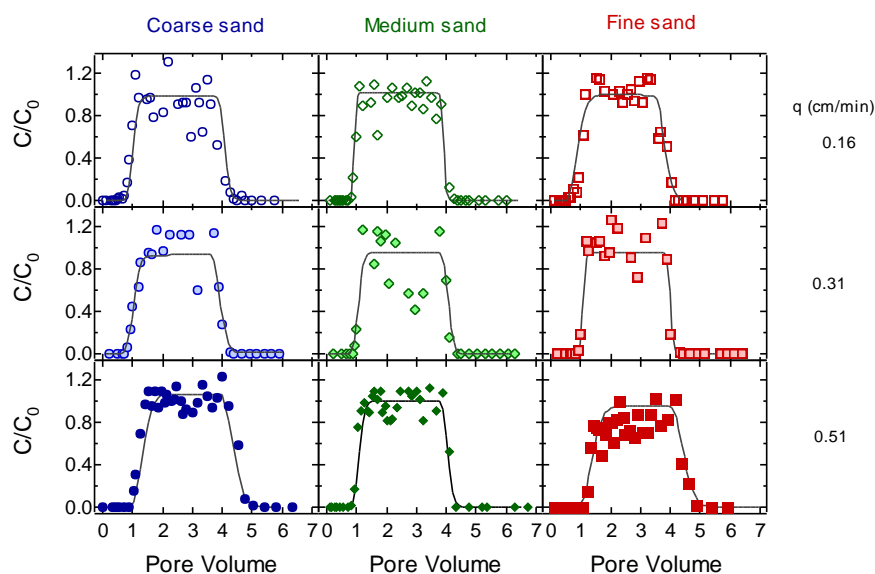
4.1. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΣΕ ΣΤΗΛΕΣ ΜΕ ΑΜΜΟ (ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΤΩΝ ΚΟΚΚΩΝ ΚΑΙ ΕΝΔΟΠΟΡΩΔΟΥΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΡΟΗΣ)

Το Σχήμα 4 παρουσιάζει τα δεδομένα κανονικοποιημένης συγκέντρωσης του MS2 μαζί με τις προσαρμοσμένες προβλέψεις του μοντέλου. Με εξαίρεση την περίπτωση της λεπτόκοκκης άμμου σε $q=0.51$ cm/min, όλες οι τιμές ανάκτησης μάζας M_r ήταν αρκετά χαμηλές, δείχνοντας ότι τα σωματίδια MS2 συγκρατήθηκαν στη στήλη είτε μη αντιστρεπτά προσκολλημένα πάνω στους κόκκους άμμου είτε αδρανοποιημένα. Στην πιο μικρή ειδική παροχή ($q=0.16$ cm/min) η ανάκτηση μάζας M_r μειώνεται με μείωση του μεγέθους των κόκκων άμμου εντούτοις, για τις άλλες δύο ειδικές παροχές δεν υπήρξε καμία σαφής τάση. Με εξαίρεση την περίπτωση της μεσόκοκκης άμμου με $q=0.31$ cm/min, όπου παρατηρήθηκε μικρή επιβράδυνση ($M_{1(i)}/M_{1(t)} = 1.05 > 1$), όλοι οι υπολογισμένοι λόγοι $M_{1(i)}/M_{1(t)}$ ήταν μικρότεροι από το ένα, δείχνοντας ότι η ταχύτητα του MS2 ενισχύεται από 2%-19% έναντι αυτής του ιχνηθέτη.



Σχήμα 4: Πειραματικά δεδομένα συγκέντρωσης του MS2 (σύμβολα) και προσομοιωμένες προβλέψεις του μαθηματικού μοντέλου (συνεχείς καμπύλες) για τις ειδικές παροχές 0.16 cm/min (ανοιχτά σύμβολα), 0.31 cm/min (γεμισμένα σύμβολα), και 0.51 cm/min (κλειστά σύμβολα) σε κορεσμένες στήλες με νερό γεμισμένες με χονδρόκοκκη (κύκλοι), μεσόκοκκη (ρόμβοι) και λεπτόκοκκη (τετράγωνα) άμμο.

Το Σχήμα 5 παρουσιάζει τα δεδομένα κανονικοποιημένης συγκέντρωσης του ΦΧ174 μαζί με τις προσαρμοσμένες προβλέψεις του μοντέλου. Οι υπολογισμένες τιμές M_T δείχνουν ότι δεν υπήρξε καμία σημαντική συγκράτηση του ΦΧ174 στην πληρωμένη στήλη. Επιπλέον, όλοι οι υπολογισμένοι λόγοι $M_{1(i)}/M_{1(i)}$ ήταν μικρότεροι από το ένα, δείχνοντας ότι η ταχύτητα του ΦΧ174 ενισχύεται από 4%-18% έναντι αυτής του ιχνηθέτη. Εντούτοις, πρέπει να σημειωθεί ότι καμία ευδιάκριτη σχέση μεταξύ του M_T ή $M_{1(i)}/M_{1(i)}$ και q ή d_c δε μπορεί να εξαχθεί από τα πειραματικά δεδομένα. Οι μέσες τιμές των τιμών α_L για κάθε μέγεθος κόκκου άμμου ήταν υψηλότερες για τον MS2 από ότι τον ΦΧ174. Οι παρατηρηθείσες διαφορές μεταξύ των μέσων τιμών α_L MS2 και ΦΧ174 αποδίδονται κυρίως στις διαφορετικές πρωτεϊνικές κάψες (υδροφοβική για τον MS2 και υδρόφιλη για τον ΦΧ174). Άξιο να σημειωθεί είναι ότι η ανάκτηση μάζας M_T του ΦΧ174 ήταν υψηλότερη από αυτή του MS2 για όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν.



Σχήμα 5: Πειραματικά δεδομένα συγκέντρωσης του ΦΧ174 (σύμβολα) και προσομοιωμένες προβλέψεις του μαθηματικού μοντέλου (συνεχείς καμπύλες) για τις ειδικές παροχές 0.16 cm/min (ανοιχτά σύμβολα), 0.31 cm/min (γεμισμένα σύμβολα), και 0.51 cm/min (κλειστά σύμβολα) σε κορεσμένες στήλες με νερό γεμισμένες με χονδρόκοκκη (κύκλοι), μεσόκοκκη (ρόμβοι) και λεπτόκοκκη (τετράγωνα) άμμο.

4.2. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΤΙΜΩΝ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

Ο συντελεστής σύλληψης μοναδιαίου συλλέκτη για ευνοϊκή απόθεση, η_0 , υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας την Εξίσωση Tufenkji and Elimelech (2004), για τους ιούς MS2, ΦΧ174, τρία μεγέθη άμμου (χονδρόκοκκη, μεσόκοκκη και λεπτόκοκκη), και τρεις ειδικές παροχές. Οι συντελεστές απόδοσης συγκρούσεων, α , για τους MS2, ΦΧ174 για τις πειραματικές συνθήκες αυτής της μελέτης, α που υπολογίζονται σε αυτήν την μελέτη είναι παρόμοιες με τις τιμές που αναφέρονται στη βιβλιογραφία. Τα αποτελέσματα έδειξαν περισσότερο ευνοϊκές συνθήκες προσκόλλησης υπήρξαν για τον MS2 απ' ό,τι για το ΦΧ174. Αυτό είναι ένα αναμενόμενο αποτέλεσμα επειδή η πρωτεϊνική κάψα του MS2 είναι υδροφοβική ενώ η πρωτεϊνική κάψα του ΦΧ174 είναι υδρόφιλη (Shields, 1986).

4.3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΔΙΑΔΕΙΠΟΝΤΟΣ ΕΡΓΟΥ

Τα πειραματικά δεδομένα από τα πειράματα προσκόλλησης ισορροπίας του MS2 και ΦΧ174 πάνω στον KGa-1b και στον STx-1b φαίνεται στο Σχήμα 6, και προσομοιώνονται με ισόθερμη τύπου Freundlich:

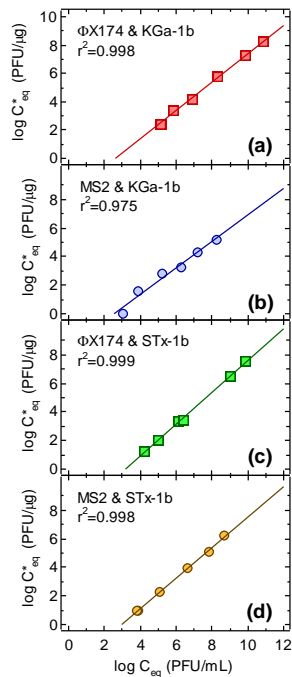
$$C_{\text{eq}}^* = K_f C_{\text{eq}}^m \quad (4.1)$$

όπου C_{eq}^* [(Μ ιόν)/(Μ αργίλων)] είναι η συγκέντρωση του ιού που προσκολλάται στα κολλοειδή αργίλων σε ισορροπία σε μονάδες (PFU/μg αργίλου), C_{eq} [M/L³] είναι η συγκέντρωση των ιών στην υδατική φάση σε κατάσταση ισορροπίας σε μονάδες (PFU /mL), K_f [(L³/M)^m] είναι η σταθερά Freundlich σε μονάδες {(mL)^m/[(μg αργίλου)(PFU)^{m-1}]}, και m [-] είναι ο εκθέτης Freundlich. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι η τάση προσκόλλησης των δύο βακτηριοφάγων (ΦΧ174 και MS2) είναι μεγαλύτερη για τον KGa-1b από ό,τι τον STx-1b. Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι η προσκόλληση του MS2 και στα δυο ορυκτά ήταν μεγαλύτερη από εκείνη του ΦΧ174. Ο λόγος που η προσκόλληση του ΦΧ174 πάνω στον STx-1b ήταν μικρότερη από την προσκόλληση στον KGa-1b οφείλεται στην πιο αρνητικά φορτισμένη επιφάνεια του STx-1b, η οποία δίνει ισχυρότερες απωστικές δυνάμεις.

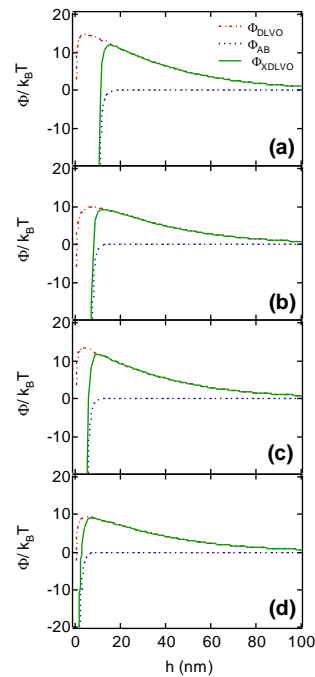
4.4. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΤΩΝ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΩΝ ΙΩΝ-ΑΡΓΙΛΩΝ

Τα προφίλ ενέργειας αλληλεπίδρασης για όλες τις πιθανές αλληλεπιδράσεις ιών-αργίλων υπολογίστηκαν με βάση την κλασική θεωρία DLVO και για την περίπτωση σφαιράς-επίπεδης επιφάνειας καθώς για τις πειραματικές συνθήκες (pH=7, $I_s=10^{-4}$ M). Τα προφίλ ενέργεια αλληλεπίδρασης για τους βακτηριοφάγους με τον KGa-1b δεν επιδεικνύουν $\Phi_{\text{min}1}$, αλλά μόνο ένα ρηχό $\Phi_{\text{min}2}$, δείχνοντας δυσμενείς συνθήκες προσκόλλησης (οι βακτηριοφάγοι προσκολλώνται στις επιφάνειες του KGa-1b στο δευτεροταγές ενεργειακό ελάχιστο). Ωστόσο, $\Phi_{\text{min}1}$ παρατηρήθηκε στο προφίλ της ενέργεια αλληλεπίδρασης των βακτηριοφάγων με τον STx-1b, γεγονός που υποδηλώνει ότι οι βακτηριοφάγοι θα μπορούσαν να προσκολληθούν σε άργιλο αν έχουν επαρκή κινητική ενέργεια ώστε να ξεπεράσουν το ενεργειακό φράγμα. Προκειμένου να εκτιμηθεί η σχετική συμβολή της Lewis οξεοβασικής ενέργειας αλληλεπίδρασης στην XDLVO, τα προφίλ Φ_{DLVO} , Φ_{AB} , και Φ_{XDLVO} υπολογίστηκαν για την περίπτωση της προσέγγισης σφαιράς-επίπεδης επιφάνειας και όλες τις πιθανές αλληλεπιδράσεις ιού-αργίλου στο πλαίσιο των πειραματικών συνθηκών της παρούσας μελέτης (pH=7, $I_s=10^{-4}$ M) και παρουσιάζονται στο Σχήμα 7.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η Lewis οξεοβασική ενέργεια αλληλεπίδρασης παίζει σημαντικό ρόλο στη συνολική ενέργεια αλληλεπίδρασης, και ότι ενισχύει την προσκόλληση των MS2 και ΦΧ174 πάνω στα επιλεγμένα αργιλικά ορυκτά. Συγκρίνοντας τα βάθη των πρωτοταγών ελαχίστων για κάθε σύστημα ιού-νερό-συλλέκτη, τα μεγέθη των πρωτοταγών ενεργειακών ελαχίστων βρέθηκαν να είναι μεγαλύτερα για τον MS2 από ό,τι τον ΦΧ174. Επιπλέον, το $\Phi_{\text{min}1}$ και για τους δύο ιούς ήταν μεγαλύτερο για τον KGa-1b από ό,τι τον STx-1b. Συνολικά, το μέγιστο $\Phi_{\text{min}1}$ παρατηρήθηκε για την αλληλεπίδραση του MS2 με τον KGa-1b, το οποίο είναι σε συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα της μελέτης αυτής (βλ. Σχήμα 6).



Σχήμα 6. Ισόθερμες τύπου Freundlich για την προσκόλληση των (α) ΦΧ174 πάνω στον KGa-1b, (β) MS2 στον KGa-1b, (γ) ΦΧ174 πάνω στον STx-1b, και (δ) MS2 στον STx-1b σε pH 7,0 και 25°C.

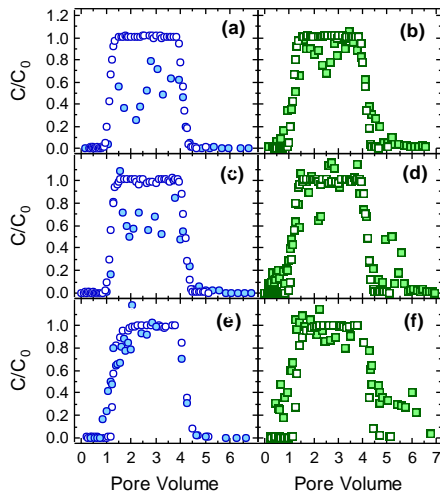


Σχήμα 7. Προβλεπόμενα προφίλ ενέργειας αλληλεπίδρασης για σφαίρα-επίπεδη επιφάνεια Φ_{DLVO} , Φ_{AB} , και Φ_{XDLVO} για (α) MS2 και KGa-1b, (β) MS2 και STx-1b, (γ) ΦΧ174 και KGa-1b, και (δ) ΦΧ174 και STx-1b ως συνάρτηση της απόστασης διαχωρισμού, για τις πειραματικές συνθήκες.

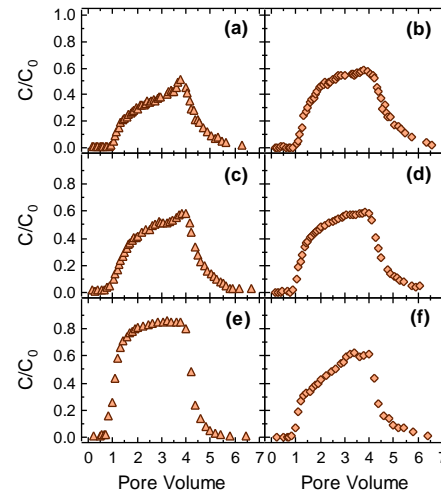
4.5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΣΕ ΣΤΗΛΕΣ ΜΕ ΣΦΑΙΡΙΔΙΑ ΓΥΑΛΙΟΥ (ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΕΝΔΟΠΟΡΩΔΟΥΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΡΟΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣ ΑΡΓΙΩΝ)

Στο Σχήμα 8 παρουσιάζονται τα δεδομένα της κανονικοποιημένης συγκέντρωσης των MS2 και ΦΧ174 για τις τρεις ενδοπορώδεις ταχύτητες $U=1.21, 0.74, 0.38$ cm/min, σε σχέση με τις κανονικοποιημένες συγκεντρώσεις του χλωρίου. Οι υψηλότερες παροχές αύξησαν τις συγκεντρώσεις κορυφής και την ανάκτηση μάζας και για τους δύο ιούς. Με καμία εξαίρεση όλες οι κατ'εκτίμηση τιμές ανάκτησης μάζας του MS2 ήταν χαμηλότερες από αυτές του ΦΧ174. Με την εξαίρεση της χαμηλότερης παροχής δεν παρατηρήθηκε σημαντική συγκράτηση του ΦΧ174 στη στήλη. Βεβαίως, η προσκόλληση και η αδρανοποίηση του MS2 μπορεί να συνέβαλαν στις παρατηρούμενες χαμηλές τιμές M_r %. Με την αύξηση της παροχής, η προγενέστερη άφιξη των MS2 και ΦΧ174 στην εκροή της στήλης σε σύγκριση με το Cl⁻ έγινε πιο εμφανής (Σχήμα 8).

Στο Σχήμα 9 παρουσιάζονται τα δεδομένα της κανονικοποιημένης συγκέντρωσης των KGa-1b και STx-1b για τις τρεις ενδοπορώδεις ταχύτητες. Για τις δύο μικρότερες ενδοπορώδεις ταχύτητες ο λόγος $M_{1(i)}/M_{1(t)}$ ήταν υψηλότερος από το ένα, και έδειχνε ότι η ταχύτητα του KGa-1b επιβραδύνεται από 17-20%. Οι τιμές της ανάκτησης μάζας δηλώνουν σημαντική συγκράτηση του KGa-1b στη στήλη, ειδικά στις χαμηλότερες παροχές. Μικρότερη προσκόλληση του KGa-1b στα γυάλινα σφαιρίδια παρατηρήθηκε στην υψηλότερη ενδοπορώδη ταχύτητα. Για όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν ο λόγος $M_{1(i)}/M_{1(t)}$ για τον STx-1b ήταν υψηλότερος από το ένα, δείχνοντας ότι η ταχύτητα του STx-1b, επιβραδύνεται από 1%-25%. Οι τιμές ανάκτησης μάζας, δείχνουν ότι δεν υπήρξε



Σχήμα 8. Τα πειραματικά δεδομένα (σύμβολα) για τη μεταφορά του ιχνηθέτη χλωριόντα (ανοικτά σύμβολα) και των βακτηριοφάγων MS2 (κύκλοι) και ΦΧ174 (τετράγωνα) σε ενδοπορώδεις ταχύτητες ίσες με: (a, b) 0.38, (c, d) 0.74, και (e, f) 1.21 cm/min.

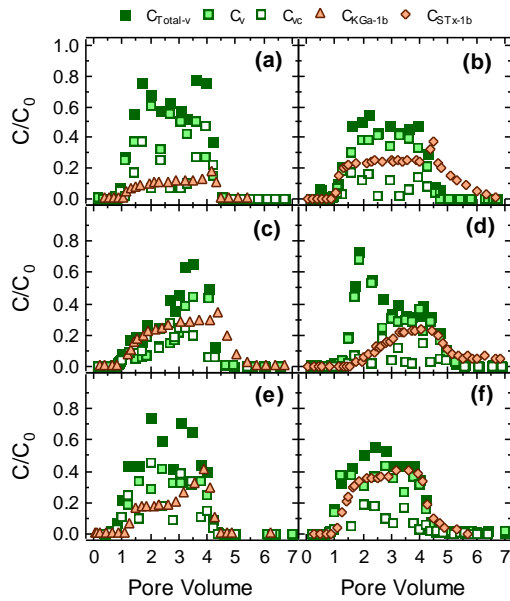


Σχήμα 9. Τα πειραματικά δεδομένα (σύμβολα) για τη μεταφορά και των αργίλων KGa-1b (τρίγωνα) και STx-1b (ρόμβοι) σε ενδοπορώδεις ταχύτητες ίσες με: (a, b) 0.38, (c, d) 0.74, και (e, f) 1.21 cm/min.

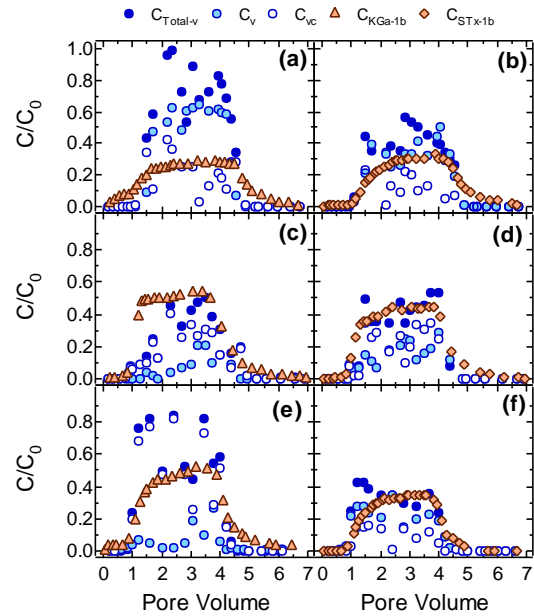
σημαντική επίδραση της ενδοπορώδους ταχύτητας στη συγκράτηση του STX-1b από τη στήλη. Υψηλότερες ανακτήσεις μάζας παρατηρήθηκαν για τον STX-1b από ότι τον KGa-1b στις μικρότερες ενδοπορώδεις ταχύτητες.

Το Σχήμα 10 παρουσιάζει τα δεδομένα της κανονικοποιημένης συγκέντρωσης του ΦΧ174 για τα πειράματα συμ-μεταφοράς με τις αργίλους για τις τρεις ενδοπορώδεις ταχύτητες $U=1.21, 0.74, 0.38$ cm/min. Η συγκέντρωση των αιωρούμενων ιών χαρακτηρίζεται ως C_v , η συνολική συγκέντρωση του ιού (αιωρούμενοι ιοί συν προσροφημένοι ιοί σε άργιλο) χαρακτηρίζεται ως $C_{Total-v} = C_v + C_{vc}$. Η συγκέντρωση των αιωρούμενων κολλοειδών αργίλων χαρακτηρίζεται ως C_c και η συγκέντρωση των ιών που είναι προσκολλημένοι στα αιωρούμενα κολλοειδή αργίλων χαρακτηρίζεται ως C_{vc} . Οι αντίστοιχες τιμές ανάκτησης μάζας έχουν μειωθεί σημαντικά με την παρουσία των κολλοειδών αργίλων σε σύγκριση με εκείνες που λαμβάνονται στην περίπτωση απουσίας τους, όπως προκύπτει από τα δεδομένα της καμπύλης συγκέντρωσης. Επιπλέον, οι διάφοροι λόγοι $M_{1(i)}/M_{1(t)}$ δείχνουν ότι η μέση ταχύτητα του ΦΧ174 ενισχύεται (10 έως 14%) μόνο στην υψηλότερη $U=1.21$ cm/min σε σύγκριση με την κίνηση του ιχνηθέτη Cl, ενώ μόνο η ταχύτητα του STx-1b ενισχύεται κατά 4% στην υψηλότερη U . Ο KGa-1b, επιβραδύνεται (0 έως 12%) σε σύγκριση με τα Cl σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν.

Το Σχήμα 11 δείχνει τα δεδομένα της κανονικοποιημένης συγκέντρωσης του MS2 για τα πειράματα συμ-μεταφοράς με τις αργίλους για τις τρεις ενδοπορώδεις ταχύτητες. Τα δεδομένα από τα πειράματα συμ-μεταφοράς που φαίνονται στο Σχήμα 11 δείχνουν ότι η μέση ταχύτητα του MS2 ενισχύεται (17 έως 19%) μόνο στην υψηλότερη U σε σχέση με την κίνηση των Cl. Ο KGa-1b ενισχύεται κατά 17% και ο STx-1b κατά 7% σε σύγκριση με την κίνηση των Cl για $U=1.21$ cm/min. Στη χαμηλότερη ενδοπορώδη ταχύτητα οι ταχύτητες των ιών και αργίλων καθυστερούν σημαντικά. Ως εκ τούτου, ανάλογα με τις γεωπεριβαλλοντικές συνθήκες, τα κολλοειδή σωματίδια όχι μόνο διευκολύνουν τη μεταφορά των ιών, αλλά και καθυστερούν τη μεταφορά τους στις ροές του υπεδάφους.



Σχήμα 10. Τα πειραματικά δεδομένα συνολικής συγκέντρωσης (κλειστά σύμβολα), αιωρούμενης συγκέντρωσης (γεμάτα σύμβολα) και προσκολλημένης συγκέντρωσης (ανοιχτά σύμβολα) των ιών για τη συμ-μεταφορά του ΦX174 με τα κολλοειδή KGa-1b (a, c, e) και STx-1b (b, d, f) σε ενδοπορώδεις ταχύτητες ίσες με: (a, b) 0.38, (c, d) 0.74, και (e, f) 1.21 cm/min.



Σχήμα 11. Τα πειραματικά δεδομένα συνολικής συγκέντρωσης (κλειστά σύμβολα), αιωρούμενης συγκέντρωσης (γεμάτα σύμβολα) και προσκολλημένης συγκέντρωσης (ανοιχτά σύμβολα) των ιών για τη συμ-μεταφορά του MS2 με τα κολλοειδή KGa-1b (a, c, e) και STx-1b (b, d, f) σε ενδοπορώδεις ταχύτητες ίσες με: (a, b) 0.38, (c, d) 0.74, και (e, f) 1.21 cm/min.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα έρευνα έχει συγχρηματοδοτηθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο - ΕΚΤ) και από εθνικούς πόρους μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» του Εθνικού Στρατηγικού Πλαισίου Αναφοράς (ΕΣΠΑ) – Ερευνητικό Χρηματοδοτούμενο Έργο: Ηράκλειτος II. Επένδυση στην κοινωνία της γνώσης μέσω του Ευρωπαϊκού Κοινωνικού Ταμείου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Anders, R. and Chrysikopoulos, C.V. 2009. *Transport of viruses through saturated and unsaturated columns packed with sand*. *Transp. Porous Media.*, 76: 121-138.
- Bergendahl, J. and Grasso, D. 1999. *Prediction of colloid detachment in a model porous media: Thermodynamics*, *AIChE J.*, 45: 475-484.
- Bolster, C.H., Mills, A.L., Hornberger, G.M., Herman, J.S., 2001. *Effect of surface coatings, grain size, and ionic strength on the maximum attainable coverage of bacteria on sand surfaces*. *J. Contam. Hydrol.*, 50: 287-305.
- Chrysikopoulos, C.V. and Syngouna, V.I. 2012. *Attachment of bacteriophages MS2 and ΦX174 onto kaolinite and montmorillonite: extended-DLVO interactions*. *Colloids Surf. B: Biointerfaces*, 92: 74-83.

- Chrysikopoulos, C.V. 1993. *Artificial tracers for geothermal reservoir studies*. Environ. Geol. 22:60-70.
- Derjaguin, B.V. and Landau, L. 1941. *Theory of the stability of strongly charged lyophobic soils and of the adhesion of strongly charged particles in solution of electrolytes*. Acta Physicochim. USSR, 14: 633-662.
- Harvey, R.W. and Garabedian, S.P. 1991. *Use of colloid filtration theory in modelling movement of bacteria through a contaminated sandy aquifer*. Environ. Sci. Technol. 25: 178-185.
- Hendry, M., Lawrence, J., Maloszewski, P., 1999. *Effects of velocity on the transport of two bacteria through saturated sand*. Ground Water. 37: 103-112.
- Jin, Y., Yates, M.V., Thompson, S.S., Jury, W.A., 1997. Sorption of viruses during flow through saturated sand columns, Environ. Sci. Technol. 31, 548-555.
- Loveland, J.P., Ryan, J.N., Amy, G.L., Harvey, R.W. 1996. *The reversibility of virus attachment to mineral surfaces*. Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Aspects. 107: 205-221.
- Rajagopalan, R. and Tien, C. 1976. *Trajectory analysis of deep-bed filtration with the sphere-in-cell porous media model*. AIChE J., 22: 523-533.
- Shields, P.A. 1986. *Factors influencing virus adsorption to solids*. Ph.D. Dissertation, University of Florida, Gainesville, FL.
- Sim, Y. and Chrysikopoulos, C.V. 1995. *Analytical models for one-dimensional virus transport in saturated porous media*. Water. Resour. Res., 31: 1429-1437 (Correction, Water Resour. Res., 32, 1473, 1996).
- Sim, Y. and Chrysikopoulos, C.V. 1999. *Analytical solutions for solute transport in saturated porous media with semi-infinite or finite thickness*. Advances Water Resour. 22: 507-519.
- Sim, Y., Chrysikopoulos, C.V., 2000. Virus transport in unsaturated porous media, Water Resour. Res. 36, 173-179.
- Syngouna, V.I. and Chrysikopoulos, C.V. 2011. *Transport of biocolloids in water saturated columns packed with sand: Effect of grain size and pore water velocity*. J. Contamin. Hydrol. 126: 301-314.
- Tufenkji, N. and Elimelech, M. 2004. *Correlation equation for predicting single-collector efficiency in physicochemical filtration in saturated porous media*. Environ. Sci. Technol. 38, 529-536.
- van Oss, C.J. 1993. *Acid-base interracial interactions in aqueous media*. Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Aspects, 78: 1-49.
- van Oss, C.J. 1994. *Interfacial Forces in Aqueous Media*, Marcel Dekker, New York.
- Verwey, E.J. and Overbeek, J.T.G. 1948. *Theory of the stability of lyophobic colloids*. Elsevier, Amsterdam.
- Walshe, G.E., Pang, L., Flury, M., Close, M.E., Flintoft, M. 2010. *Effects of pH, ionic strength, dissolved organic matter, and flow rate on the co-transport of MS2 bacteriophages with kaolinite in gravel aquifer media*. Water Res. 44: 1255-1269.

**ΧΡΗΣΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΜΗΝΟΥΣ
ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΤΕΧΝΗΤΟΥ
ΝΕΥΡΩΝΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΥΠΟΓΕΙΑ ΥΔΑΤΑ**

**Ευδοκία Ταπόγλου, Ιωάννης Χ. Τριχάκης, Ζωή Δόκου,
Γεώργιος Π. Καρατζάς**

Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης
Πολυτεχνειούπολη, 73100, Χανιά

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα μελέτη εξετάζεται η χρήση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων για την εκπαίδευση ενός τεχνητού νευρωνικού δικτύου εμπρόσθιας τροφοδοσίας, το οποίο προβλέπει τη διακύμανση της στάθμης σε πηγάδι παρατήρησης. Συγκεκριμένα, δοκιμάζονται τρεις διαφορετικές παραλλαγές του αλγορίθμου βελτιστοποίησης, ο κλασικός αλγόριθμος, ο PSO-TVAC και ο GLBest-PSO, με αυτόν με τα καλύτερα αποτελέσματα να είναι ο τελευταίος. Το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο στη συνέχεια εφαρμόζεται για ένα πηγάδι παρατήρησης στην περιοχή της Αγίας Χανίων, ενώ ακολουθεί και μεσοπρόθεσμη πρόβλεψη του ύψους της στάθμης του νερού στο πηγάδι για δύο υδρολογικά έτη. Τέλος, μελετώνται τρία σενάρια κλιματικής αλλαγής για τα έτη 2010-2020.

**EMPLOYING PARTICLE SWARM OPTIMIZATION FOR
TRAINING A NEURAL NETWORK. A GROUNDWATER
APPLICATION**

Evdokia Tapoglou, Ioannis C. Trichakis, Zoi Dokou, George P. Karatzas

Department of Environmental Engineering, Technical University of Crete,
Polytechnioupolis, 73100, Chania

ABSTRACT

In this study, particle swarm optimization algorithm is used in order to train a feed-forward artificial neural network which can predict daily the hydraulic head change in a well. Three different variations of this optimization algorithm are tested, the classic algorithm, PSO-TVAC and GLBest-PSO, with the one having the best results being the latter. The artificial neural network algorithm is implemented in an observation well in the region of Agia in Chania, Greece, followed by midterm prediction of the hydraulic head for two years. Finally, three climate change scenarios were examined for the period 2010-2020.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα υπόγεια ύδατα αποτελούν ένα σημαντικό κομμάτι της ανθρώπινη ζωής και η μελέτη τους αποτελεί σημαντικό εργαλείο για τη βιώσιμη διαχείριση τους. Ένας τρόπος μελέτης των υπογείων υδάτων είναι με τη χρήση μοντέλων που περιγράφουν το φυσικό σύστημα και εκτιμούν διάφορες παραμέτρους. Τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες: αυτά που έχουν τη βάση τους στη γεωμορφολογία του συστήματος, τα αριθμητικά και τα εμπειρικά. Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα ανήκουν στην κατηγορία των εμπειρικών μοντέλων και δεν προϋποθέτουν κανενός είδους γνώση του γεωλογικού υπόβαθρου.

Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενώς στο πεδίο της υδρολογίας, τόσο για επιφανειακά όσο και για υπόγεια ύδατα, καθώς μπορούν να περιγράψουν καλά μη γραμμικές σχέσεις μεταξύ των δεδομένων (Rajurkar et al., 2004). Πολλές εφαρμογές των τεχνητών νευρωνικών δικτύων έχουν εστιάσει στην πρόβλεψη του ύψους του ύδατος σε γεωτρήσεις, χρησιμοποιώντας διάφορες παραμέτρους εισόδου, όπως θερμοκρασία, βροχόπτωση και ύψος νερού σε γειτονικά πηγάδια (Coppola et al., 2005; Trichakis et al., 2011).

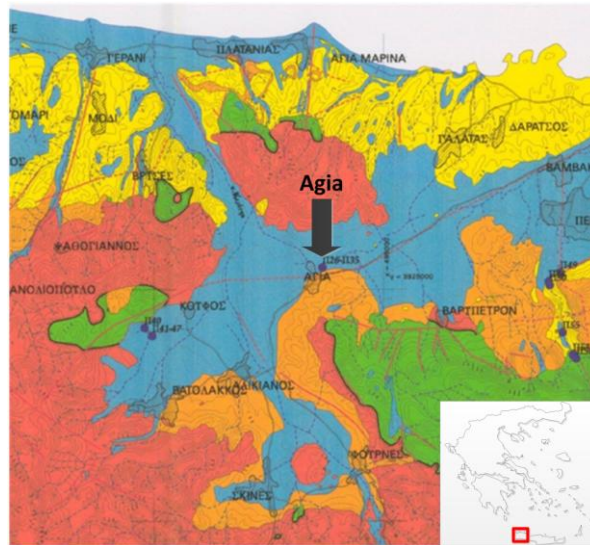
Η πιο συνήθης μέθοδος εκπαίδευσης τεχνητών νευρωνικών δικτύων είναι με χρήση του αλγορίθμου όπισθεν διάδοσης σφάλματος, ο οποίος όμως μπορεί να παρουσιάσει κάποια μειονεκτήματα, όπως ο εύκολος εγκλωβισμός του σε τοπικά ελάχιστα. Πολλοί ερευνητές έχουν χρησιμοποιήσει διάφορους άλλους αλγορίθμους εκπαίδευσης, όπως γενετικούς αλγόριθμους (Rogers et al., 1995), διαφορικούς εξελικτικούς αλγόριθμους (Trichakis et al., 2009) και αλγορίθμους συζυγών κλίσεων.

Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης με σμήνος σωματιδίων είναι ένας σχετικά νέος εξελικτικός αλγόριθμος, που αναπτύχθηκε από τους Eberhart και Kennedy (1995) και έχει αποδειχθεί αποτελεσματικός και αποδοτικός σε πολλές περιπτώσεις, ενώ έχει χρησιμοποιηθεί και για την εκπαίδευση νευρωνικών δικτύων (Chau, 2006; Akkar, 2010). Παρόλα αυτά είναι λίγες οι εφαρμογές του που αφορούν τη διαχείριση υπογείων υδάτων. Οι Wegley et al. (2000) χρησιμοποίησαν τον αλγόριθμο σμήνους σωματιδίων για τη βελτιστοποίηση του ρυθμού άντλησης σε ένα σύστημα διανομής νερού, ενώ σε μια άλλη εργασία (Gaur et al., 2011) ο αλγόριθμος αυτός χρησιμοποιήθηκε για την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας για την άντληση νερού, διατηρώντας ταυτόχρονα αποδεκτή πίεση σε δεξαμενές αποθήκευσης.

Σκοπός αυτής της εργασίας είναι η χρήση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης με σμήνος σωματιδίων για την εκπαίδευση ενός πολυεπίπεδου, εμπρόσθιας τροφοδοσίας τεχνητού νευρωνικού δικτύου, το οποίο προσομοιώνει το υδραυλικό ύψος σε ένα πηγάδι παρατήρησης στην περιοχή της Αγίας Χανίων. Τρεις διαφορετικές παραλλαγές του αλγορίθμου βελτιστοποίησης εξετάστηκαν, ενώ στη συνέχεια το εκπαιδευμένο δίκτυο χρησιμοποιήθηκε για τη μεσοπρόθεσμη πρόβλεψη της στάθμης στο πηγάδι, αλλά και για τη μελέτη τριών σεναρίων κλιματικής αλλαγής.

2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η περιοχή μελέτης βρίσκεται στο Νομό Χανίων, και συγκεκριμένα στην Αγία και αποτελεί μέρος της υδρολογικής λεκάνης του Κερίτη που έχει συνολική έκταση 30m². Η περιοχή αυτή αποτελεί και τον κύριο τροφοδότη σε πόσιμο νερό της πόλης των Χανίων και για αυτό το λόγο η μελέτη της είναι μεγάλης σημασίας (Νικολαΐδης και Καρατζάς, 2010). Τα διαθέσιμα δεδομένα περιλαμβάνουν τη βροχόπτωση από δύο μετεωρολογικούς σταθμούς, στον Αλικιανό (S1) και στο Σαμωνά (S2), την ημερήσια θερμοκρασία και το υδραυλικό ύψος στο πηγάδι σε ημερήσια βάση για την περίοδο 3/7/2007-12/5/2009, που περιλαμβάνει συνολικά 678 ημέρες.



Σχήμα 1: Χάρτης περιοχής μελέτης

3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία για την πρόβλεψη της στάθμης την k ημέρα είχε 4 επίπεδα, ενώ η συνάρτηση ενεργοποίησης του ήταν η σιγμοειδής. Στο επίπεδο εισόδου υπάρχουν 4 κόμβοι: η θερμοκρασία, η βροχόπτωση στο Σαμωνά και στον Αλικιανό την $k-1$ ημέρα και το υδραυλικό ύψος στο πηγάδι την $k-1$ ημέρα. Η βροχόπτωση που χρησιμοποιήθηκε ήταν η βροχόπτωση της $k-1$ ημέρας, καθώς η βέλτιστη χρονική υστέρηση, που αντιπροσωπεύει το χρόνο που κάνει η βροχή μέχρι να εισχωρήσει στο έδαφος και να έχει επίδραση στο ύψος του υδροφόρου ορίζοντα στο πηγάδι παρατήρησης, ήταν και για τους δυο μετεωρολογικούς σταθμούς ίση με μια ημέρα.

Τα κρυφά επίπεδα που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτήν την περίπτωση είναι δύο και περιλαμβάνουν 19 και 5 κόμβους αντίστοιχα (Μουτζούρης, 2010), ενώ τέλος υπάρχει ένας κόμβος εξόδου που αντιπροσωπεύει τη διαφορά στάθμης στο πηγάδι την k ημέρα. Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιείται η διαφορά υδραυλικού ύψους και όχι το υδραυλικό ύψος αυτό κάθε αυτό καθώς υπάρχει μεγάλη συσχέτιση μεταξύ του υδραυλικού ύψους της $k-1$ και της k ημέρας, γεγονός που οδηγεί το νευρωνικό δίκτυο σε μεροληπτική συμπεριφορά απέναντι σε αυτή την παράμετρο, υποεκτιμώντας όλες τις υπόλοιπες. (Nikolos, 2004)

Στη συνέχεια έγιναν οι κατάλληλες τροποποιήσεις σε ένα ήδη υπάρχον τεχνητό νευρωνικό δίκτυο (Nikolos et al., 2008; Trichakis et al., 2009), έτσι ώστε να δέχεται ως αλγόριθμο εκπαίδευσης τον αλγόριθμο βελτιστοποίηση με σμήνος σωματιδίων.

Σε αυτό τον αλγόριθμο, χρησιμοποιείται ένα σμήνος το οποίο αποτελείται από σωματίδια που κινούνται στο χώρο αναζήτησης της λύσης του προβλήματος, ψάχνοντας για το καλύτερο αποτέλεσμα. Κάθε σωματίδιο αποτελεί μια πιθανή λύση και προσδιορίζεται από το διάνυσμα της θέσης (x_i) και της ταχύτητας του (v_i). (Arumugam et al., 2008)

Σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου, κάθε σωματίδιο ενημερώνει την ταχύτητα του λαμβάνοντας υπόψη τρεις παράγοντες: την ταχύτητα στην προηγούμενη επανάληψη $v_i(t-1)$, την καλύτερη θέση που έχει επιτύχει το ίδιο το σωματίδιο

($pbest_i$), και την καλύτερη θέση του καλύτερου σωματιδίου του σμήνους ($gbest$). Έτσι η νέα ταχύτητα του κάθε σωματιδίου αλλάζει σύμφωνα με την εξίσωση 3.1.

$$v_i(t) = v_i(t-1) + c_1 \cdot r_1(t) \cdot (pbest_i - x_i(t)) + c_2 \cdot r_2(t) \cdot (gbest - x_i(t)) \quad (3.1)$$

όπου c_1, c_2 είναι σταθερές τιμές και $r_1(t), r_2(t)$ τυχαίες τιμές ομοιόμορφα κατανομημένες στο διάστημα $[0,1]$, οι οποίες αλλάζουν για κάθε σωματίδιο σε κάθε επανάληψη.

Η θέση του κάθε σωματιδίου αλλάζει σε κάθε επανάληψη σύμφωνα με την εξίσωση 3.2 (Eberhart and Kennedy, 1995).

$$x_i(t) = x_i(t-1) + u_i(t) \quad (3.2)$$

Στην αρχική έκδοση του PSO δεν υπήρχε κάποιος τρόπος για να περιοριστεί η ταχύτητα των σωματιδίων, με αποτέλεσμα αυτά να βγαίνουν εκτός του χώρου αναζήτησης, και για αυτό το λόγο σε επόμενες εκδόσεις του προστέθηκε μια ακόμα παράμετρος, αυτή του βάρους αδράνειας (w) και η οποία έκτοτε χρησιμοποιείται εκτεταμένα (Shi and Eberhart, 1998a). Έτσι η εξίσωση της νέας ταχύτητας μετατράπηκε στην εξίσωση 3.3.

$$v_i(t) = wv_i(t-1) + c_1 \cdot r_1(t) \cdot (pbest_i - x_i(t)) + c_2 \cdot r_2(t) \cdot (gbest - x_i(t)) \quad (3.3)$$

Επιπλέον αυτής της αλλαγής, κατά καιρούς έχουν παρουσιαστεί και διαφορές παραλλαγές που σκοπό έχουν τη βελτίωση κάποιου χαρακτηριστικού της μεθόδου. Στη παρούσα μελέτη εξετάζονται δύο παραλλαγές, ο PSO-TVAC (PSO with Time Varying Acceleration Coefficients) και ο GLBest-PSO.

- PSO – TVAC

Σε αυτήν την παραλλαγή, η οποία παρουσιάστηκε από τους Ratnaweera et al. (2004), οι συντελεστές επιτάχυνσης εξαρτώνται γραμμικά από τον αριθμό της επανάληψης στην οποία βρίσκεται ο αλγόριθμος, σύμφωνα με τις εξισώσεις 3.4-3.5. Με αυτόν τον τρόπο, ανάλογα με την επανάληψη στην οποία βρίσκεται ο αλγόριθμος, δίνεται περισσότερη βαρύτητα είτε στην αυτόνομη συμπεριφορά του κάθε σωματιδίου είτε στην συμπεριφορά του σμήνους.

$$c_{1(iter)} = c_{1max} - (c_{1max} - c_{1min}) \frac{iter}{iter_{max}} \quad (3.4)$$

$$c_{2(iter)} = c_{2min} - (c_{2max} - c_{2min}) \frac{iter}{iter_{max}} \quad (3.5)$$

όπου, c_{1max}, c_{2max} είναι οι μέγιστες τιμές των συντελεστών επιτάχυνσης, c_{1min}, c_{2min} οι ελάχιστες τιμές, $iter_{max}$ ο μέγιστος αριθμός των επαναλήψεων και $iter$ ο αριθμός της τρέχουσας επανάληψης.

- GLBest-PSO

Σε αυτήν την περίπτωση, τόσο το βάρος αδράνειας όσο και οι συντελεστές επιτάχυνσης εξαρτώνται από τη θέση της καλύτερης λύσης του ίδιου του σωματιδίου και της καλύτερης λύσης του σμήνους. Η βασική εξίσωση της ταχύτητας μετατρέπεται σε αυτή την περίπτωση στην εξίσωση 3.6, όπου οι παράμετροι w_i και C δίνονται από τις εξισώσεις 3.7-3.8.

$$v_i(t) = w_i v_i \cdot (t-1) + C \cdot r_i(t) \cdot (pbest_i + gbest - 2x_i(t)) \quad (3.6)$$

$$w_i = 1.1 - \frac{gbest}{(pbest_i)_{average}} \quad (3.7)$$

$$C = 1 + \frac{gbest}{pbest_i} \quad (3.8)$$

Τα πλεονεκτήματα από τη χρήση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης με σμήνος σωματιδίων σε σύγκριση με άλλες τεχνικές βελτιστοποίησης περιλαμβάνουν την ευκολία εφαρμογής του και την περιορισμένη απαιτούμενη ρύθμιση παραμέτρων. Επιπλέον, με τη χρήση αυτού του αλγορίθμου γίνεται ολική αναζήτηση του χώρου, αποφεύγοντας τον εγκλωβισμό σε τοπικά ελάχιστα.

Παρόλα αυτά, υπάρχουν και μειονεκτήματα κατά τη χρήση του αλγορίθμου σμήνους σωματιδίων, καθώς οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται μπορεί να επηρεάσουν πολύ τη σταθερότητα και την απόδοσή του, και κατά συνέπεια τη σύγκλιση του σε κάποιο βέλτιστο αποτέλεσμα (Shi and Eberhart, 1998b).

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΟΥ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ

Αρχικά για να επιλεγεί ο κατάλληλος, οι τρεις αλγόριθμοι εκτελέστηκαν για αριθμό επαναλήψεων (10000) και για σχετικά μικρό μέγεθος σμήνους (20 σωματίδια).

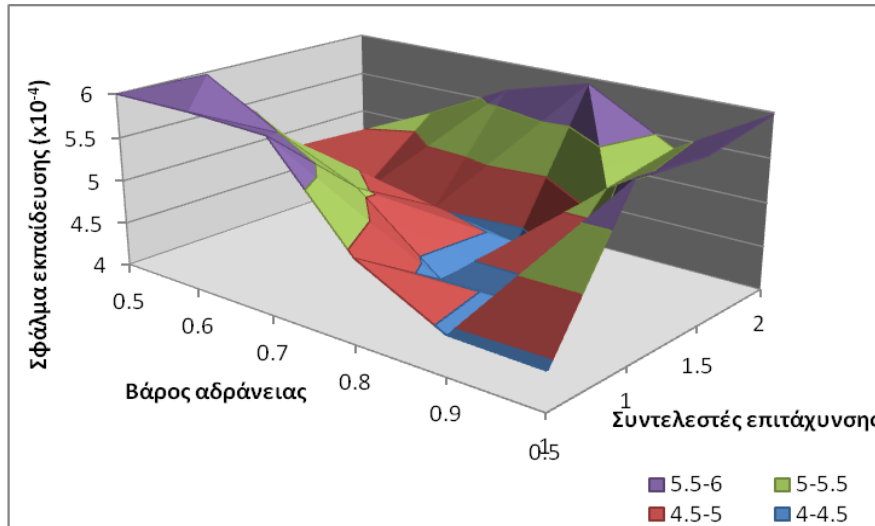
- Κλασσικός αλγόριθμος με την προσθήκη του βάρους αδράνειας

Στον κλασσικό αλγόριθμο οι παράμετροι που πρέπει να προσδιοριστούν είναι τρεις: το βάρος αδράνειας και οι δύο συντελεστές επιτάχυνσης. Οι παράμετροι αυτές βελτιστοποιήθηκαν ταυτόχρονα για τιμές του βάρους αδράνειας από 0.5-1 με βήμα 0.1, ενώ για τους συντελεστές επιτάχυνσης από 0.5-2 με βήμα 0.5 και για $c_1 = c_2$. Από τη διαδικασία αυτή προέκυψαν οι τιμές του Πίνακα 1 που αντιστοιχούν στην επιφάνεια του Σχήματος 2, και αφορούν το σφάλμα εκπαίδευσης. Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρείται και για το σφάλμα δοκιμής.

Πίνακας 1: Σφάλμα εκπαίδευσης για διάφορες τιμές συντελεστών επιτάχυνσης και βάρους αδράνειας

		Συντελεστές επιτάχυνσης			
		0.5	1	1.5	2
Βάρος αδράνειας	0.5	$6.33 \cdot 10^{-4}$	$5.97 \cdot 10^{-4}$	$4.8 \cdot 10^{-4}$	$4.57 \cdot 10^{-4}$
	0.6	$6.08 \cdot 10^{-4}$	$5.48 \cdot 10^{-4}$	$4.45 \cdot 10^{-4}$	$5.18 \cdot 10^{-4}$
	0.7	$5.96 \cdot 10^{-4}$	$5.08 \cdot 10^{-4}$	$4.53 \cdot 10^{-4}$	$5.66 \cdot 10^{-4}$
	0.8	$4.93 \cdot 10^{-4}$	$4.31 \cdot 10^{-4}$	$4.36 \cdot 10^{-4}$	$5.93 \cdot 10^{-4}$
	0.9	$4.44 \cdot 10^{-4}$	$4.32 \cdot 10^{-4}$	$5.24 \cdot 10^{-4}$	$5.38 \cdot 10^{-4}$
	1	$4.42 \cdot 10^{-4}$	$5.92 \cdot 10^{-4}$	$5.83 \cdot 10^{-4}$	$5.98 \cdot 10^{-4}$

Το σημείο για το οποίο παρατηρείται το ελάχιστο σφάλμα εκπαίδευσης είναι για βάρος αδράνειας ίσο με 0.9 και για συντελεστές επιτάχυνσης $c_1 = c_2 = 1$. Σε αυτό το σημείο μειώνεται το σφάλμα εκπαίδευσης, καθώς επιτυγχάνεται ισορροπία μεταξύ της ικανότητας εξερεύνησης του χώρου και τοπικής αναζήτησης της βέλτιστης λύσης.



Σχήμα 2: Γραφική αναπαράσταση μεταβολής του σφάλματος εκπαίδευσης σε σχέση με το βάρος αδράνειας και τους συντελεστές επιτάχυνσης

- PSO – TVAC

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Ratnaweera et al., 2004) η παραλλαγή αυτή έχει καλύτερα αποτελέσματα όταν ο συντελεστής c_1 ξεκινάει από την τιμή 2.5 και μειώνεται μέχρι το 0.5, ενώ ο συντελεστής c_2 ξεκινάει από 0.5 και καταλήγει στην τιμή 2.5. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ανάλογα με την επανάληψη στην οποία βρίσκεται ο αλγόριθμος, να εστιάζεται η αναζήτηση στο καλύτερο αποτέλεσμα του σμήνους ή στο καλύτερο αποτέλεσμα του κάθε σωματιδίου.

- GLBest – PSO

Το πλεονέκτημα αυτού του αλγορίθμου είναι ότι οι παράμετροι προσδιορίζονται ανάλογα με την απόσταση του κάθε σωματιδίου από το καλύτερο σωματίδιο του σμήνους και από την καλύτερη προσωπική του λύση. Έτσι, ο μόνος παράγοντας που πρέπει να ρυθμιστεί είναι ο αριθμός των επαναλήψεων, ο οποίος στην παρούσα φάση είναι σταθερός και ίσος με 10000 επαναλήψεις.

Τα αποτελέσματα και για τους τρεις αλγορίθμους, για 10000 επαναλήψεις και για μέγεθος σμήνους 20 σωματιδίων φαίνονται στον Πίνακα 2, όπου παρατηρείται ότι κατά μέσο όρο ο αλγόριθμος GLBest-PSO έχει καλύτερα αποτελέσματα και για αυτό θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια.

Πίνακας 2: Σφάλματα εκπαίδευσης και δοκιμής για τους τρεις αλγόριθμους

	Κλασσικός αλγόριθμος PSO		PSO-TVAC		GLBest-PSO	
	Σφάλμα Εκπαίδευσης	Σφάλμα Δοκιμής	Σφάλμα Εκπαίδευσης	Σφάλμα Δοκιμής	Σφάλμα Εκπαίδευσης	Σφάλμα Δοκιμής
	$5.64 \cdot 10^{-4}$	$4.01 \cdot 10^{-4}$	$5.34 \cdot 10^{-4}$	$3.76 \cdot 10^{-4}$	$4.06 \cdot 10^{-4}$	$3.50 \cdot 10^{-4}$
	$5.23 \cdot 10^{-4}$	$3.66 \cdot 10^{-4}$	$5.71 \cdot 10^{-4}$	$4.26 \cdot 10^{-4}$	$3.94 \cdot 10^{-4}$	$3.50 \cdot 10^{-4}$
	$4.78 \cdot 10^{-4}$	$3.45 \cdot 10^{-4}$	$5.67 \cdot 10^{-4}$	$3.98 \cdot 10^{-4}$	$3.91 \cdot 10^{-4}$	$3.62 \cdot 10^{-4}$
	$4.76 \cdot 10^{-4}$	$3.47 \cdot 10^{-4}$	$5.67 \cdot 10^{-4}$	$4.14 \cdot 10^{-4}$	$3.96 \cdot 10^{-4}$	$3.97 \cdot 10^{-4}$
	$6.46 \cdot 10^{-4}$	$4.53 \cdot 10^{-4}$	$5.16 \cdot 10^{-4}$	$3.78 \cdot 10^{-4}$	$3.85 \cdot 10^{-4}$	$3.45 \cdot 10^{-4}$
Μέσος όρος	$5.37 \cdot 10^{-4}$	$3.82 \cdot 10^{-4}$	$5.51 \cdot 10^{-4}$	$3.98 \cdot 10^{-4}$	$3.94 \cdot 10^{-4}$	$3.61 \cdot 10^{-4}$

4.2 ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΟΥ GLBest-PSO

Βασικό ρόλο στην εκτέλεση του αλγορίθμου έχει η τυχαία αρχικοποίηση των θέσεων και των ταχυτήτων των σωματιδίων, η οποία μπορεί να προκαλέσει μεγάλες διαφοροποιήσεις στα αποτελέσματα. Ακόμα όμως και αν τα αρχικά σωματίδια είχαν τα ίδια χαρακτηριστικά, σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου υπάρχουν κάποιες τυχαίες τιμές για κάθε σωματίδιο που επηρεάζουν την κίνηση του.

Για να προσδιοριστεί η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων του αλγορίθμου, εκτελέστηκε για διάφορα μεγέθη σμήνους (40-60 σωματίδια) και για 40.000 επαναλήψεις. Τα καλύτερα αποτελέσματα αυτής της διαδικασίας φαίνονται στον Πίνακα 3.

Πίνακας 3: Αποτελέσματα για διάφορα μεγέθη σμήνους

Σφάλμα Εκπαίδευσης	Σφάλμα Δοκιμής	Αριθμός ατόμων	Αριθμός επαναλήψεων
$3.87 \cdot 10^{-4}$	$3.69 \cdot 10^{-4}$	50	40000
$3.70 \cdot 10^{-4}$	$3.95 \cdot 10^{-4}$	50	40000
$3.97 \cdot 10^{-4}$	$3.44 \cdot 10^{-4}$	60	40000
$4.14 \cdot 10^{-4}$	$2.85 \cdot 10^{-4}$	60	40000

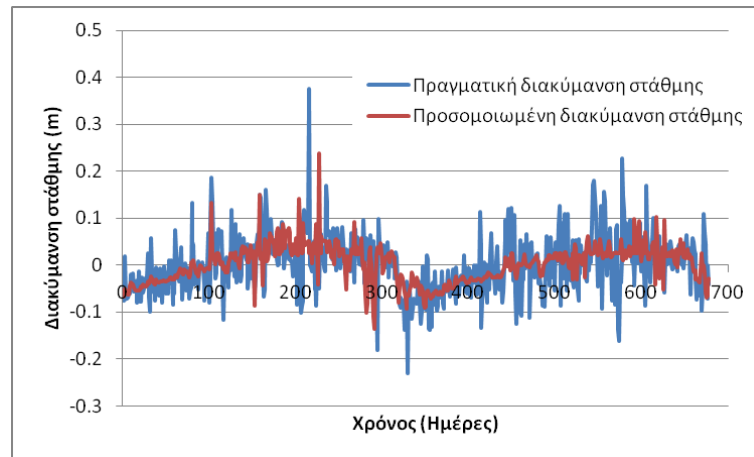
Το μικρότερο σφάλμα δοκιμής που παρατηρήθηκε είναι $2.847 \cdot 10^{-4}$ για μέγεθος σμήνους 60 και 40000 επαναλήψεις με αντίστοιχο σφάλμα εκπαίδευσης $4.137 \cdot 10^{-4}$. Παρόλο που υπήρχαν και μικρότερα σφάλματα εκπαίδευσης, επιλέχθηκε για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων η περίπτωση του παραπάνω σφάλματος, αφού στα μικρότερα σφάλματα εκπαίδευσης υπήρχαν ενδείξεις υπερεκπαίδευσης του δικτύου που μπορεί να έχουν ως αποτέλεσμα τη μη επαρκή προσομοίωση τιμών με τις οποίες το δίκτυο δεν έχει εκπαιδευτεί

Οι τιμές του σφάλματος που προέκυψαν είναι μικρότερες από αυτές που προσδιορίστηκαν στην περίπτωση εκπαίδευσης του δικτύου με χρήση του αλγορίθμου οπίσθια διάδοσης σφάλματος κατά 9.3% και 18% για τα σφάλματα εκπαίδευσης και δοκιμής αντίστοιχα.

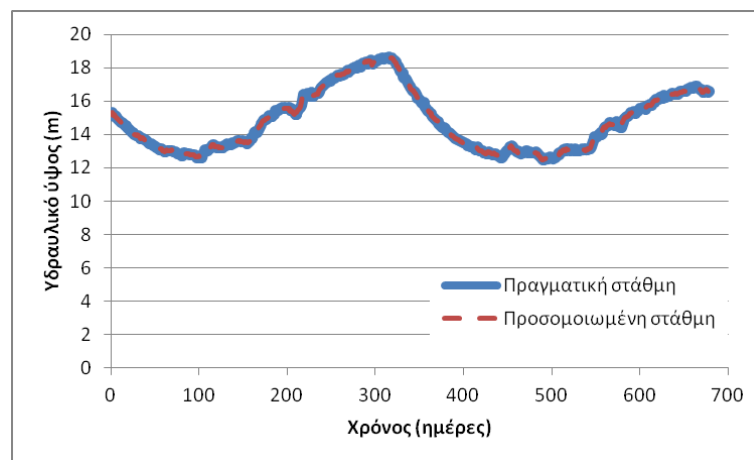
4.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Από την εκτέλεση του αλγορίθμου προέκυψαν οι προσομοιωμένες τιμές για τη στάθμη του νερού στο πηγάδι. Αυτή η διαφορά στάθμης συγκρίνεται με την πραγματική στο Σχήμα 3. Στο σχήμα αυτό φαίνεται ότι η γενική τάση των δεδομένων περιγράφεται πολύ καλά από το νευρωνικό δίκτυο. Συγκεκριμένα, η μέγιστη διαφορά της προσομοιωμένης στάθμης από την πραγματική είναι ίση με 0.35m, η ελάχιστη είναι ίση με $1.7 \cdot 10^{-5}$ m, ενώ η μέση διακύμανση είναι ίση με $1.77 \cdot 10^{-3}$ m. Ωστόσο, δε μπορούν να προσομοιωθούν επαρκώς τοπικά και μεταβατικά φαινόμενα που προκαλούν απότομες αλλαγές στη στάθμη, όπως η εκκίνηση και ο τερματισμός κάποιας άντλησης.

Στη συνέχεια, προσθέτοντας στην προσομοιωμένη διαφορά στάθμης της k ημέρας την πραγματική στάθμη $k-1$ ημέρας, υπολογίζεται η υδραυλική στάθμη στο πηγάδι όπως φαίνεται στο Σχήμα 4. Όταν μετατραπούν οι διαφορές στάθμης σε υδραυλικά ύψη, τότε οι αποκλίσεις των προσομοιωμένων τιμών από τις πραγματικές είναι μικρές, τόσο για τα δεδομένα με τα οποία έχει γίνει η εκπαίδευση (1η – 542η ημέρα) όσο και για τα δεδομένα για τα οποία το δίκτυο δεν έχει εκπαιδευτεί (543η – 678η ημέρα).



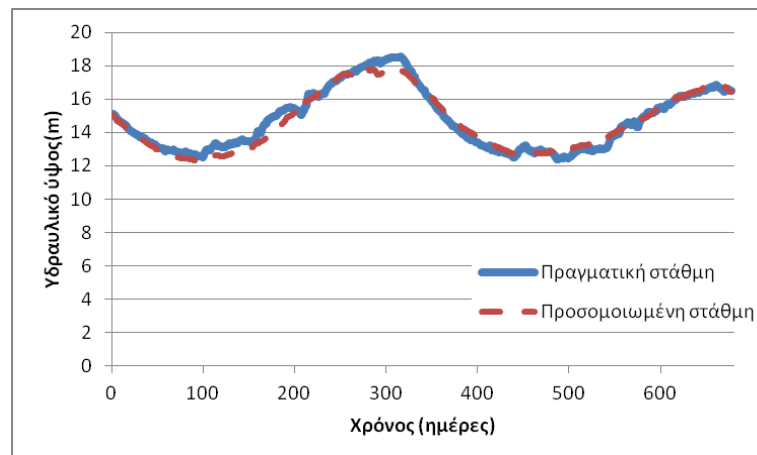
Σχήμα 3: Διακύμανση πραγματικής και προσομοιωμένης στάθμης προς το χρόνο



Σχήμα 4: Πραγματική και προσομοιωμένη τιμή στάθμης ως προς το χρόνο

4.4 ΜΕΣΟΠΡΟΘΕΣΜΗ ΠΡΟΒΛΕΨΗ

Ακολουθεί η μεσοπρόθεσμη πρόβλεψη, όπου πλέον δεν χρησιμοποιείται η πραγματική στάθμη της $k-1$ ημέρας αλλά μόνο η πραγματική στάθμη της πρώτης ημέρας της προσομοίωσης. Με αυτόν τον τρόπο προκύπτει το Σχήμα 5, από το οποίο φαίνεται ότι κατά τη μεσοπρόθεσμη πρόβλεψη το νευρωνικό δίκτυο τείνει να υποεκτιμά τη στάθμη του νερού στο πηγάδι παρατήρησης.



Σχήμα 5: Μεσοπρόθεσμη πρόβλεψη

Οι διαφορές της προσομοιωμένης από την πραγματική στάθμη είναι μικρές, με τη μέγιστη διαφορά να παρατηρείται την ημέρα 176 και να είναι ίση με -0.94m , ενώ η μέση διαφορά είναι ίση με -0.08m . Ακόμα και στο τέλος της εξεταζόμενης περιόδου το σφάλμα είναι μικρό και δεν συσσωρεύεται, παρόλο που τα δεδομένα αναφέρονται σε δύο υδρολογικά έτη. Το μοντέλο είναι σχετικά ακριβές, με μικρές αποκλίσεις από τις πραγματικές τιμές και για αυτό το λόγο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εξέταση διαφόρων κλιματικών σεναρίων.

4.5 ΣΕΝΑΡΙΑ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ

Λαμβάνοντας υπόψη την πρόβλεψη των Tsanis et al. (2011), σύμφωνα με την οποία μέχρι το τέλος του 2040 αναμένεται $12 (\pm 25)\%$ μείωση της μέσης βροχόπτωσης και $1.9 (\pm 0.8)^\circ\text{C}$ αύξηση της μέσης θερμοκρασίας στην Κρήτη, διαμορφώθηκαν 3 σενάρια κλιματικής αλλαγής που αφορούν την περίοδο 2010-2020.

Ωστόσο, τα παραπάνω στοιχεία δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν απευθείας στα ήδη υπάρχοντα δεδομένα, τόσο γιατί πρέπει να ληφθούν υπόψη παράγοντες όπως τα υγρά και ξηρά έτη στη περιοχή μελέτης και τυχόν ακραία καιρικά φαινόμενα, όσο και γιατί η πρόβλεψη των Tsanis et al. (2011) αναφέρεται σε αλλαγές στη μέση βροχόπτωση και θερμοκρασία.

Έτσι για να δημιουργηθούν οι απαραίτητες χρονοσειρές δεδομένων, χρησιμοποιήθηκε μια γεννήτρια τυχαίου καιρού, η LARS –WG 5 (Semenov and Barrow, 1997, 2002), η οποία μπορεί να προσομοιώσει δεδομένα καιρού σε κάποιο συγκεκριμένο σημείο, χρησιμοποιώντας τα στατιστικά δεδομένα των ήδη υπαρχόντων χρονοσειρών και τις αναμενόμενες διαφοροποιήσεις σε αυτά λόγω της κλιματικής αλλαγής. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργήθηκαν τρία σενάρια κλιματικής αλλαγής, που αντιστοιχούν στα διαστήματα εμπιστοσύνης και τη μέση τιμή της πρόβλεψης των Tsanis et al. (2011). Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν οι κλίσεις των διαγραμμάτων της μέσης βροχόπτωσης και θερμοκρασίας της παραπάνω εργασίας για να προσδιοριστεί η ακριβής ετήσια ποσοστιαία μείωση της βροχόπτωσης και η ετήσια μείωση της θερμοκρασίας.

Για το τελευταίο γνωστό έτος μετρήσεων (2008-2009) η βροχόπτωση στον S1 ήταν ίση με 739.8mm , ενώ στον S2 587.4mm . Χρησιμοποιώντας την κλίση των προαναφερθέντων διαγραμμάτων, η βροχόπτωση για κάθε έτος μετά το 2009 μπορεί να προσδιοριστεί από τις εξισώσεις 5.1-5.2 για τον S1 και τον S2 αντίστοιχα, με το t να αντιπροσωπεύει τη διαφορά μεταξύ του έτους αναφοράς και του έτους που μελετάται.

$$P_{S1} = -2.598t + 739.8 \quad (5.1)$$

$$P_{S2} = -2.598t + 587.4 \quad (5.2)$$

Τα άλλα δύο σενάρια που μελετήθηκαν αφορούσαν το 95% όριο εμπιστοσύνης των παραπάνω διαγραμμάτων και έτσι προέκυψαν τα τελικά ποσοστά του Πίνακα 4 για τις αλλαγές στη βροχόπτωση για το πρώτο και το τελευταίο έτος μελέτης. Όσον αφορά την αλλαγή της θερμοκρασίας, υπολογίστηκε ότι θα υπάρχει αύξηση κατά 0.054°C ανά έτος για το 1^ο σενάριο, 0.09°C για το 2^ο και 0.037°C για το 3^ο σενάριο.

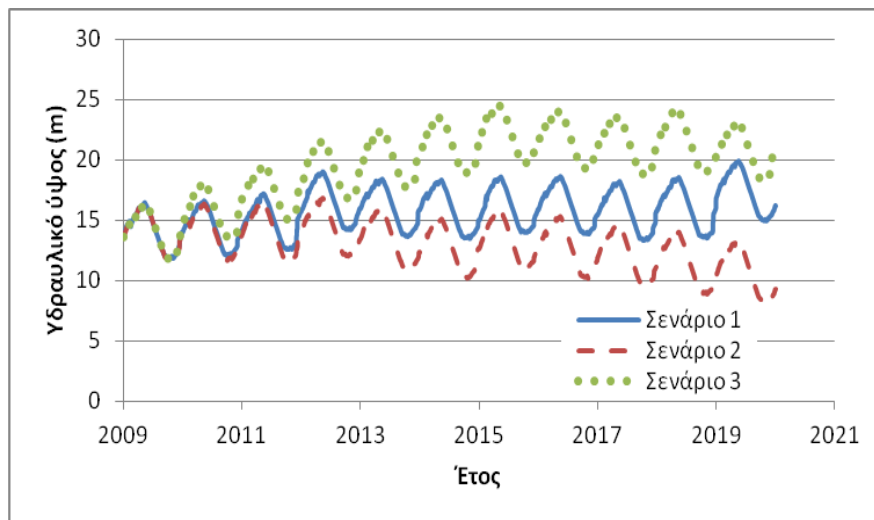
Χρησιμοποιώντας τις χρονοσειρές που προέκυψαν από το LARS-WG ως όρισμα εισόδου στο εκπαιδευμένο νευρωνικό δίκτυο, προέκυψαν οι αντίστοιχες τιμές στάθμης που φαίνονται στο Σχήμα 6.

Στο 1^ο σενάριο που μελετήθηκε δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές αλλαγές στα υδραυλικά ύψη, παρόλο που υπήρχε μείωση της βροχόπτωσης. Η μέση, μέγιστη και

ελάχιστη τιμή του υδραυλικού ύψους είναι παρόμοιες με του τελευταίου γνωστού έτους, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 5. Ωστόσο, πρέπει να τονιστεί ότι τα δεδομένα για την υπάρχουσα κατάσταση αναφέρονται μόνο στα δύο τελευταία γνωστά έτη (2008-2009), ενώ τα δεδομένα της κλιματικής αλλαγής για τα έτη 2010-2020. Αυτός είναι και ο λόγος που στο 1^ο σενάριο η μέγιστη τιμή του υδραυλικού ύψους είναι υψηλότερη από αυτή του έτους αναφοράς, τιμή που εμφανίζεται μια μόνο φορά κατά την περίοδο μελέτης και δεν αντιπροσωπεύει τη γενικότερη τάση του συστήματος. Σύμφωνα με το σενάριο αυτό δεν αναμένονται προβλήματα ξηρασίας στην περιοχή μελέτης, εάν δεν αλλάξει ο τρόπος διαχείρισης των υδατικών πόρων.

Πίνακας 4: Δεδομένα βροχόπτωσης (% μεταβολή) για το πρώτο και το τελευταίο έτος των σεναρίων κλιματικής αλλαγής

Έτος	S1			S2		
	Σενάριο 1 (%)	Σενάριο 2 (%)	Σενάριο 3 (%)	Σενάριο 1 (%)	Σενάριο 2 (%)	Σενάριο 3 (%)
2010	-0.35	-1.19	0.48	-0.44	-1.28	0.39
2020	-4.02	-13.19	5.15	-5.12	-14.28	4.05



Σχήμα 6: Στάθμη πηγαδιού για τα τρία σεναρία κλιματικής αλλαγής

Πίνακας 5: Σύνοψη επίδρασης κλιματικών αλλαγών στο υδραυλικό ύψος

Έτος αναφοράς (2008-2009)	Μέσο Υδραυλικό Ύψος (m)	Μέγιστο Υδραυλικό Ύψος (m)	Ελάχιστο Υδραυλικό Ύψος (m)	Μέση διακύμανση Υδραυλικού Ύψους (m)
1 ^ο Σενάριο	15.73	19.9	11.7	$6.39 \cdot 10^{-4}$
2 ^ο Σενάριο	13	16.8	8.1	$-1.06 \cdot 10^{-3}$
3 ^ο Σενάριο	19.5	24.5	11.8	$1.88 \cdot 10^{-3}$

Το 2^ο σενάριο που εξετάστηκε, ήταν και το δυσμενέστερο, καθώς αναφερόταν στη μεγαλύτερη μείωση της μέσης βροχόπτωσης. Σε αυτήν την περίπτωση και πάλι παρατηρείται περιοδικότητα στη συμπεριφορά των υδραυλικών υψών, αλλά ιδιαίτερα για τα έτη 2016-2020, η μείωση της στάθμης είναι ιδιαίτερα μεγάλη. Επιπλέον, η μέγιστη, η ελάχιστη και η μέση τιμή των υδραυλικών υψών για αυτήν την περίοδο είναι

σαφώς μικρότερες από αυτές του 1^{ου} σεναρίου και του έτους αναφοράς. Η μέση διακύμανση του υδραυλικού ύψους έχει αρνητική τιμή, γεγονός που σημαίνει ότι στη περιοχή μελέτης συνεχώς μειώνεται η συνολική ποσότητα νερού και για αυτό το λόγο υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να υπάρξουν προβλήματα ξηρασίας.

Το 3^ο σενάριο που εξετάστηκε αναφέρεται σε αύξηση της βροχόπτωσης κατά 13% μέχρι το 2040 και μικρή μόνο αύξηση της θερμοκρασίας. Ιδιαίτερα για τα έτη 2017-2020 υπάρχει αισθητή αύξηση των υδραυλικών υψών, με τη μέγιστη και τη μέση τιμή να είναι υψηλότερες από τις σημερινές. Αντίστοιχα με το 1^ο σενάριο, η ελάχιστη τιμή είναι μικρότερη από την αναμενόμενη, αλλά αναφέρεται μόνο σε μια ημέρα στην αρχή της περιόδου προσομοίωσης. Η μέση διακύμανση του υδραυλικού ύψους σε αυτή την περίπτωση είναι θετική και μεγαλύτερη από αυτή του έτους αναφοράς. Πρέπει, ωστόσο να τονιστεί ότι, τα παραπάνω αποτελέσματα εμπεριέχουν ένα σφάλμα, το οποίο δεν μπορεί να προσδιοριστεί άμεσα. Μια πηγή αυτού του σφάλματος μπορεί να είναι η προσομοίωση από το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο, ενώ μπορεί να οφείλεται και στις χρονοσειρές που δημιουργήθηκαν από το πρόγραμμα LARS-WG, καθώς τα δεδομένα που ήταν διαθέσιμα για την περιοχή μελέτης αφορούσαν λίγα έτη, με αποτέλεσμα να μην μπορούν να προσδιοριστούν επακριβώς στατιστικά χαρακτηριστικά όπως η συχνότητα εμφάνισης των υγρών και ξηρών ετών.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν τρεις παραλλαγές του αλγόριθμου βελτιστοποίησης με σμήνος σωματιδίων για την εκπαίδευση ενός τεχνητού νευρωνικού δικτύου, το οποίο προβλέπει τη διακύμανση του υδραυλικού ύψους σε πηγάδι παρατήρησης στην περιοχή Αγίας Χανίων. Η παραλλαγή που είχε τα καλύτερα αποτελέσματα και χρησιμοποιήθηκε για την μελέτη της περιοχής ήταν ο GLBest-PSO.

Το εκπαιδευμένο νευρωνικό δίκτυο, μπορεί να προσομοιώσει τη γενικότερη τάση της διακύμανσης της υδραυλικής στάθμης, χωρίς όμως να μπορούν να προσομοιωθούν επαρκώς τοπικά και μεταβατικά φαινόμενα, που μπορεί να προκαλέσουν απότομες αλλαγές στη στάθμη. Όταν η διακύμανση του υδραυλικού ύψους μετατραπεί σε υδραυλικό ύψος, χρησιμοποιώντας την πραγματική στάθμη του πηγαδιού για κάθε προηγούμενη ημέρα, η διαφορά μεταξύ πραγματικής και προσομοιωμένης στάθμης είναι ελάχιστη.

Στη συνέχεια το εκπαιδευμένο τεχνητό νευρωνικό δίκτυο χρησιμοποιείται για τη μεσοπρόθεσμη πρόβλεψη των υδραυλικών υψών στο πηγάδι για τα δύο επόμενα χρόνια. Σε αυτή την περίπτωση το δίκτυο είχε την τάση να υποεκτιμά το πραγματικό υδραυλικό ύψος, με τη διαφορά μεταξύ προσομοιωμένης και πραγματικής στάθμης να φτάνει σε μια περίπτωση μέχρι και περίπου το -1m. Παρόλα αυτά το σφάλμα δεν συσσωρεύεται κατά τα δύο χρόνια της μεσοπρόθεσμης πρόβλεψης και για αυτό το λόγο το δίκτυο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη κλιματικών σεναρίων.

Τα τρία σενάρια κλιματικής αλλαγής που εξετάστηκαν αφορούν τη αλλαγή της βροχόπτωσης και της θερμοκρασίας στη περιοχή μελέτης. Μόνο κατά το δεύτερο σενάριο διαπιστώθηκαν ιδιαίτερα αρνητικές επιπτώσεις για τον υδροφορέα, όπου και αναμένεται να εμφανιστούν στην περιοχή προβλήματα ξηρασίας. Για τα άλλα δύο σενάρια οι επιπτώσεις ποικίλουν από ουδέτερες μέχρι και θετικές.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Μουτζούρης, Ι., 2010. *Προσομοίωση στάθμης γεώτρησης σε καρστικό υδροφορέα με χρήση νευρωνικών δικτύων*. Διπλωματική Εργασία Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης.

- Νικολαΐδης, Ν. και Καρατζάς, Γ., 2010. *Ειδικό σχέδιο διαχείρισης των υδατικών πόρων για τις λεκάνες απορροής των ποταμών Κερίτη-Θερίσου και Κοιλιάρη*. Οργανισμός Ανάπτυξης Δυτικής Κρήτης.
- Akkar, H.A.R., 2010. *Optimization of Artificial Neural Networks by using Swarm intelligent*, 6th International Conference on Networked Computing (INC) 1-5.
- Arumugam, S.M., Rao, M. and Chandramohan, A., 2008. *A new and improved version of particle swarm optimization algorithm with global-local best parameters*. Knowledge and Information Systems, 16: 331-357.
- Chau, K.W., 2006. *Particle swarm optimization training algorithm for ANNs in stage prediction of Shing Mun River*. Journal of Hydrology, 329: 363-367.
- Coppola, E.A., Rana, A.J., Poulton, M.M., Szidarovszky, F. and Uhl, V.W., 2005. *A neural network model for predicting aquifer water level elevations*. Ground Water, 43: 231-241.
- Eberhart, R. and Kennedy, J., 1995. *A new optimizer using particle swarm theory*, Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science, 39-43.
- Gaur, S., Chahar, B.R. and Graillot, D., 2011. *Analytic elements method and particle swarm optimization based simulation-optimization model for groundwater management*. Journal of Hydrology, 402: 217-227.
- Nikolos, I.K. 2004. *Inverse design of aerodynamic shapes using differential evolution coupled with artificial neural network*, ERCOFTAC Conference in Design Optimization: Methods and Applications, Athens.
- Nikolos, I.K., Stergiadi, M., Papadopoulou, M.P., Karatzas, G.P., 2008. *Artificial neural networks as an alternative approach to groundwater numerical modelling and environmental design*. Hydrological Processes, 22: 3337-3348.
- Rajurkar, M.P., Kothiyari, U.C. and Chaube, U.C., 2004. *Modeling of the daily rainfall-runoff relationship with artificial neural network*. Journal of Hydrology, 285: 96-113.
- Ratnaweera, A., Halgamuge, S.K. and Watson, H.C., 2004. *Self-organizing hierarchical particle swarm optimizer with time-varying acceleration coefficients*. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 8: 240-255.
- Rogers, L.L., Dowla, F.U. and Johnson, V.M., 1995. *Optimal Field-Scale Groundwater Remediation Using Neural Networks and the Genetic Algorithm*. Environmental Science & Technology, 29: 1145-1155.
- Semenov, M.A. and Barrow, E.M., 1997. *Use of a stochastic weather generator on the development of climate change scenarios*. Climatic Change, 35: 397-414.
- Semenov, M.A. and Barrow, E.M., 2002. *LARS - WG: A Stochastic Weather Generator for Use in Climate Impact Studies*.
- Shi Y. and Eberhart R.C., 1998a *A modified particle swarm optimizer*. IEEE International Conference on Evolutionary Computation 69-73.
- Shi, Y. and Eberhart, R.C., 1998b. *Parameter Selection in Particle Swarm Optimization*. Proceedings of the 7th International Conference on Evolutionary Programming VII.
- Trichakis, I.C., Nikolos, I.K. and Karatzas, G.P., 2011. *Artificial Neural Network (ANN) Based Modeling for Karstic Groundwater Level Simulation*. Water Resources Management, 25: 1143-1152.
- Trichakis, I.C., Nikolos, I.K. and Karatzas, G.P., 2009. *Optimal selection of artificial neural network parameters for the prediction of a karstic aquifer's response*. Hydrological Processes, 23: 2956-2969.
- Tsanis, I., Koutroulis, A., Daliakopoulos, I. and Jacob, D., 2011. *Severe climate-induced water shortage and extremes in Crete*. Climatic Change, 106: 667-677.
- Wegley, C., Eusuff, M. and Lansey, K., 2000. *Determining Pump Operations Using Particle Swarm Optimization*, Minneapolis, Minnesota, USA 206-206.

**ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ ΣΤΗ
ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΤΗΣ ΣΤΑΘΜΗΣ ΤΟΥ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ
ΣΤΟ ΠΕΔΙΝΟ ΤΜΗΜΑ ΤΟΥ Ν. ΞΑΝΘΗΣ
Π. Δαμιανίδης, Φ.-Κ. Πλιάκας, Α. Καλλιώρας**

Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας, Τομέας Γεωτεχνικής Μηχανικής,
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών,
Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, 67100 Ξάνθη

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία διερευνώνται οι επιπτώσεις της μεταβολής των βροχοπτώσεων σε υπόγεια υδροφόρα συστήματα του πεδινού τμήματος του Ν. Ξάνθης. Μελετήθηκαν τρεις περιοχές με σχετικά ίδια γεωμορφολογικά, γεωλογικά και υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά λαμβάνοντας υπόψη υδρολογικά και υδρογεωλογικά στοιχεία των τελευταίων 22 ετών 1989–2010. Σχεδιάστηκαν ενιαία διαγράμματα μεταβολής μηνιαίων τιμών βροχόπτωσης και τιμών του υψομέτρου στάθμης του υπόγειου νερού, όπως κατεγράφη σε τρεις αυτογραφικούς σταθμηγράφους στις περιοχές έρευνας. Από την έρευνα προέκυψε μια πρώτη τεκμηριωμένη εκτίμηση ότι σημαντικό τμήμα της διακύμανσης στάθμης των υπόγειων νερών των περιοχών έρευνας φαίνεται να οφείλεται στις μεταβολές του φυσικού εμπλουτισμού των υπόγειων νερών της περιοχής εξαιτίας των αυξημένων τιμών βροχόπτωσης των αντίστοιχων χρονικών περιόδων.

**EVALUATION OF THE EFFECTS OF RAINFALL ON
GROUNDWATER LEVEL FLUCTUATION
AT PREFECTURE XANTHI PLAIN REGION, GREECE
P. Damianidis, F.-K. Pliakas, A. Kallioras**

Laboratory of Engineering Geology, Section of Geotechnical Engineering,
Department of Civil Engineering,
Democritus University of Thrace, 67100 Xanthi

ABSTRACT

This paper presents the study of the impact of rainfall changes on aquifer systems in Xanthi Prefecture plain region, Greece. Three study areas were investigated, taking in account relevant hydrological and hydrogeological data of the last 22 years period 1989–2010. Graphs based on this data are designed showing rainfall monthly values and groundwater fluctuation values (in m asl), recorded by three water groundwater level recorders installed at the three study areas respectively. The investigation revealed that significant part of the groundwater level fluctuation at the study areas appears to be influenced by changes in natural recharge of groundwater in the region because of increased rainfall values of the respective periods.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τις τελευταίες δεκαετίες, πολλές επιστημονικές μελέτες έχουν βοηθήσει στην καλύτερη κατανόηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στους υδατικούς πόρους. Ωστόσο, η έρευνα έχει επικεντρωθεί κυρίως στα επιφανειακά νερά, λόγω της ορατότητας, της προσβασιμότητας και της οφθαλμοφανούς αναγνώρισης των κλιματικών επιπτώσεων σε αυτά από ό, τι στα υπόγεια νερά. Παρά το γεγονός ότι πρόσφατες έρευνες έχουν αρχίσει να επικεντρώνονται περισσότερο στην κατανόηση των επιπτώσεων της κλιματικής μεταβλητότητας και αλλαγής στην ποσότητα και την ποιότητα των υπόγειων νερών, τα αποτελέσματα δεν είναι ακόμη πλήρως κατανοητά (Green, et al. a, b, 2007, USGS, 2009).

Η κλιματική μεταβλητότητα και αλλαγή μπορεί να επηρεάσει την ποσότητα και την ποιότητα διαφόρων στοιχείων του παγκόσμιου υδρολογικού κύκλου (Loaiciga et al., 1996, Sherif and Singh, 1999, Milly et al., 2005, USGS, 2009). Τα στοιχεία του υδρολογικού κύκλου των επιφανειακών υδάτων που μπορεί να επηρεαστούν είναι η περιεκτικότητα της ατμόσφαιρας σε υδρατμούς, η βροχόπτωση και το πρότυπο εξατμισοδιαπνοής, το χιόνι και το λιώσιμο των πάγων, η θερμοκρασία και η υγρασία του εδάφους, καθώς και η επιφανειακή ροή και απορροή (Bates et al., 2008, USGS, 2009). Τέτοιες αλλαγές στα επιφανειακά συστατικά του παγκόσμιου υδρολογικού κύκλου θα επηρεάσει πιθανότατα το τμήμα του υδρολογικού κύκλου των υπόγειων νερών εντός της κορεσμένης και ακόρεστης ζώνης του εδάφους, ενώ μπορεί να επηρεάσει τον εμπλουτισμό, την εκφόρτιση και την αποθήκευση υπόγειων νερών πολλών υδροφόρων παγκοσμίως (USGS, 2009).

Η κατανόηση των δυνητικών επιπτώσεων της κλιματικής μεταβλητότητας και αλλαγής στα υπόγεια νερά είναι πιο περίπλοκη από εκείνη στα επιφανειακά (Holman, 2006, USGS, 2009). Η διάρκεια παραμονής των υπόγειων νερών μπορεί να κυμαίνεται από μερικές ημέρες έως κάποιες δεκάδες χιλιάδες χρόνια ή και περισσότερο, γεγονός που καθυστερεί και διασπείρει τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής και προκαλεί προσπάθειες για την εύρεση των επιπτώσεων στα υπόγεια νερά της κλιματικής μεταβλητότητας και αλλαγής (Chen et al., 2004, USGS, 2009). Επιπλέον, οι ανθρώπινες δραστηριότητες, όπως η άντληση των υπόγειων νερών και η επακόλουθη απομείωση των αποθεμάτων, όπως και η δέσμευση της φυσικής εκροής, βρίσκονται συχνά στην ίδια κλίμακα χρόνου με ένα τμήμα της κλιματικής μεταβλητότητας και αλλαγής, γεγονός που καθιστά δύσκολη τη διάκριση μεταξύ των ανθρώπινων και των κλιματικών πιέσεων στα υπόγεια νερά (Hanson et al., 2004, USGS, 2009).

Αν και απαιτείται περαιτέρω έρευνα πάνω στο θέμα, η κλιματική μεταβλητότητα και αλλαγή μπορεί να είναι αναπόσπαστα στοιχεία για την επιτυχή διαχείριση των υπόγειων υδατικών πόρων (Hanson et al., 2004, USGS, 2009). Επομένως, είναι απαραίτητο η κλιματική μεταβλητότητα και αλλαγή να αξιολογηθούν και να κατανοηθούν μακροπρόθεσμα, να βελτιωθεί ο προγραμματισμός και η διαχείριση των υπόγειων υδατικών πόρων στο μέλλον, λαμβάνοντας ταυτόχρονα υπόψη τις αυξανόμενες πιέσεις στους υπόγειους υδατικούς πόρους από την αύξηση του πληθυσμού και των βιομηχανικών, γεωργικών και οικολογικών αναγκών (USGS, 2009, Warner, 2007).

Η χώρα μας και η ευρύτερη περιοχή της ΝΑ Μεσογείου, αντιμετωπίζουν εδώ και είκοσι χρόνια, προβλήματα επάρκειας των υδατικών πόρων. Η κλιματική αλλαγή έχει κύρια χαρακτηριστικά την αύξηση της θερμοκρασίας, την άνοδο της στάθμης της θάλασσας και τη μείωση του όγκου των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων (Δάνδολος κ.ά., 2008). Κάθε διατάραξη του καθεστώτος των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων συνεπάγεται σημαντικές μεταβολές του υδρολογικού κύκλου, του υδρολογικού

ισοζυγίου (επιφανειακά ύδατα) και του υδρογεωλογικού ισοζυγίου (υπόγεια ύδατα) (ΕΜΕΚΑ, 2011).

Η διάκριση των ανανεώσιμων υδατικών πόρων σε επιφανειακούς και υπόγειους έχει μόνο θεωρητική έννοια, διότι οι δύο συνιστώσες της συνολικής ροής συνδέονται μεταξύ τους (δευτερογενής κατείδυση και απορροή). Για κάθε συγκεκριμένη περιοχή, στο επίπεδο των αφίξεων λαμβάνεται υπόψη η επιφανειακή απορροή και η κατείδυση, που τροφοδοτεί τον υδροφόρο ορίζοντα. Στο επίπεδο των απωλειών, λαμβάνεται υπόψη η επιφανειακή και η υπόγεια απορροή. Σε τοπικό ή υπερτοπικό επίπεδο, η χωριστή εκτίμηση επιφανειακών και υπόγειων πόρων ενέχει τον κίνδυνο αγνόησης των δευτερογενών φαινομένων (κατείδυση, απορροή) και λανθασμένης εκτίμησης των υδατικών αφίξεων προς χρήση ή προς έξοδο από την περιοχή αυτή. Στην πραγματικότητα, οι φυσικοί υδατικοί πόροι, προσδιορισμένοι από την επιφανειακή, μετρούμενη ή εκτιμώμενη απορροή, και οι αντίστοιχοι υδατικοί πόροι, προσδιορισμένοι στη βάση της τροφοδοσίας των υπόγειων υδροφόρων συστημάτων, δεν πρέπει να θεωρούνται προστιθέμενοι παρά μόνο σε οριακές περιπτώσεις. Είναι, γενικά, εν μέρει προστιθέμενοι σε συνάρτηση με την κλίμακα θεώρησης και τις φυσικές, κλιματικές και, επικουρικά, γεωλογικές συνθήκες που επιδρούν στις σχέσεις ανάμεσα στους υδροφόρους και στην επιφανειακή απορροή μιας περιοχής (ΕΜΕΚΑ, 2011).

Οι επιπτώσεις των κλιματικών αλλαγών στα υδατικά, κυρίως τα υπόγεια υδατικά συστήματα μπορούν να συνοψιστούν στα εξής (ΕΜΕΚΑ, 2011):

- Γενική μείωση της τροφοδοσίας και ανανέωσης του νερού των υδροφόρων λόγω της μείωσης των βροχοπτώσεων και της αύξησης της εξατμισοδιαπνοής.
- Αυξημένη υφαλμύριση των παράκτιων και υποθαλάσσιων υδροφόρων, ιδιαίτερα των καρστικών, με προέλαση του μετώπου υφαλμύρισης προς την ενδοχώρα λόγω του μειωμένου δυναμικού της χερσαίας υδατικής φάσης εξαιτίας της μειωμένης τροφοδοσίας και της υπεράντλησης.
- Αύξηση της συγκέντρωσης ρυπαντικού φορτίου στα παράκτια υδατικά σώματα και στη θάλασσα λόγω μικρότερης αραίωσης.
- Εντατικοποίηση της αποδόμησης των δελταϊκών περιοχών, που ήδη έχει ξεκινήσει λόγω της κατασκευής εγκάρσιων φραγμάτων στην ανάντη ζώνη (μείωση απορροής και στερεοπαροχής) και παράλληλων αναχωμάτων στην πεδινή ζώνη των δέλτα (άφιξη μεταφερόμενου υλικού σε ένα και μοναδικό στόμιο).
- Ρύπανση ή αποξήρανση των παράκτιων υγροτόπων.
- Επιδείνωση του φαινομένου της ερημοποίησης λόγω υδατικού ελλείμματος και εδαφικών μεταβολών (συμπυκνώσεις, στεγανοποιήσεις κ.λπ.).

Στο πλαίσιο της μελέτης των επιπτώσεων της μεταβολής των βροχοπτώσεων σε υπόγεια υδροφόρα συστήματα του πεδινού τμήματος του Ν. Ξάνθης, διερευνώνται οι τρεις περιοχές, που παρουσιάζονται στο Σχήμα 1: (1) ανατολικό τμήμα του Δέλτα του Ποταμού Νέστου, (β) περιοχή Βαφείκων του Νομού Ξάνθης, (γ) περιοχή Πολυσίτου του Νομού Ξάνθης. Στο ίδιο σχήμα εμφανίζονται και οι θέσεις των τριών εγκατεστημένων αυτογραφικών σταθμηγράφων: (ΣΤ1) σταθμηγράφος Αβάτου (υψόμετρο θέσης: 8,6 m, χρονική περίοδος καταγραφής: 16/11/2000 – 02/10/2007), (ΣΤ2) σταθμηγράφος Βαφείκων (υψόμετρο θέσης: 19,5 m, χρονική περίοδος καταγραφής: 13/11/1996 – 15/12/2010), (ΣΤ3) σταθμηγράφος Νέας Κεσσάνης (υψόμετρο θέσης: 10,0 m, χρονική περίοδος καταγραφής: 15/3/1989 – 15/12/2010), τα δεδομένα των οποίων έχουν ληφθεί σοβαρά υπόψη στη διερεύνηση της συσχέτισης των τιμών βροχόπτωσης και των τιμών στάθμης του υπόγειου νερού (ΥΝ) των υπόγειων υδροφόρων συστημάτων των τριών περιοχών έρευνας του πεδινού τμήματος του Ν. Ξάνθης. Η εργασία περιέχει πρωτογενή υδρολογικά και υδρογεωλογικά στοιχεία, ενώ

αποτελεί την πρώτη απόπειρα αποσαφήνισης πιθανών επιπτώσεων της μεταβολής των βροχοπτώσεων σε υπόγεια υδροφόρα συστήματα του πεδινού τμήματος του Ν. Ξάνθης.



Σχήμα 1: Ο Νομός Ξάνθης, οι περιοχές έρευνας: 1. Περιοχή έρευνας στο ανατολικό τμήμα του Δέλτα του Ποταμού Νέστου, 2. Περιοχή έρευνας στα Βαφέικα, 3. Περιοχή έρευνας στον Πολύσιτο, και οι θέσεις των σταθμηγράφων: ΣΤ1: σταθμηγράφος Αβάτου, ΣΤ2: σταθμηγράφος Βαφέικων, ΣΤ3: σταθμηγράφος Νέας Κεσσάνης.

2. ΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ, ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Η ευρύτερη περιοχή των περιοχών έρευνας εντοπίζεται γεωλογικά στην τριτογενή ζώνη της Ροδόπης και σχεδόν ταυτίζεται με τα όρια του τριτογενούς βυθίσματος της λεκάνης Βιστωνίδας. Υπόβαθρο των υλικών του βυθίσματος της λεκάνης αποτελούν τα μεταμορφωμένα της ομόνυμης ζώνης που εμφανίζονται στη βόρεια ορεινή περιοχή. Το υπόβαθρο αυτό κλιμακώνεται από τα κράσπεδα της ορεινής ζώνης προς τον κάμπο και βρίσκεται σε αρκετά μεγάλο βάθος προς το κέντρο του κάμπου, που πλησιάζει κατά θέση τα 2000 m. Στην ευρύτερη πεδινή περιοχή του Ν. Ξάνθης διακρίνονται: (1) παλαιογενή ιζήματα αποτελούμενα από εναλλαγές κροκαλοπαγών-λατυποπαγών με αρκοζικούς ψαμμίτες ή με νομμουλιτικό ασβεστόλιθο ή από εναλλαγές ψαμμιτών, ιλύόλιθων και αργιλομαργαϊκών σχιστόλιθων, (2) Πλειο-πλειστοκαινικές αποθέσεις, που καλύπτουν επιφανειακά μικρή έκταση, εντοπίζονται κυρίως κάτω από τις πρόσφατες αποθέσεις και αποτελούνται από αδρομερή υλικά (λατύπες, κροκάλες, χαλίκια) διαφόρων μεγεθών καθώς και από λεπτόκοκκα κυρίως αργιλοϊλύουχα ή και αμμώδη, (3) πρόσφατες Τεταρτογενείς αποθέσεις, κατά μήκος της ευρύτερης κοίτης των αξόνων της επιφανειακής αποστράγγισης (επιφανειακά ρεύματα), αποτελούμενα από αδρομερή υλικά στα ανάντη τμήματα και όσο προσεγγίζουν τη λίμνη Βιστωνίδα γίνονται πιο λεπτομερείς μέχρι και ιλυοαργιλώδεις (Σακκάς κ.ά., 1998).

Τα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά των τριών επιμέρους περιοχών έρευνας του πεδινού τμήματος του Ν. Ξάνθης, μπορούν να συνοψισθούν στα ακόλουθα:

1. Στην πεδινή περιοχή του ανατολικού τμήματος του Δέλτα του Ποταμού Νέστου, οι αλλουβιακές αποθέσεις της περιοχής διακρίνονται ανάλογα με την υδρογεωλογική τους

συμπεριφορά, σε δύο ευδιάκριτες υδροαποθεματικές ζώνες, στα αβαθή μερικώς υπό πίεση υδροφόρα στρώματα, που εντοπίζονται μέχρι το βάθος των περίπου 30 m και στα επάλληλα υπό πίεση βαθιά, που φτάνουν σε βάθος τουλάχιστον μέχρι τα 190 m περίπου. Το πρώτο υδροφόρο σύστημα (αβαθής υδροφορία) δέχεται τροφοδοσία κυρίως από τις κατεισδύσεις από τις βροχοπτώσεις που πέφτουν στο ανάπτυγμά της περιοχής και ελάχιστα από τις διηθήσεις των επιφανειακών νερών της ανάντη λοφώδους περιοχής. Τα αβαθή υδροφόρα της περιοχής, κατά τις προηγούμενες δεκαετίες, αντλούνταν από ένα μεγάλο αριθμό αβαθών γεωτρήσεων μικρής διαμέτρου, βάθους μέχρι 15 m. Σήμερα ελάχιστες από αυτές λειτουργούν και έχουν αντικατασταθεί στην περιοχή του Δεκάρχου (Σχήμα 1) με βαθύτερες μέχρι 50 m. Το δεύτερο υδροφόρο σύστημα (βαθιά υδροφορία) τροφοδοτείται κύρια από τις διηθήσεις του Νέστου μέσα από παλαιογεωγραφικούς άξονες υπόγειας απορροής (παλιές κοίτες) και ένα μέρος από τις πλευρικές μεταγίσεις από τα υδροφόρα της παρακείμενης λεκάνης της Λιμνοθάλασσας Βιστωνίδας. Από προηγούμενη υδρογεωλογική έρευνα στην περιοχή (Pliakas et al., 2001, Σακκάς, et al., 1998) προέκυψαν τιμές του συντελεστή μεταβιβαστικότητα (T): $4,0 \times 10^{-4}$ - $1,1 \times 10^{-2}$ m²/sec, ενώ οι τιμές του συντελεστή υδροχωρητικότητα (S) κυμαίνονται στο 10^{-3} έως και μικρότερες κατά θέσεις, ενώ η διακύμανσή τους αντιστοιχεί σε υπό πίεση (κυρίως στα δυτικά της περιοχής) και κατά τύπους ημιελεύθερα υδροφόρα στρώματα. Από την επεξεργασία των σχετικών πιεζομετρικών χαρτών προκύπτει ότι η κύρια υπόγεια τροφοδοσία συντελείται κυρίως από τη βόρεια περιοχή και ειδικά στην περίπτωση του υπερκείμενου ελεύθερου υδροφόρου, κατά μήκος ενός άξονα υπόγειου εμπλουτισμού που διατρέχει το δυτικό όριο της περιοχής έρευνας. Στο τμήμα της περιοχής έρευνας που εμπλουτίζεται από τον Ποταμό Νέστο και την παρακείμενη αρδευτική τάφρο, τα νερά χαρακτηρίζονται από καλής έως αποδεκτής ποιότητας, ενώ στην υπόλοιπη περιοχή χαρακτηρίζονται από αμφίβολης έως ακατάλληλης ποιότητας. Με βάση τις τιμές του δείκτη Revelle (R) του υπόγειου υδροφόρου συστήματος της περιοχής έρευνας, το νερό στις βαθιές γεωτρήσεις χαρακτηρίζεται ελαφρά έως μέτρια ρυπασμένο από θαλάσσια διείσδυση (R=0,52-3,15), ενώ στις επιφανειακές γεωτρήσεις που γειτνιάζουν με τη θάλασσα χαρακτηρίζεται ελαφρά έως μέτρια ρυπασμένο (R=0,08-5,94) (Γκιουγκής, κ.ά., 2009).

2. Από τα υδρολογικά στοιχεία της ευρύτερης περιοχής των Βαφέικων Ξάνθης, προκύπτει ότι η μέση ετήσια διήθηση από τα νερά του Ποταμού Κόσυνθου (Σχήμα 1) στη ζώνη των αδρόκοκκων υλικών του ανέρχεται στα 30×10^6 m³ (Διαμαντής κ.ά., 1999, Σακκάς κ.ά., 1998). Το ποσόν της διήθησης των νερών του Κόσυνθου αποτελεί περίπου το 44,4% της συνολικής του απορροής που εξέρχεται από την ορεινή του λεκάνη (Σακκάς κ.ά., 1998). Η ποσότητα αυτή τροφοδοτεί βαθείς υπόγειους υδροφόρους νότια της κοίτης του Κόσυνθου. Τα υπόγεια υδροφόρα στρώματα της περιοχής ταξινομούνται σε δύο ευδιάκριτες ζώνες: (1) στα αβαθή μερικώς υπό πίεση υδροφόρα στρώματα (πρόσφατες αλλουβιακές αποθέσεις), που κατά θέσεις θεωρούνται ελεύθερα υδροφόρα στρώματα, αφού στην περιοχή των κοιτών εμφανίζονται στην επιφάνεια φθάνοντας μέχρι ένα βάθος περίπου 30 m, δεν είναι ενιαία σε όλο το βάθος τους αλλά εναλλάσσονται με άλλα λιγότερο περατά ή παρεμβάλλονται υπό μορφή φακών ιλυώδη ή αργιλώδη στρώματα, ενώ βυθίζονται προς τα νοτιοανατολικά ή τα ανατολικά κάτω από τα αργιλώδη ή ιλυώδη στρώματα και (2) στα επάλληλα υπό πίεση βαθιά υδροφόρα στρώματα (πλειοπλειστοκαινικές αποθέσεις), που φτάνουν σε βάθος μέχρι τα 150 m περίπου. Από τη μελέτη των διαγραμμάτων μεταβολής της στάθμης των γεωτρήσεων παρακολούθησης και των σχετικών πιεζομετρικών χαρτών της περιοχής Βαφέικων διαφαίνεται συνεχής πτώση της στάθμης κατά τα έτη 1999 έως και 2002, ενώ μετά το 2002 παρατηρείται άνοδος. Αξιοσημείωτη είναι η άνοδος στάθμης κατά τους

αντίστοιχους μήνες των επόμενων ετών και κυρίως το 2004, όπου σημειώθηκε διαφορά στάθμης με τον Απρίλιο του 2003 που κυμάνθηκε μέχρι και 5,0 m, ενώ κατά το έτος 2005 η αντίστοιχη διαφορά με το έτος 2004 ήταν της τάξης των 0,10 έως 1,0 m.

3. Από σχετικές έρευνες στην περιοχή έρευνας Πολυσίτου Ξάνθης (Σχήμα 1) (γεωλογική έρευνα, δεδομένα διάτρησης, γεωφυσικές έρευνες, κοκκομετρικές αναλύσεις, αντλητικές δοκιμές, χημικές αναλύσεις) προέκυψαν (Πλιάκας κ.ά., 1999, Pliakas et al., 2005): (1) τρεις κύριοι γεωλογικοί σχηματισμοί, ο ανώτερος σχηματισμός, πάχους 8-80 m, με αργιλοαμμώδη υλικά με εναλλαγές κατά θέσεις μικρού πάχους χαλικοαμμωδών, στο σύνολό τους μικρής περατότητας, ο ενδιάμεσος σχηματισμός, πάχους 10-70 m, υδροφόρος σχηματισμός με χαλικοαμμώδη υλικά μεγάλης περατότητας και ο τρίτος σχηματισμός, που αποτελεί το αδιαπέρατο αργιλοίλυδες υπόβαθρο σε βάθος 30-90 m, (2) τιμές της μεταβιβαστικότητα T : $1,05 \times 10^{-3}$ - $1,6 \times 10^{-2}$ m²/sec και τιμές του συντελεστή υδροχωρητικότητας S του μερικώς υπό πίεση υδροφόρου: $2,4 \times 10^{-4}$ - $8,75 \times 10^{-3}$. Από τη μελέτη των διαγραμμάτων μεταβολής της στάθμης των γεωτρήσεων της περιοχής Πολυσίτου και των σχετικών πιεζομετρικών χαρτών διαφαίνεται άνοδος στάθμης κατά τα έτη 1995 έως και 1997, με αξιοσημείωτη την άνοδο στάθμης κατά τους χειμερινούς μήνες 1996 - 1997, που πιθανόν οφείλεται στην ακραία τιμή βροχόπτωσης που σημειώθηκε την 1η/12/1996 με αποτέλεσμα τις μεγάλες πλημμύρες που σημειώθηκαν στο Ν. Ξάνθης. Στη συνέχεια ακολουθεί σχετικά μικρή πτώση από το 1998 έως το 2002 και από το 2003 έως το 2004 μία σημαντική άνοδος και μετά, μέχρι το 2005, σχετικά μικρή πτώση.

3. ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΙΣ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΙ

Επιχειρήθηκε μια πρώτη προσέγγιση στο ζήτημα της συσχέτισης των τιμών βροχόπτωσης και των τιμών του υψομέτρου στάθμης του υπόγειου νερού (ΥΝ) των υπόγειων υδροφόρων συστημάτων των τριών περιοχών έρευνας του πεδινού τμήματος του Ν. Ξάνθης.

Εξετάζεται καταρχάς η πορεία μεταβολής των τιμών του υψομέτρου της στάθμης του υπόγειου νερού (ΥΝ) κατά την περίοδο 1989-2010 (22 ετών). Επιλέχθηκαν ως μήνες μελέτης κυρίως οι μήνες Φεβρουάριος, Μάρτιος και Απρίλιος, περίοδος λίγο πριν την έναρξη της αρδευτικής περιόδου, όπου κύριος και καθοριστικός παράγοντας του υπόγειου υδατικού ισοζυγίου αποτελεί ο φυσικός εμπλουτισμός, που συντελείται με τη διαδικασία της κατεΐσδυσης μέρους των βροχοπτώσεων.

Αναλύοντας τα διαγράμματα και των τριών σταθμηγράφων ΣΤ1, ΣΤ2, ΣΤ3 (Σχήμα 1, Σχήματα 2, 3, 4), παρουσιάζονται οι ακόλουθες επιστημονικές και παρατηρήσεις σε σχέση με το υψόμετρο των διαφόρων τιμών στάθμης του ΥΝ:

- μείωση τιμών κατά τις περιόδους των ετών 1989-1990, 1993-1995, 1999-2003 και 2008-2009, με μια μέση διαφορά της τάξης των 1-2 m περίπου κατά περίπτωση,
- άνοδος τιμών κατά τις περιόδους των ετών 1991-1992, 1997-1999, 2004-2006, με την ίδια περίπου διαφορά 1-2 m περίπου κατά περίπτωση.

Επικεντρώνοντας στην ανάλυση των διαγραμμάτων που έχουν σχεδιαστεί με βάση τα δεδομένα του σταθμηγράφου της Ν. Κεσσάνης (Σχήμα 4), με τη μεγαλύτερη χρονική βάση, 1989-2010, διακρίνονται 3 χρονικές περιόδους Π1, Π2, Π3 σχετικά αυξημένων τιμών διακύμανσης του υψομέτρου της στάθμης του υπόγειου νερού (ΥΝ) (Πίνακας 1):

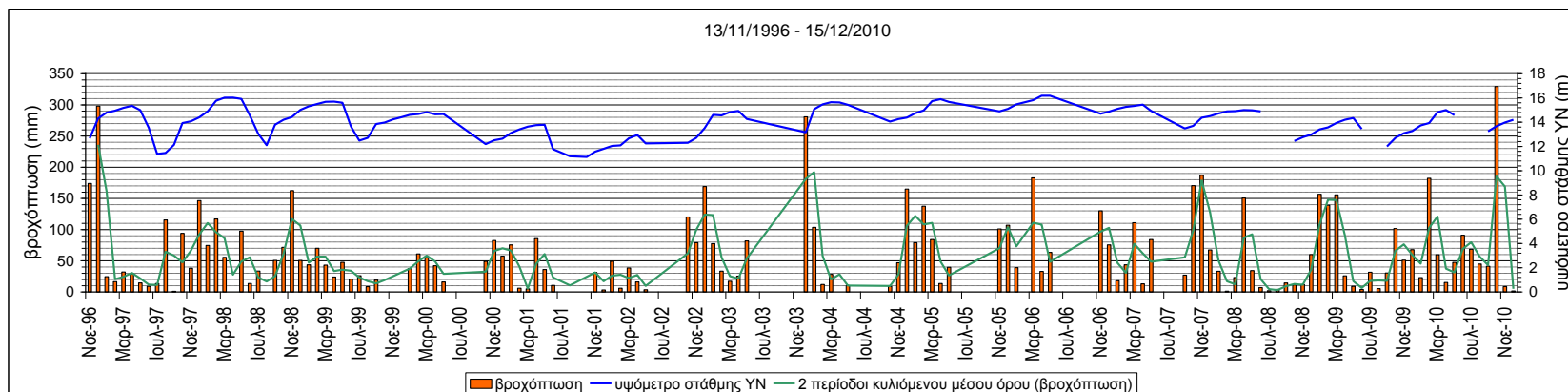
- Π1 περίοδος, κατά τα έτη 2005-2010, με τιμές μεγαλύτερες των 9,0 m περίπου,
- Π2 περίοδος, κατά τα έτη 1998-2000, με τιμές μεγαλύτερες των 7,0 m περίπου και με μια διαφορά περίπου 2 m από την 1^η περίοδο

- Π3 περίοδος, κατά τα έτη 1991-1992, με τιμές μεγαλύτερες των 6-6,5 m περίπου και με μια διαφορά περίπου 0,5-1 m από την 1^η περίοδο

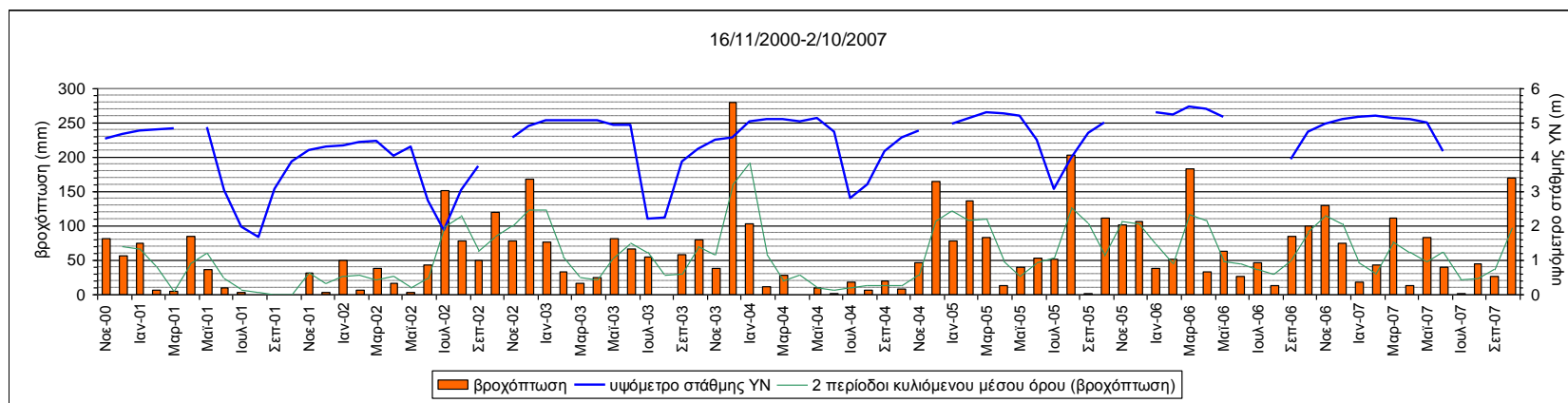
Πίνακας 1: Διάκριση των χρονικών περιόδων Π1, Π2, Π3 των ετών 1989-2010, με βάση τις αυξημένες τιμές διακύμανσης του υψομέτρου της στάθμης του υπόγειου νερού και οι αντίστοιχες τιμές (m) (Δαμιανίδης, 2011).

Π1		Π2		Π3	
Φεβ-05	7,64	Φεβ-98	7,39	Φεβ-91	7,32
Μαρ-05	8,75	Μαρ-98	7,93	Μαρ-91	7,55
Απρ-05	8,80	Απρ-98	7,97	Απρ-91	7,64
Φεβ-06	9,06	Φεβ-99	7,67	Φεβ-92	6,86
Μαρ-06	9,20	Μαρ-99	8,03	Μαρ-92	6,47
Απρ-06	9,70	Απρ-99	8,13	Απρ-92	6,92
Φεβ-07	8,94	Φεβ-00	6,92		
Μαρ-07	9,16	Μαρ-00	7,03		
Απρ-07	8,90	Απρ-00	7,39		
Φεβ-08	9,42				
Μαρ-08	9,41				
Απρ-08	9,59				
Φεβ-09	7,77				
Μαρ-09	8,52				
Απρ-09	8,94				
Φεβ-10	8,49				
Μαρ-10	9,25				
Απρ-10	9,24				

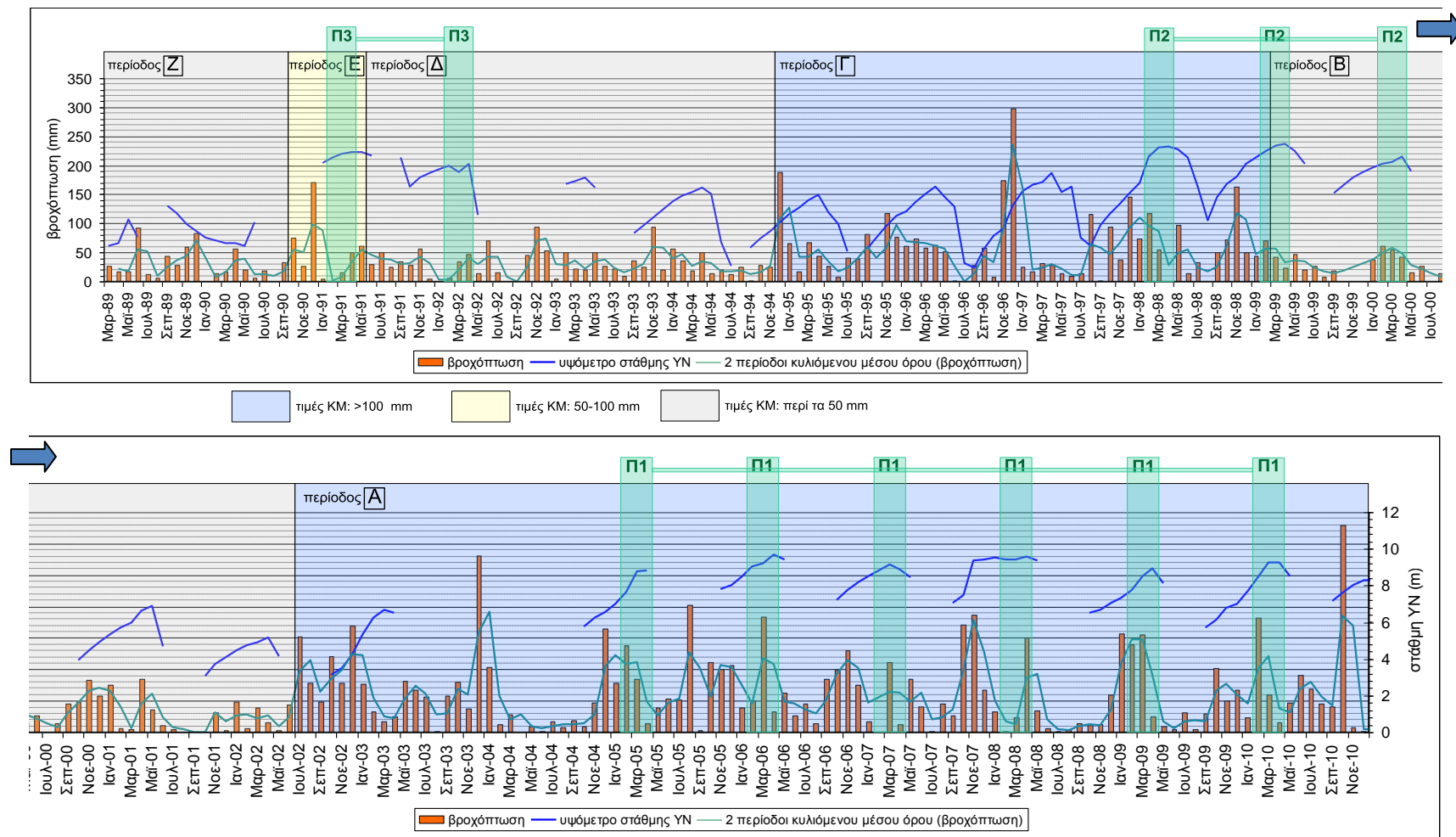
Στη συνέχεια παρουσιάζεται μια σχετική προσέγγιση στην ανάλυση βροχομετρικών δεδομένων κατά την περίοδο 1989-2010, όπως έχουν καταγραφεί στο μετεωρολογικό σταθμό Γεωργικής Έρευνας στη Γενισέα Ξάνθης (Σχήμα 1), για την περίοδο 1966 - 2001, και στο βροχομετρικό σταθμό του Τομέα Υδραυλικών Έργων του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Δ.Π.Θ., που έχει εγκατασταθεί στον ίδιο χώρο με τον προηγούμενο σταθμό, για την περίοδο 2001 - 2010 (Σχήματα 2, 3, 4). Από τη σχετική επεξεργασία προκύπτει μέση μηνιαία τιμή βροχόπτωσης 50,5 mm και μέση ετήσια τιμή βροχόπτωσης 628,7 mm για την ίδια χρονική περίοδο. Συγκεκριμένα, άξιες επισήμανσης αποτελούν οι ακραίες μηνιαίες τιμές βροχόπτωσης του Δεκεμβρίου του 1996: 298,0 mm, του 2003: 280,8 mm, του 2010: 329,4 mm. Αναφέρονται ενδεικτικά για σύγκριση αντίστοιχες μέσες μηνιαίες τιμές για το μήνα Δεκέμβριο της περιόδου 1989-2010: 102,3 mm, της περιόδου 2000-2010: 95,9 mm, της περιόδου 2005-2010: 63,2 mm.



Σχήμα 2: Ενιαίο διάγραμμα μεταβολής μηνιαίων τιμών βροχόπτωσης (από βροχομετρικό σταθμό Γενισέας)-κυλιόμενου μέσου όρου και τιμών του υψομέτρου στάθμης του υπόγειου νερού (από σταθμηγράφο Βαφέικων), περίοδος: 13/11/1996–15/12/2010 (υψόμετρο θέσης: 19,5 m) (Δαμιανίδης, 2011).



Σχήμα 3: Ενιαίο διάγραμμα μεταβολής μηνιαίων τιμών βροχόπτωσης (από βροχομετρικό σταθμό Γενισέας)-κυλιόμενου μέσου όρου και τιμών του υψομέτρου στάθμης του υπόγειου νερού (από σταθμηγράφο Αβάτου), περίοδος: 16/11/2000–2/10/2007 (υψόμετρο θέσης: 8,6 m) (Δαμιανίδης, 2011).



Σχήμα 4: Ενιαίο διάγραμμα μεταβολής μηνιαίων τιμών βροχόπτωσης (από βροχομετρικό σταθμό Γενισέας)-κυλιόμενου μέσου όρου και τιμών του υψόμετρου στάθμης του υπόγειου νερού (καταγραφή από σταθμηγράφο Ν. Κεσσάνης) για την περίοδο 15/3/1989–15/12/2010 (υψόμετρο θέσης: 10,0 m). Διάκριση χρονικών περιόδων Α, Β, Γ, Δ, Ε, Ζ, Π1, Π2, Π3 και χρωματική διαβάθμιση με βάση τις τιμές του κυλιόμενου μέσου όρου (ΚΜ) (Δαμανιδής, 2011).

Επίσης, άξίες επισήμανσης αποτελούν και οι τιμές των μέγιστων μηνιαίων τιμών βροχόπτωσης των θερινών μηνών, όπου οι τιμές τους ξεπερνούν τις αντίστοιχες μέσες μηνιαίες τιμές (μέση μηνιαία τιμή περιόδου 1989-2010, Ιούνιος: 30,5 mm, Ιούλιος: 30,8 mm, Αύγουστος: 32,1 mm), όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2: Μέγιστες μηνιαίες τιμές βροχόπτωσης θερινών μηνών (mm) (Δαμιανίδης, 2011).

Ιούνιος 1989	92,5	Ιούνιος 2003	67,0
Ιούλιος 1991	50,0	Ιούλιος 2003	55,8
Ιούνιος 1992	70,5	Ιούνιος 2005	53,5
Ιούλιος 1995	41,0	Ιούλιος 2005	52,0
Αύγουστος 1995	38,5	Αύγουστος 2005	203,0
Αύγουστος 1997	115,5	Ιούλιος 2006	46,0
Ιούνιος 2002	44,0	Ιούνιος 2010	91,0
Ιούλιος 2002	152,0	Ιούλιος 2010	68,4
Αύγουστος 2002	78,4	Αύγουστος 2010	44,8

Επικεντρώνοντας και πάλι στην ανάλυση των διαγραμμάτων που έχουν σχεδιαστεί με βάση τα δεδομένα του σταθμηγράφου της Ν. Κεσσάνης (Σχήμα 4) και των τιμών βροχόπτωσης από τον βροχομετρικό σταθμό Γενισέας, με τη μεγαλύτερη χρονική βάση, 1989-2010, διακρίνονται 6 χρονικές περίοδοι Α, Β, Γ, Δ, Ε, Ζ με βάση τις μέγιστες τιμές του κυλιόμενου μέσου όρου (ΚΜ), που αντιστοιχούν κυρίως στους χειμερινούς μήνες κάθε έτους (Πίνακας 3, Σχήμα 4).

Πίνακας 3: Διάκριση των χρονικών περιόδων Α, Β, Γ, Δ, Ε, Ζ βροχόπτωσης των ετών 1989-2010, με βάση τις μέγιστες τιμές του κυλιόμενου μέσου όρου (ΚΜ) (Δαμιανίδης, 2011).

Χρονική περίοδος		Μέγιστες τιμές μέσου κυλιόμενου (ΚΜ) (mm)
A	Ιούλιος 2002 - Δεκέμβριος 2010	> 100 (κατά τα έτη 2004, 2007, 2010: ΚΜ>150)
B	Μάρτιος 1999 - Ιούνιος 2002	~ 50
Γ	Δεκέμβριος 1994 – Φεβρουάριος 1999	> 100
Δ	Ιούνιος 1991 – Νοέμβριος 1994	~ 50
Ε	Οκτώβριος 1990 – Μάιος 1991	50-100
Z	Μάρτιος 1989 – Σεπτέμβριος 1990	~ 50

Συνδυάζοντας τα στοιχεία των Πινάκων 1 και 3, όπως και των διαγραμμάτων των Σχημάτων 2, 3, 4, προκύπτει μια πρώτη εκτίμηση για την πιθανή επιρροή των βροχοπτώσεων στη διακύμανση του υψομέτρου της στάθμης του υπόγειου νερού στις περιοχές έρευνας, αφού και οι τρεις περιοχές παρουσιάζουν σχετικά ίδια γεωμορφολογικά, γεωλογικά και υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά, όπως έχει αναπτυχθεί σε προηγούμενες παραγράφους.

Γενικά παρατηρείται ότι σημαντικό τμήμα της διακύμανσης στάθμης φαίνεται να οφείλεται στις μεταβολές του φυσικού εμπλουτισμού των υπόγειων νερών (ΥΝ) της περιοχής εξαιτίας των αυξημένων τιμών βροχόπτωσης των αντίστοιχων χρονικών περιόδων του Πίνακα 3 και του Σχήματος 4. Ειδικότερα διαφαίνεται ότι:

- η Π1 περίοδος υψηλών τιμών διακύμανσης στάθμης του ΥΝ να εμφανίζεται κατά τη διάρκεια της περιόδου Α, από το 2005 και μετά, καταδεικνύοντας ήδη μια αυξητική πορεία από την έναρξη της περιόδου Α,

- η Π2 περίοδος υψηλών τιμών διακύμανσης στάθμης του ΥΝ να εμφανίζεται κατά τη διάρκεια της περιόδου Γ, από το 2008 και μετά,
- η Π3 περίοδος υψηλών τιμών διακύμανσης στάθμης του ΥΝ να εμφανίζεται κατά τη διάρκεια της περιόδου Ε, από το 2001 και μετά.

Προτείνεται για την επιβεβαίωση ή την κριτική αξιολόγηση των παραπάνω διαπιστώσεων, η περαιτέρω διερεύνηση σε επόμενο βήμα συνέχισης της έρευνας συσχέτισης βροχοπτώσεων και τιμών μεταβολής της στάθμης του υπόγειου νερού στις περιοχές έρευνας λαμβάνοντας υπόψη ανάλογες εφαρμογές από τη διεθνή βιβλιογραφία με μαθηματικές και στατιστικές προσεγγίσεις κατά περίπτωση (Gardner and Heilweil, 2009, Ghanbari and Bravo, 2011, Hanell, 2011).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Bates, B.C., Kundzewicz, Z.W., Wu, S., and Palutikof, J.P., 2008. *Climate change and water: Technical paper VI of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), IPCC Secretariat*, Geneva, 210p.
- Chen, Zhouheng, Grasby, S.E., and Osadetz, K.G., 2004. *Relation between climate variability and groundwater levels in the upper carbonate aquifer, southern Manitoba, Canada*. Journal of Hydrology, v. 290, no. 1–2, pp. 43–62.
- Δαμιανίδης, Π., 2011. *Κλιματική αλλαγή και υπόγειοι υδατικοί πόροι. Η περίπτωση του πεδινού τμήματος του Ν. Ξάνθης*. Μεταπτυχιακή Διατριβή, ΠΜΣ: Υδραυλική Μηχανική, Τομέας Υδραυλικών Έργων, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δ.Π.Θ., Ξάνθη, 111σελ.
- Δάνδολος, Η., Παπαθανασίου, Κ., Γιωτάκης, Κ., Σαμπατακάκης, Π., Παπαστεργίου, Κ., 2008. *Ο ρόλος και ο αρμοδιότητες της αυτοδιοίκησης στη διαχείριση και προστασία υδατικών πόρων*. Ινστιτούτο Τοπικής Αυτοδιοίκησης. Μάιος 2008, Αθήνα.
- Διαμαντής, Ι., Πλιάκας, Φ., και Πεταλάς, Χ., 1999. *Εφαρμογή τεχνητού εμπλουτισμού υπόγειου υδροφορέα της περιοχής Βαφείκων του Νομού Ξάνθης*. Πρακτικά 5^{ου} Υδρογεωλογικού Συνεδρίου της Ελληνικής Επιτροπής Υδρογεωλογίας και του Συνδέσμου Γεωλόγων και Μεταλλειολόγων Κύπρου, 12-14/11/1999, Λευκωσία, Κύπρος, σελ. 81-96.
- Επιτροπή Μελέτης Επιπτώσεων Κλιματικής Αλλαγής (ΕΜΕΚΑ), 2011. *Οι περιβαλλοντικές, οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στην Ελλάδα*. 546σελ. Ιούνιος 2011, Έκδοση Τράπεζας της Ελλάδος, Αθήνα.
- Gardner, P., Heilweil, V., 2009. *Evaluation of the Effects of Precipitation on Groundwater Levels from Wells in Selected Alluvial Aquifers in Utah and Arizona, 1936–2005*. U.S. Geological Survey, Scientific Investigations Report 2008–5242, 38p.
- Ghanbari, R.N., Bravo, H., 2011. *Evaluation of correlations between precipitation, groundwater fluctuations, and lake level fluctuations using spectral methods (Wisconsin, USA)*. Hydrogeology Journal 19, pp. 801–810.
- Γκιουγκής, Ι., Πλιάκας, Φ., και Διαμαντής, Ι., 2009. *Διερεύνηση της ποιοτικής υποβάθμισης υπόγειου υδροφόρου συστήματος του Ανατολικού Δέλτα του Ποταμού Νέστου*. Πρακτικά Κοινού Συνεδρίου, 11^{ου} της Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης (ΕΥΕ) και 7^{ου} της Ελληνικής Επιτροπής Διαχείρισης Υδατικών Πόρων (ΕΕΔΥΠ) με θέμα: Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Πόρων σε Συνθήκες Κλιματικών Αλλαγών. Βόλος, 27-30/5/2009, σελ. 107-114.
- Green, T.R., Bates, B.C., Charles, S.P., and Fleming, P.M., 2007a. *Physically based simulation of potential effects of carbon dioxide-Altered climates on groundwater recharge*. Vadose Zone Journal, v. 6, no. 3, pp. 597–609.

- Green, T.R., Taniguchi, M., and Kooi, H., 2007b. *Potential impacts of climate change and human activity on subsurface water resources*. Vadose Zone Journal, v. 6, no. 3, pp. 531–532.
- Hanell, C., 2011. *Groundwater response to precipitation events, Kalaloch, Olympic Peninsula, Washington*. Master's Thesis, Western Washington University, USA, 126p.
- Hanson, R.T., Newhouse, M.W., Dettinger, M.D., 2004. *A methodology to assess relations between climatic variability and variations in hydrologic time series in the southwestern United States*. Journal of Hydrology, v. 287, no. 1–4, pp. 252–269
- Holman, I.P., 2006. *Climate change impacts on ground-water recharge-Uncertainty, shortcomings, and the way forward?*. Hydrogeology Journal, v. 14, no. 5, pp. 637–647.
- Loáiciga, H.A., Valdes, J.B., Vogel, R., Garvey, J., Schwartz, H., 1996. *Global warming and the hydrologic cycle*. Journal of Hydrology, v. 174, no. 1–2, pp. 83–127.
- Milly, P.C.D., Dunne, K.A., and Vecchia, A.V., 2005. *Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate*. Nature 438(7066), pp. 347–350.
- Πλιάκας, Φ., Διαμαντής, Ι., και Πεταλάς, Χ., 1999. *Αποτέλεσμα από την εφαρμογή τεχνητού εμπλουτισμού υπόγειου υδροφορέα της περιοχής Πολυσίτου του Νομού Ξάνθης με τη μέθοδο επανενεργοποίησης παλιών αδρανοποιημένων κοιτών*. Πρακτικά 5^{ου} Υδρογεωλογικού Συνεδρίου της Ελληνικής Επιτροπής Υδρογεωλογίας και του Συνδέσμου Γεωλόγων και Μεταλλειολόγων Κύπρου, 12-14/11/1999, Λευκωσία, Κύπρος, σελ. 97-113.
- Pliakas, F., Diamantis, I., and Petalas, C., 2001. *Saline water intrusion and groundwater artificial recharge in east delta of Nestos river*. Proceedings of the 7th International Conference on Environmental Science and Technology, University of the Aegean, Dept. of Environmental Studies, and Global Nest, Ermoupolis, Syros, Greece, 3-6/9/2001, Vol. 2, pp. 719-726.
- Pliakas, F., Petalas, C., Diamantis, I., and A. Kallioras, 2005. *Modeling of groundwater artificial recharge by reactivating an on old stream bed*. Water Resources Management, International, Journal published for the European Water Resources Association (EWRA), 19(3), pp. 279-294.
- Σακκάς, Ι., Διαμαντής, Ι., Πλιάκας, Φ., κ.ά., 1998. *Μελέτη τεχνητού εμπλουτισμού υδροφορέων Ξάνθης - Ροδόπης*. Ερευνητική Έκθεση για λογαριασμό του Υπουργείου Γεωργίας, Τομείς Υδραυλικών Έργων και Γεωτεχνικής Μηχανικής, Δ.Π.Θ., τεύχη 5, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Δ.Π.Θ., Ξάνθη.
- Sherif, M.M., and Singh, V.P., 1999. *Effect of climate changes on seawater intrusion in coastal aquifers*. Hydrologic Processes, v. 13, no. 8, pp. 1277–1287.
- U.S. Geological Survey (USGS), 2009. *Effects of Climate Variability and Change on Groundwater Resources of the United States*. U.S. Department of the Interior, Fact Sheet 2009–3074, September 2009, USA.
- Warner, S.D., 2007. *Climate change, sustainability, and ground water remediation—The connection*. Ground Water Monitoring and Remediation, v. 27, no. 4, pp. 50–52.

**ΣΥΣΤΗΜΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΣΧΕΔΙΟΥ
ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ
ΤΟΥ Π. ΚΟΜΨΑΤΟΥ, Ν. ΡΟΔΟΠΗΣ
Κ. Μιμίδης, Φ. Πλιάκας, Α. Πεχτελίδης, Ι. Διαμαντής**

Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας, Τομέας Γεωτεχνικής Μηχανικής,
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών,
Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, 67100 Ξάνθη

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία προσεγγίζεται υπό το πρίσμα της συστημικής μεθοδολογίας και σύμφωνα με την οδηγία 60/2000/ΕΚ, ένα ολοκληρωμένο σχέδιο διαχείρισης του υδατικού δυναμικού της λεκάνης απορροής του Ποταμού Κομψάτου, στο Ν. Ροδόπης, και οι επιπτώσεις που θα επακολουθήσουν ύστερα από την εφαρμογή ενός πλαισίου δράσης. Η προσέγγιση αφορά στην καταγραφή και την αλληλεπίδραση όλων των παραγόντων που υπεισέρχονται κατά τη σύνταξη του σχεδίου στοχεύοντας στην επίτευξη μιας ορθολογικής διαχείρισης λαμβάνοντας υπόψη την αλληλεπίδραση του Ποταμού Κομψάτου με τη λιμνοθάλασσα της Βιστωνίδας και του υπόγειου υδροφόρου συστήματος, όπως και τις κοινωνικές ωφέλειες ή συνέπειες από την κατασκευή φράγματος στον ποταμό, τα περιβαλλοντικά οφέλη ή επιπτώσεις στις προστατευόμενες από το δίκτυο NATURA περιοχές, αλλά και την αξία αναβάθμισης του βιοτικού επιπέδου των κατοίκων.

**SYSTEMS APPROACH TO INTERGRADED MANAGEMENT
PLAN OF R. KOMPSATOS BASIN AT RHODOPE PREFECTURE
K. Mimidis, F. Pliakas, A. Pechtelidis, I. Diamantis**

Laboratory of Engineering Geology, Section of Geotechnical Engineering,
Department of Civil Engineering,
Democritus University of Thrace, 67100 Xanthi

ABSTRACT

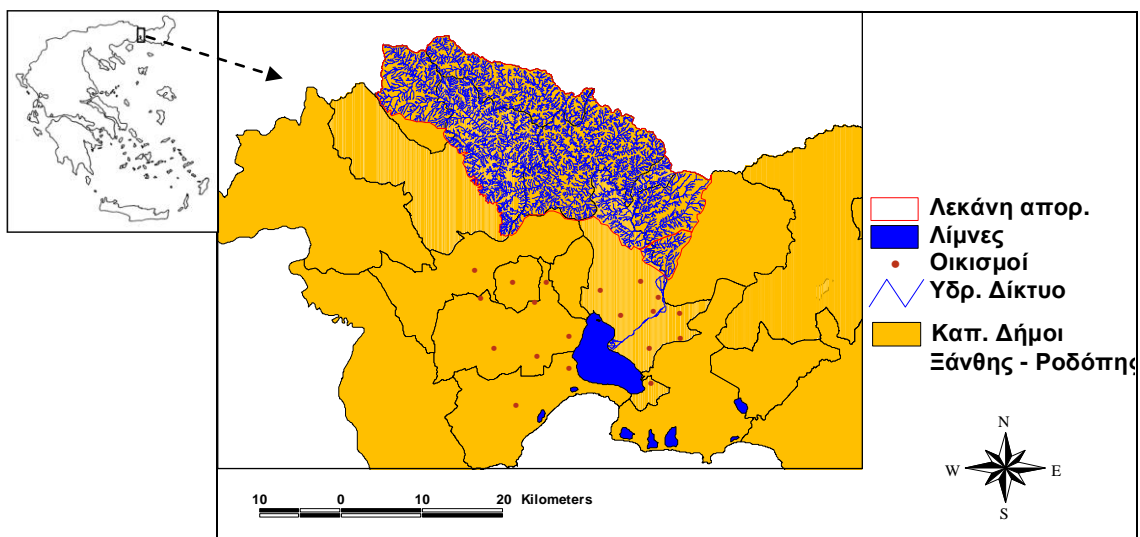
This paper approaches, in the view of the systems theory and in accordance with Directive 60/2000/EU, an intergraded management plan of the water potential of R. Kompsatos basin at Rhodope Prefecture, and the effects that will follow the implementation of an action framework. This approach concerns the record and the interplay of all the factors involved, in drafting the plan aiming at achieving a rational management taking in account the interaction of R. Kompsatos with the Vistonida Lagoon and the underlying aquifer system, as well as the social benefits or impact of a dam constructed in the river, the environmental benefits or impacts on the protected network NATURA areas, and the value of upgrading the living standards.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η προσέγγιση ενός ολοκληρωμένου σχεδίου διαχείρισης (ΕΜΠ-Υπουργείο Ανάπτυξης, 2003, Biswas, 1976) του υδατικού δυναμικού της λεκάνης απορροής του Ποταμού Κομψάτου στο Ν. Ροδόπης, και οι επιπτώσεις που θα επακολουθήσουν ύστερα από την εφαρμογή ενός σχεδίου δράσης, μέσα από τη συστηματική μεθοδολογία (Μιμίδης, 2006), αφορά την καταγραφή και την αλληλεπίδραση όλων των παραγόντων που υπεισέρχονται κατά τη σύνταξη του σχεδίου στοχεύοντας στην επίτευξη μιας ορθολογικής πολιτικής διαχείρισης για την περιοχή ενδιαφέροντος (Βελεγράκη, 2003, Μιμίδης, 2006). Η περιοχή μελέτης ανήκει στο γεωγραφικό διαμέρισμα της Θράκης και βρίσκεται μεταξύ των νομών Ξάνθης και Ροδόπης όπως απεικονίζεται στο σχήμα 1.

Μια ορθολογική πολιτική διαχείριση (Isaac, 1967), αποδεκτή από το κοινωνικό σύνολο, αποτελείται από ποσοτικοποιήσιμα και μη μεγέθη κάνοντας κατά αυτό τον τρόπο την έννοια της ανάλυσης των τελευταίων, ιδιαίτερα δυσχερή. Και αυτό γιατί, στην περίπτωση του Ποταμού Κομψάτου και της αλληλεπίδρασης που υπάρχει με τη λιμνοθάλασσα της Βιστωνίδας και του υπόγειου υδροφόρου συστήματος, δεν καθίσταται εφικτή η πλήρης ποσοτικοποίηση της αξίας του οικοσυστήματος σε οικονομικές μονάδες. Δυσχερής είναι επίσης, ο υπολογισμός και των κοινωνικών ωφελειών ή συνεπειών από την κατασκευή φράγματος στον Κομψάτο, λύση η οποία μελετήθηκε στο παρελθόν (Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε., 1967) και συνυπολογίστηκε στη συγκεκριμένη ανάλυση (Μιμίδης, 2006), κατά τη φάση του σχεδιασμού.

Το είδος του σχεδιασμού για τη διαχείριση του υδατικού συστήματος του Ποταμού Κομψάτου, περιλαμβάνει ένα πλήθος μαθηματικών συναρτήσεων και περιορισμών ανάλογα με την τελική επιδίωξη (που αφορά τους στόχους που έχουν τεθεί), καθορίζοντας και συγκρίνοντας εναλλακτικές μορφές σχεδιασμού (ως προς το είδος, αλλά και ως προς το χρόνο υλοποίησης). Τα οικονομικά οφέλη και η κατανομή αυτών, είναι δύο ποσοτικοποιήσιμες παράμετροι που υπεισέρχονται στην ανάλυση του προβλήματος. Άλλες παράμετροι, όπως τα περιβαλλοντικά οφέλη ή επιπτώσεις, αλλά και η αξία αναβάθμισης του βιοτικού επιπέδου των κατοίκων, δεν είναι δυνατόν να εκφραστούν πλήρως σε οικονομικές μονάδες.



Σχήμα 1: Περιοχή μελέτης

Με βάση τη συστηματική προσέγγιση η επιλογή των κατάλληλων παραμέτρων κατά την εξέταση και αξιολόγηση του υδατικού συστήματος του Κομψάτου, οφείλει να ανταποκρίνεται πλήρως στην επίτευξη των στόχων που έχουν τεθεί. Αυτό σημαίνει ότι για υψηλές επενδύσεις, οφείλεται να ληφθεί υπόψη ένα σύνολο παραμέτρων οι οποίες

αυξάνουν το βαθμό πολυπλοκότητας του προβλήματος και της διαδικασίας λήψης απόφασης, με αποτέλεσμα να απαιτούνται κατά αυτό τον τρόπο, περισσότερα διαχειριστικά εργαλεία και επιπρόσθετος χρόνος ανάλυσης. Αντίθετα, ένας βραχυπρόθεσμος σχεδιασμός, εξετάζει απλά τρόπους αντιμετώπισης προβλημάτων διαχείρισης νερού που απευθύνονται κατά κύριο λόγο στη βελτίωση των ήδη υφιστάμενων υποδομών και όχι στο σχεδιασμό και την ανάπτυξη νέων.

Για το συγκεκριμένο σχεδιασμό, οι παράμετροι που υπεισέρχονται κατά τη διαδικασία λήψης μιας απόφασης είναι λιγότερες από ό,τι σε τέτοιες περιπτώσεις όπως επίσης και το κόστος της επένδυσης είναι αρκετά χαμηλότερο. Η διαπίστωση ότι η τελική μορφή του διαχειριστικού σχεδίου, εξαρτάται τόσο από το είδος της ανάγκης, όσο και από το χρονικό ορίζοντα σχεδιασμού, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η έννοια του χρονικού ορίζοντα (βραχυπρόθεσμος ή μακροπρόθεσμος σχεδιασμός) κρίνει ποιες παράμετροι ουσιαστικά θα ληφθούν υπόψη. Ως εκ τούτου, κατά τη διαχείριση των υδατικών πόρων μέσα από ένα ολοκληρωμένο και ορθολογικό σχέδιο, ο χρονικός ορίζοντας σχεδιασμού ποικίλλει ανάλογα με τα διαθέσιμα μέσα (κυρίως εξεύρεση οικονομικών πόρων, αλλά και δυνατότητα εκτίμησης ορισμένων παραμέτρων, μέσω μοντελοποίησης). Δηλαδή, η ανάγκη μπορεί να έχει πλήρως διατυπωθεί, αλλά να μην επαρκούν οι διαθέσιμοι πόροι (κυρίως οικονομικοί) για την επίτευξη κάποιας λύσης, θέτοντας με αυτό τον τρόπο φραγμούς στο είδος του αρχικού σχεδιασμού και άρα στην επιλογή της βέλτιστης εφαρμόσιμης λύσης. Σύμφωνα με τα παραπάνω, ένας βραχυπρόθεσμος σχεδιασμός περιορίζει την υλοποίηση κάποιων δραστηριοτήτων που εμπεριέχονται στο διαχειριστικό σχέδιο (καθιστώντας αυτές ουσιαστικά μη εφαρμόσιμες), ενώ ένας μακροπρόθεσμος σχεδιασμός, όπως αναφέρεται στη συνέχεια, περιλαμβάνει πιο αναβαθμισμένες δραστηριότητες (και κατ' επέκταση μεγαλύτερη πολυπλοκότητα) κατά την υλοποίησή τους. Οι διαφορές μεταξύ βραχυπρόθεσμου και μακροπρόθεσμου σχεδιασμού, για την περιοχή που εξετάστηκε, παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1: Σύγκριση μακροπρόθεσμου και βραχυπρόθεσμου σχεδιασμού

Σχεδιασμός διαχείρισης λεκάνης απορροής Π. Κομψάτου		
Δραστηριότητα	Μακροπρόθεσμο	Βραχυπρόθεσμο
Κατασκευή μεγάλων τεχνικών έργων	Εμπεριέχεται	Δεν εμπεριέχεται
Κατασκευή μικρών τεχνικών έργων	Εμπεριέχεται	Εμπεριέχεται
Κατασκευή υποδομών στην ευρύτερη περιοχή	Εμπεριέχεται	Δεν εμπεριέχεται
Αναδάσμος γης	Εμπεριέχεται	Δεν εμπεριέχεται
Βελτίωση υφιστάμενων υποδομών	Εμπεριέχεται	Εμπεριέχεται
Κοινωνικά οφέλη	Αρκετά	Ελάχιστα
Περιβαλλοντικά οφέλη / επιπτώσεις	Αρκετά	Ελάχιστα
Εναρμόνιση με την οδηγία 2000/60/Ε.Κ.	Εμπεριέχεται	Δεν εμπεριέχεται
Σύγχρονοι τρόποι καλλιέργειας	Εμπεριέχεται	Εμπεριέχεται
Εναρμόνιση με τη νέα Κ.Α.Π.*	Εμπεριέχεται	Δεν εμπεριέχεται
Οικονομικό κόστος	Υψηλό	Χαμηλό
Παράμετροι σχεδιασμού	Πολλές	Λίγες
Παρατηρήσεις, ανάπτυξη μοντέλων διαχείρισης	Απαραίτητη	Μη απαραίτητη
Ενημέρωση	Απαραίτητη	Μη απαραίτητη

*Κοινή Αγροτική Πολιτική - Πηγή: Μιμίδης Κ., 2006.

Στον μακροπρόθεσμο σχεδιασμό της περιοχής εμπεριέχεται ένα πλαίσιο στόχων που αφορούν: α) την αναβάθμιση της ποιότητας του περιβάλλοντος, β) την ορθολογική διαχείριση της λεκάνης απορροής του ποταμού που θα δικαιολογεί τις υψηλές επενδύσεις σε τεχνικά έργα, γ) τη θέσπιση μιας ορθής τιμολόγησης του αρδευτικού

νερού, κατά κύριο λόγο, με ταυτόχρονη αύξηση του αγροτικού εισοδήματος και σωστή ενημέρωση σε νέες μεθόδους καλλιέργειας, δ) την αύξηση του κατά κεφαλήν Α.Ε.Π. και σύγκλιση με αυτού της υπόλοιπης Ελλάδας, ε) τη δημιουργία νέων θέσεων εργασίας, στ) την απορρόφηση κοινοτικών κονδυλίων. Ένας μακροπρόθεσμος σχεδιασμός και οι αντίστοιχες οικονομικές, κοινωνικές, περιβαλλοντικές συνέπειες (θετικές ή αρνητικές), εμπεριέχει πιθανές αλλαγές στο τοπογραφικό ανάγλυφο (κατασκευή φράγματος), αλλά και επενδύσεις υποδομής γενικά στην ευρύτερη περιοχή. Για τις αρνητικές επιπτώσεις στο φυσικό περιβάλλον, λαμβάνεται υπόψη το οικονομικό κόστος αναφορικά με τη διαθέσιμη τεχνολογία αποκατάστασης περιβαλλοντικών ζημιών κατά την εφαρμογή κάποιου διαχειριστικού σχεδίου. Είναι σαφές ότι όσο η πολυπλοκότητα του διαχειριστικού σχεδίου αυξάνει, τόσο πιο μεγάλη είναι η αβεβαιότητα ως προς τις αρνητικές επιπτώσεις και το κόστος αποκατάστασης αυτών.

Η εφαρμογή σύγχρονων τρόπων καλλιέργειας που εμπεριέχονται τόσο στο μακροπρόθεσμο, όσο και στο βραχυπρόθεσμο σχεδιασμό, έχει ως στόχο μεταξύ άλλων την παρουσίαση ενός σχεδίου κάλυψης των αρδευτικών αναγκών των καλλιεργειών στο οποίο πρέπει να ληφθούν υπόψη ένα σύνολο παραγόντων, οι οποίοι αφορούν: α) στη μελέτη της υφιστάμενης κατάστασης στο καθεστώς άρδευσης και στις παρεμβάσεις που πρέπει να γίνουν για εξοικονόμηση ύδατος, β) στην απορρόφηση των αγροτικών προϊόντων, γ) στη Κ.Α.Π., δ) στη μεγιστοποίηση του κέρδους του αγρότη, ε) στην εφαρμογή μιας οικονομικά συμφέρουσας για τον αγρότη τιμολογιακής πολιτικής για το νερό βάσει της οδηγίας 2000/60Ε.Κ., στ) στην ορθή διαχείριση των οικονομικών συντελεστών, ζ) στις δυνατότητες μεταποίησης και εξαγωγικού εμπορίου.

Απώτερος σκοπός μέσα από την ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου σχεδίου διαχείρισης της λεκάνης απορροής του ποταμού Κομψάτου, είναι η κάλυψη των μελλοντικών αναγκών σε νερό πρωταρχικά για άρδευση και εν συνεχεία για ύδρευση σε εναρμόνιση με την οδηγία 2000/60/Ε.Κ., που θέτει και την περιβαλλοντική διάσταση της διαχείρισης, σε συνδυασμό με την κοινωνικοοικονομική ανάπτυξη της περιοχής.

Η αυξανόμενη ζήτηση σε νερό, η υπερεκμετάλλευση του υπόγειου υδατικού δυναμικού και η περιορισμένη εκμετάλλευση του επιφανειακού νερού οδηγούν στη διαπίστωση της αναγκαιότητας ύπαρξης ενός ολοκληρωμένου σχεδίου κάλυψης των μελλοντικών κατά κύριο λόγο αναγκών, που αποσκοπεί ουσιαστικά στην αύξηση της εκμετάλλευσης των επιφανειακών υδατικών πόρων και στη μείωση της απόληψης των υπόγειων νερών.

Το συμπέρασμα με βάση μελέτες που έχουν γίνει στο παρελθόν, είναι ότι το υδατικό διαμέρισμα της Θράκης θα αντιμετωπίσει μελλοντικά πρόβλημα επάρκειας νερού κυρίως στην πεδιάδα της Κομοτηνής (Πεταλάς κ.ά., 2000). Η κατασκευή φράγματος στον ποταμό Κομψάτο, μέσα από την καθιέρωση μιας ορθολογικής πολιτικής διαχείρισης του νερού, μπορεί να αποτελέσει λύση στο πρόβλημα εξασφάλισης νερού στο μέλλον. Είναι παραδεκτό (οδηγία 2000/60/Ε.Κ.) ότι, οι πόροι που είναι δυνατό να αξιοποιηθούν μελλοντικά είναι τα επιφανειακά νερά με την κατασκευή ταμιευτήρα, δεδομένου ότι τα υπόγεια νερά πλησιάζουν σε οριακό σημείο εκμετάλλευσης τόσο από τη συνεχή κάλυψη των αναγκών, όσο και από το γεγονός ότι λιγότερο νερό κατεισδύει στους υπόγειους υδροφορείς (Ε.Μ.Π. – Υπουργείο Ανάπτυξης, 2003). Και αυτό γιατί, αν και οι βροχοπτώσεις παρουσιάζουν μια χρονική σταθερότητα με ελάχιστη φθίνουσα πορεία, εν τούτοις η έντασή τους είναι μεγαλύτερη γεγονός που ευνοεί την επιφανειακή απορροή.

Στην εργασία γίνεται μια σοβαρά τεκμηριωμένη προσπάθεια συγκρότησης διαχειριστικών σχεδίων με βάση τη συστηματική μεθοδολογία, που αφορούν σε σενάρια αξιοποίησης του υδατικού δυναμικού του Ποταμού Κομψάτου, σύμφωνα με το πνεύμα

και τις απαιτήσεις της οδηγίας 60/2000/ΕΚ, τα οποία σενάρια μπορούν να αποτελέσουν τη βάση για απορρόφηση κονδυλίων.

2. ΣΥΣΤΗΜΙΚΗ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ

Η λεκάνη απορροής ενός υδατορεύματος, μπορεί να θεωρηθεί ως ένα αυτοτελές σύστημα. Για αυτό το λόγο και μια λεκάνη απορροής αποτελεί αντικείμενο πολλών παρατηρήσεων, η μελέτη της χρονοσειράς των οποίων οδηγεί σε συμπεράσματα σχετικά με την απόκριση και λειτουργία της λεκάνης (π.χ. σχέσεις μεταξύ βροχόπτωσης-απορροής, βροχόπτωσης-μεταφοράς φερτών υλικών, κ.α.). Η οδηγία 2000/60/Ε.Κ. δομήθηκε με βάση το συγκεκριμένο σκεπτικό, παρέχοντας στα κράτη μέλη τη δυνατότητα μιας συστημικής προσέγγισης διαχείρισης της λεκάνης απορροής, σε συνδυασμό με τον καθορισμό των αναγκών και τη μετέπειτα λήψη μέτρων ορθολογικής διαχείρισης των υδατικών πόρων όπως αποδεικνύεται και από το άρθρο 3 παράρτημα VII της οδηγίας. Η διαχείριση αφορά στο σύνολό της τη δημιουργία εννοιολογικών μοντέλων, με στόχο τη μελέτη απόκρισης της λεκάνης απορροής που ενδέχεται να οδηγήσει στη μετέπειτα κατασκευή και λειτουργία έργων. Στη συγκεκριμένη ανάλυση, ένα ολοκληρωμένο σχέδιο διαχείρισης της λεκάνης απορροής, ορίζεται ως η διαδικασία υλοποίησης των πληροφοριών που απορρέουν από την επεξεργασία των παρατηρήσεων, σε δράση.

2.1. ΟΡΙΟΘΕΤΗΣΗ ΤΗΣ ΑΝΑΓΚΗΣ

Πρόκειται ουσιαστικά για το πρώτο βήμα στοιχειοθέτησης του προβλήματος (Παναγιωτακόπουλος, 2001), το οποίο περιλαμβάνει την καταγραφή της υφιστάμενης κατάστασης σε αντιπαράθεση με την αντίστοιχη επιθυμητή, όπως αυτή καθορίζεται για την περιοχή μελέτης. Πιο αναλυτικά:

➤ Υφιστάμενη κατάσταση

- Κάλυψη των αναγκών σε νερό από γεωτρήσεις που έχει ως συνέπεια την υπερεκμετάλλευση των αποθεμάτων και την υφαλμύριση των υπόγειων νερών, ειδικά στις παράκτιες περιοχές (η διείσδυση της αλμυρής σφήνας, ενδέχεται να συνεχιστεί στο μέλλον). Η εφαρμογή του αρδευτικού νερού γίνεται με μεθόδους που έχουν μέσο συντελεστή απόδοσης (καταιονισμός) (Τερζίδης και Παπαζαφειρίου, 1987).
- Μη ορθολογική χρήση λιπασμάτων και αγροχημικών που έχουν ως συνέπεια: α) τον ευτροφισμό της Βιστωνίδας από την απορροή των θρεπτικών, β) την παρουσία νιτρικών στα υπόγεια νερά, η οποία κινείται σε αποδεκτές συγκεντρώσεις, αλλά η συνέχιση της μη ορθής εφαρμογής αγροχημικών θα δημιουργήσει ανησυχητικές καταστάσεις.

Συμπερασματικά ισχύει ότι η συνέχιση της μη ορθολογικής εφαρμογής των αγροχημικών και η απόληψη υπόγειου νερού, προκαλεί εξέλιξη του φαινομένου θαλάσσιας διείσδυσης, ευτροφισμού της λιμνοθάλασσας και παρουσίας νιτρικών στα υπόγεια νερά αντίστοιχα.

➤ Επιθυμητή κατάσταση

Εκμετάλλευση του αναξιοποίητου υδατικού δυναμικού του Ποταμού Κομφάτου για την κάλυψη των μελλοντικών αναγκών σε νερό για ορισμένες περιοχές στην πεδιάδα κυρίως της Ροδόπης αλλά και της Ξάνθης, πρωταρχικά για άρδευση σε συνδυασμό με τη νέα Κ.Α.Π. (αλλά και την ορθολογική χρήση λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων) και εν συνεχεία για ύδρευση και παραγωγή ενέργειας σε εναρμόνιση με την οδηγία 2000/60/Ε.Κ. που θέτει και την περιβαλλοντική διάσταση της

διαχείρισης του επιφανειακού υδατικού πόρου. Για την περιοχή μελέτης, η περιβαλλοντική διάσταση αφορά στην οικολογική διατήρηση και προστασία της λιμνοθάλασσας της Βιστωνίδας, αλλά και του Ποταμού Κομψάτου, και στην προστασία των υπόγειων νερών από υφαλμύριση και κατείσδυση νιτρικών.

Η αρχή της πρόληψης στη συγκεκριμένη περίπτωση αφορά τόσο τη διείσδυση της αλμυρής θαλάσσιας σφήνας, όσο και την παρουσία νιτρικών στον υπόγειο υδροφόρο, αλλά και τον ευτροφισμό της λιμνοθάλασσας Βιστωνίδας.

2.2. ΣΤΟΧΟΙ

Οι στόχοι αποτελούν την τελική επιδίωξη όπου μέσα από τη διαδικασία λήψης αποφάσεων, ο άμεσα ενδιαφερόμενος (όπου στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι η περιφέρεια), προσπαθεί να επιτύχει. Οι στόχοι είναι ποσοτικοποιήσιμοι (όπως οι 2 και 4), και μη (όπως οι 1 και 3): (1) Κοινωνική αναβάθμιση των κατοίκων, (2) Οικονομική σύγκλιση με τους κατά κεφαλήν δείκτες Α.Ε.Π. της υπόλοιπης Ελλάδας, (3) Περιβαλλοντική διατήρηση των οικοσυστημάτων της περιοχής (περιοχή χαρακτηρισμένη στο Natura 2000), (4) Αξιοποίηση των επιφανειακών νερών του Ποταμού Κομψάτου. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι ανωτέρω στόχοι, δε χαρακτηρίζονται ως ανταγωνίσιμοι (αλληλοσυγκρουόμενοι) μεταξύ τους. Αυτό θα συνέβαινε μεταξύ των στόχων 3 και 4 αν δεν είχε ληφθεί υπόψη η Ελάχιστη Διατηρητέα Παροχή.

2.3. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Ως περιοχή μελέτης ορίζεται η ευρύτερη περιοχή που περιλαμβάνει (Σχήμα 1) τη λεκάνη απορροής του Π. Κομψάτου με το υδρογραφικό της δίκτυο, τον υγρότοπο της λιμνοθάλασσας της Βιστωνίδας που εντάσσεται και στο δίκτυο Natura 2000, αλλά και προστατεύεται από τη συνθήκη Ramsar, τις περιοχές άρδευσης (πεδιάδα) και τους οικισμούς γύρω από τη λιμνοθάλασσα, και το υπόγειο υδατικό δυναμικό της περιοχής. Πρόκειται για 4 χωρικές ενότητες, οι σχέσεις των οποίων καθορίζονται σε επόμενη ενότητα. Η περιοχή αυτή εντάσσεται στο υδατικό διαμέρισμα 12 (βάσει του νόμου 1739/87) και περιλαμβάνει εκτάσεις που ανήκουν τόσο στο Ν. Ξάνθης όσο και στο Ν. Ροδόπης. Σύμφωνα με το συγκεκριμένο νόμο (άρθρο 1 παραγρ. 4): «Τα υδατικά διαμερίσματα, είναι περιοχές οριοθετημένες μεταξύ τους από υδροκρίτες ή νησιωτικές περιοχές, που περιλαμβάνουν ολοκληρωμένα υδρογραφικά δίκτυα, με υδρολογικές συνθήκες κατά το δυνατόν όμοιες». Η παραπάνω θεώρηση δίνει τη δυνατότητα χαρακτηρισμού του υδατικού διαμερίσματος, ανάλογα με τον αρχικό καθορισμό της ανάγκης ως «αυτόνομο γεωγραφικό και εξαρτώμενο κοινωνικοοικονομικό σύστημα», αφού λειτουργικά παρουσιάζει, από υδρολογικής άποψης, όμοιες συνθήκες, ενώ η κοινωνική και οικονομική κατάσταση εντάσσεται σε ένα ευρύτερο πλαίσιο μεταβλητών παραγόντων.

2.4. ΣΧΕΣΕΙΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΧΩΡΙΚΩΝ ΕΝΟΤΗΤΩΝ ΣΤΗΝ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

Οι σχέσεις μεταξύ των 4 χωρικών ενότητων διατυπώνονται ακολούθως:

i. Λεκάνη απορροής του Π. Κομψάτου – Λιμνοθάλασσα Βιστωνίδα: Τροφοδοσία της λιμνοθάλασσας με την ποσότητα νερού που απορρέει από τη λεκάνη με συνέπεια την ανανέωση του νερού της Βιστωνίδας και την εισροή μεγάλης ποσότητας φερτών στη λιμνοθάλασσα που μεταφέρονται ως αιωρούμενα στερεά από το ποτάμι, τα οποία και καθιζάνουν.

- ii. Λεκάνη απορροής – Περιοχές άρδευσης / οικισμοί: Απόληψη νερού και μεταφορά μέσω ανοιχτών, επενδεδυμένων με σκυρόδεμα αγωγών, για κάλυψη αρδευτικών αναγκών, αλλά σε πολύ μικρή έκταση κυρίως του δημοτικού διαμερίσματος Ιάσμου.
- iii. Λεκάνη απορροής – Υπόγεια νερά: Τροφοδοσία του υπόγειου υδατικού δυναμικού από τον Κομψάτο κατά τη διέλευση του ποταμού από το πεδινό τμήμα.
- iv. Λιμνοθάλασσα Βιστωνίδα - Περιοχές άρδευσης / οικισμοί: Μη ελεγχόμενη χρήση φυτοφαρμάκων και λιπασμάτων που ευθύνονται για ευτροφισμό και ρύπανση λίμνης.
- v. Περιοχές άρδευσης / οικισμοί – Υπόγεια νερά: Υπεράντληση νερών και εντατικοποίηση της καλλιέργειας που έχουν ως αποτέλεσμα τη διείσδυση θαλάσσιας σφήνας, την παρουσία νιτρικών (σε συγκεντρώσεις, μέχρι στιγμής, εντός των επιτρεπτών ορίων) και την κατείσδυση ποσότητας νερού από τον Κομψάτο προς τους υπόγειους υδροφορείς και άρα μη επαρκούς τροφοδοσίας της λιμνοθάλασσας.
- vi. Λιμνοθάλασσα Βιστωνίδα – Υπόγεια νερά: Η επιρροή εδώ είναι έμμεση: Από την υπεράντληση του νερού παρατηρείται κατείσδυση ποσότητας νερού κατά τη θερινή περίοδο στον υπόγειο υδροφόρα, αντί να καταλήγει στη λιμνοθάλασσα και να συμβάλει στην ανανέωση του νερού. Από σχετικές για την περιοχή έρευνες σε γεωτρήσεις που κατά καιρούς έλαβαν χώρα, προέκυψε ότι υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των υπόγειων νερών και των επιφανειακών που καταλήγουν στη Βιστωνίδα (Διαμαντής, 1985). Η μη ελεγχόμενη απορροή του ποταμού Κομψάτου παρουσιάζει τις συνηθισμένες για ένα υδρολογικό έτος διακυμάνσεις που αντιστοιχούν σε χαμηλές (τους θερινούς μήνες) και υψηλές παροχές (τους χειμερινούς μήνες). Ως εκ τούτου, η αύξηση των διηθήσεων που προκαλείται από εντατικότερη εκμετάλλευση του υπόγειου δυναμικού σε περιόδους αυξημένων αναγκών (κατά τους θερινούς μήνες) με μειωμένη έως και μηδενική βροχόπτωση, ελαττώνει την παροχή προς τη λίμνη με συνέπεια τη μετατόπιση της ισορροπίας, θαλάσσιου και γλυκού νερού. Αξίζει να σημειωθεί ότι, όπως έχει προκύψει από γεωτρήσεις, δεν υπάρχει άμεση επικοινωνία του υπόγειου υδροφόρου με τη λιμνοθάλασσα (Διαμαντής και Μαρίνος, 1986).

2.5. ΛΥΣΕΙΣ

Η διευθέτηση της διαφοράς μεταξύ υφιστάμενης και επιθυμητής κατάστασης οδηγεί στη δημιουργία και εξέταση ενός συνόλου λύσεων συμπεριλαμβανομένης και της μηδενικής λύσης. Αυτό σημαίνει ότι σε κάθε σύνολο λύσεων υπάρχει μία τουλάχιστον επιλογή που προσφέρει το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα (Βαρβαρούσης, 1998). Οι περιπτώσεις οι οποίες εξετάζονται (με δεδομένη την εφαρμογή της Κ.Α.Π., ελέγχου των ποσοτήτων των αγροχημικών και ελέγχου των γεωτρήσεων) είναι οι εξής:

1. Διατήρηση της υφιστάμενης κατάστασης στο καθεστώς κάλυψης των αναγκών σε νερό, αλλά με αναθεώρηση των Περιβαλλοντικών Όρων των γεωτρήσεων και ορθολογική χρήση λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων. Πρόκειται για μια παραλλαγή της μηδενικής λύσης, καθώς ο ορθός έλεγχος και η χαρτογράφηση των γεωτρήσεων αναμένεται να περιορίσει την ένταση του φαινομένου της υπεράντλησης. Αυτό που δεν έχει ακόμη υπολογιστεί καθώς η διαδικασία βρίσκεται υπό εξέλιξη, είναι ο βαθμός ανασχεσης της υπεράντλησης.
2. Αξιοποίηση του επιφανειακού δυναμικού του Ποταμού Κομψάτου με τη κατασκευή φράγματος βάσει διαφόρων σεναρίων και κριτηρίων σχετικά με τις περιοχές όπου προτείνεται η κάλυψη κύρια των αρδευτικών αναγκών, συμπεριλαμβανομένης και της ορθολογικής χρήσης λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων.

Η λύση αυτή η οποία εξετάζεται στη συνέχεια, αποτελεί το επόμενο βήμα σε περίπτωση που η λύση 1 δεν αποδώσει τα αναμενόμενα αποτελέσματα.

2.6. ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΛΥΣΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ

Πρόκειται για ποσοτικοποιήσιμα και μη όρια τα οποία μπορούν να αποκλείσουν κάποιες συγκεκριμένες ενέργειες κατά την εξέταση της εφαρμογής της λύσης 2 που, υπό διαφορετικές συνθήκες, να ήταν πραγματοποιήσιμες. Σε κάθε περίπτωση, είναι χρήσιμο να γίνεται διαχωρισμός μεταξύ των βραχυπρόθεσμων και μακροπρόθεσμων περιορισμών (<http://pespmc1.vub.ac.be>). Απαριθμώντας προκύπτουν τα ακόλουθα:

1. Κλιματικοί παράγοντες της περιοχής (βροχόπτωση, υγρασία, εξατμισοδιαπνοή).
2. Εδαφολογικοί παράγοντες της λεκάνης του Κοιμιάτου που αφορούν την απορροή και τη συγκράτηση νερού στη λεκάνη κατάκλυσης.
3. Οικονομικοί παράγοντες (χρηματοδότηση έργου).
4. Περιβαλλοντικοί παράγοντες (Ελάχιστη Διατηρητέα Παροχή, Υφαλμύριση).
5. Παρατεταμένη περίοδος ξηρασίας.
6. Κείμενη Νομοθεσία.

Με βάση τα ανωτέρω, οι περιορισμοί 1 και 2 προκύπτουν από τη φύση, ενώ οι περιορισμοί 3 – 6 τίθενται από τον άνθρωπο. Η υπάρχουσα νομοθεσία αποτελεί βραχυπρόθεσμο περιορισμό και όχι κατά ανάγκη μακροπρόθεσμο.

Μέσα την εξέταση της συγκεκριμένης διαδικασίας που αποτελεί το πρωτογενές στάδιο ανάλυσης, προέκυψε ότι η λύση 2 (κατασκευή φράγματος κύρια για άρδευση και δευτερευόντος για ύδρευση), είναι αποδεκτή για συγκεκριμένο τύπο φράγματος και ικανοποίηση των αναγκών κατά κύριο λόγο των χαρακτηριζομένων ως μειονεκτικών προς το καθεστώς άρδευσης περιοχών. Η επιλογή του τύπου του φράγματος και των αρδευόμενων περιοχών, προέκυψε βάσει κριτηρίων και διαχειριστικών σεναρίων σε δευτερογενές στάδιο ανάλυσης. Τα κριτήρια ήταν τα ακόλουθα:

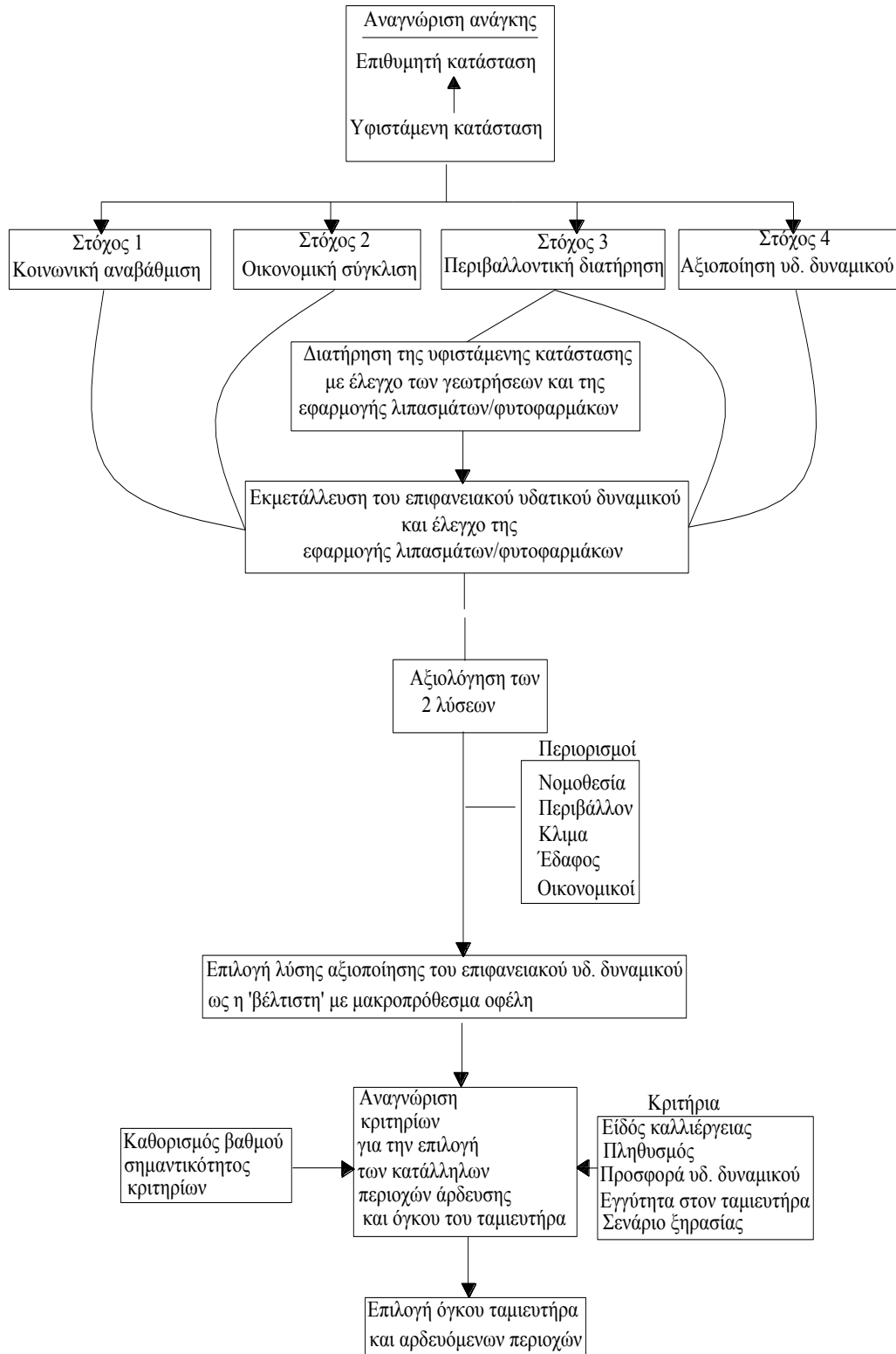
1. Περιοχές που είναι εγγύτερα στην τοποθεσία κατασκευής φράγματος
2. Περιοχές με τον μεγαλύτερο πληθυσμό
3. Περιοχές που κατατάσσονται στην κατηγορία των μειονεκτικών από άποψης προσφοράς διαθέσιμου υδατικού δυναμικού
4. Περιοχές με τις περισσότερες καλλιεργήσιμες εκτάσεις

Τα συγκεκριμένα κριτήρια προσαρμόστηκαν και εξετάστηκαν σε διαχειριστικά σενάρια που περιλαμβάνουν: α) άρδευση β) ύδρευση και άρδευση (Μιμίδης Κ., 2006).

Η συνολική διαδικασία συστημικής προσέγγισης που ακολουθήθηκε όπως αναλύθηκε ανωτέρω παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.

3. ΑΝΑΠΤΥΞΙΑΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

Η απορρόφηση κονδυλίων για την κατασκευή φράγματος, εντάσσεται στα πλαίσια των αξόνων προτεραιότητας που έχουν τεθεί κατά καιρούς σε Κ.Π.Σ.. Πιο συγκεκριμένα, οι επενδύσεις σε έργα υποδομής, όπως η κατασκευή του φράγματος, αναμένεται να συμβάλει στη βελτίωση των συνθηκών ζωής, στη δημιουργία ευνοϊκότερου περιβάλλοντος για τη γεωργική παραγωγή και στην ορθολογικότερη διαχείριση του υδατικού πόρου (Ε.Μ.Π. – Υπουργείο Ανάπτυξης, 2003). Προς σε αυτή την κατεύθυνση το Γ' Κ.Π.Σ., είχε θέσει 7 άξονες προτεραιότητας από τους οποίους οι άξονες 3, 4, 5 κύρια αφορούσαν: στη βελτίωση της ανταγωνιστικότητας με στόχο την αειφορική ανάπτυξη (άξονας 3), στην ανάπτυξη της υπαίθρου (άξονας 4) και στη βελτίωση της ποιότητας ζωής (άξονας 5). Και στους τρεις αυτούς άξονες ήταν εμφανής η πρόθεση της Ε.Ε. για την ανάπτυξη μιας πολυπρισματικής στρατηγικής διαχείρισης των υδατικών πόρων, που σε συνδυασμό με ένα σύνολο μέτρων μιας ολοκληρωμένης πολιτικής διαχείρισης υδατικών πόρων, καθίσταντο ικανά να δημιουργήσουν ένα θεσμικό πλαίσιο βιώσιμης ανάπτυξης.



Σχήμα 2: Σχηματική παράσταση της διαδικασίας που ακολουθήθηκε

Σαφέστατα, η λειτουργία του συγκεκριμένου εγχειοβελτιωτικού έργου, δεν πρέπει να περιορίζεται μόνο σε θέματα που αφορούν τη συγκέντρωση και διανομή του νερού, αλλά να επεκτείνεται και σε θέματα που καλύπτουν τις συνθήκες ορθολογικής διαχείρισης του υδατικού πόρου της περιοχής, καθώς επίσης και στις προϋποθέσεις για την πραγματοποίηση των κοινωνικοοικονομικών αποτελεσμάτων που έχουν τεθεί ως

αρχικός στόχος για την αρδευόμενη γεωργική εκμετάλλευση της περιοχής. Συγκεκριμένα η κατασκευή φράγματος στον Ποταμό Κομψάτο θα συμβάλει ενεργά στη διευκόλυνση των αγροτών στις χαρακτηριζόμενες μειονεκτικές περιοχές, παρέχοντας την απαιτούμενη ποσότητα αρδευτικού νερού για την πλήρη ανάπτυξη των καλλιεργειών. Από κοινωνικής άποψης, το έργο παρέχει τη δυνατότητα για την αύξηση της αποδοτικότητας της έγχειας προσόδου (συντελεστής εδάφους), που σε συνδυασμό με την κατάλληλη τεχνολογική υποδομή θα οδηγήσει σε σταδιακή αύξηση της παραγόμενης ποσότητας προϊόντων και άρα στην αύξηση του αγροτικού εισοδήματος που συνεπάγεται άνοδο του βιοτικού και κοινωνικού επιπέδου του αγροτικού πληθυσμού. Αν $[\text{«Κόστος Παραγωγής»} / \text{«Πρόσοδοι Εκμετάλλευσης»}] < 1$, τότε η απόδοση της επένδυσης καθιστά το φράγμα βιώσιμο ως έργο. Σε περίπτωση μετασηματισμού του τύπου $[\text{«Κόστος Αγροτικής Παραγωγής»} / \text{«Έγχεια Πρόσοδος»}]$, τότε αφού το κόστος αγροτικής παραγωγής θα μειώνεται καθώς θα αυξάνεται ο συντελεστής εδάφους (παρονομαστής) και με τη συμβολή της τεχνολογίας θα έχουμε το παραπάνω κλάσμα < 1 , που καθιστά βιώσιμη την επένδυση (Πουρναράκης και Κιντής, 1998).

4. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

Η κατασκευή φράγματος στη λεκάνη απορροής του Ποταμού Κομψάτου, η εφαρμογή μια ορθολογικής πολιτικής διαχείρισης των υδάτων και των αγροχημικών και η εφαρμογή της νέας Κ.Α.Π. θα μεταβάλει τη δομή της περιοχής. Με δεδομένο το συγκεκριμένο γεγονός, αλλάζουν ουσιαστικά οι λειτουργίες των 4 χωρικών ενότητων, κάτι το οποίο θα επηρεάσει τις σχέσεις μεταξύ τους και την εν γένει λειτουργία της ευρύτερης περιοχής. Πιο αναλυτικά:

- Λεκάνη απορροής - Λιμνοθάλασσα Βιστωνίδα: Τροφοδοσία της λιμνοθάλασσας με την ποσότητα νερού που απορρέει από τη λεκάνη με συνέπεια:
 - την ανανέωση του νερού της Βιστωνίδας με κανονική ποσότητα το χειμώνα και με σταθερή υπολογισμένη παροχή που αντιστοιχεί στην Ελάχιστη Διατηρητέα Παροχή, (Ε.Μ.Π. – Υπουργείο Ανάπτυξης, 2003) τους μήνες Ιούλιο – Αύγουστο – Σεπτέμβριο.
 - τη μείωση της ποσότητας φερτών στη λιμνοθάλασσα που μεταφέρονται ως αιωρούμενα στερεά από το ποτάμι, τα οποία και καθιζάνουν.
- Λεκάνη απορροής - Περιοχές άρδευσης / οικισμοί: Απόληψη νερού για κάλυψη αρδευτικών αναγκών σε αρκετές περιοχές, μεταφορά και διάθεση στο χωράφι με όσο το δυνατόν μικρότερες απώλειες, μέσα από την εφαρμογή σύγχρονων μεθόδων άρδευσης (υψηλός συντελεστής απόδοσης).
- Λεκάνη απορροής - Υπόγεια νερά: Συστηματικότερη τροφοδοσία του υπόγειου υδατικού δυναμικού από τον Κομψάτο κατά τη διέλευση του ποταμού από το πεδινό τμήμα, αφού θα υπάρχει έλεγχος της ροής.
- Λιμνοθάλασσα Βιστωνίδα - Περιοχές άρδευσης / οικισμοί: Ελεγχόμενη χρήση φυτοφαρμάκων και λιπασμάτων και περιορισμός του φαινομένου του ευτροφισμού μακροπρόθεσμα με άμεσες θετικές οικονομικές συνέπειες για την ιχθυοπαραγωγή της περιοχής.
- Περιοχές άρδευσης / οικισμοί - Υπόγεια νερά: Έλεγχος της άντλησης των υπόγειων νερών και εφαρμογή μεθόδων καλλιέργειας, βάσει της νέας Κ.Α.Π., με συνέπεια τη μείωση της υφαλμύρισης, τη μείωση της ποσότητας των νιτρικών που κατεισδύουν, τη μείωση της διήθησης ποσότητας νερού από τον Κομψάτο προς τους υπόγειους υδροφόρους. Με δεδομένο το γεγονός ότι η κύρια απασχόληση των κατοίκων, των

περιοχών που εξετάζονται, είναι η γεωργία και η κτηνοτροφία, τότε με την εφαρμογή της νέας Κ.Α.Π. επέρχεται εξέλιξη στην κοινωνικοοικονομική ταυτότητα της περιοχής. Εξέλιξη ως προς τις περιβαλλοντικές συνέπειες (ευτροφισμός) θα παρατηρηθεί από τη σωστή χρήση αγροχημικών και την ορθολογική αξιοποίηση των επιφανειακών και υπόγειων νερών έπειτα από την κατασκευή του φράγματος.

- Λιμνοθάλασσα Βιστωνίδα - Υπόγεια νερά: Η επιρροή θα είναι πολύ μικρότερη από την προηγούμενη αντίστοιχη περίπτωση, αφού η άρδευση από το φράγμα θα περιορίσει την ποσότητα άντλησης από τους υπόγειους υδροφορείς. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα, λιγότερα m³ νερού από την απορροή του Κομψάτου στο κάμπο να διηθούνται στους υπόγειους υδροφορείς και άρα περισσότερα να καταλήγουν στη λιμνοθάλασσα.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, επιχειρήθηκε η αναγνώριση του προβλήματος διαχείρισης υδατικών πόρων της ευρύτερης περιοχής του Ποταμού Κομψάτου, καθώς επίσης και η σαφής καταγραφή των στόχων που απορρέουν από τη συγκεκριμένη αναγνώριση. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα της ολιστικής εξέτασης των παραμέτρων που καταρτίζουν το διαχειριστικό σχέδιο των υδατικών πόρων και αφορούν οικονομικά, κοινωνικά και γεωγραφικά δεδομένα για την ευρύτερη περιοχή. Είναι δεδομένο ότι όσο πιο πολύπλοκο και μακροπρόθεσμο καθίσταται ένα διαχειριστικό σχέδιο, τόσο πιο πολλές παράμετροι και αβεβαιότητες υπεισέρχονται σε αυτό σε αντίθεση με ένα λιγότερο πολύπλοκο και βραχυπρόθεσμο. Για την περίπτωση που εξετάζεται η διαφορά μεταξύ των δύο διαχειριστικών σχεδίων, αυτή εντοπίζεται κύρια στην κατασκευή του ταμιευτήρα στη λεκάνη απορροής του Κομψάτου και στην εξέταση των επιπτώσεων που θα επακολουθήσουν. Είναι αξιοσημείωτο ότι μετά την υλοποίηση ενός διαχειριστικού σχεδίου, είτε σε βραχυπρόθεσμη, είτε σε μακροπρόθεσμη βάση, αναμένεται να υπάρξουν σημαντικά κοινωνικοοικονομικά οφέλη για τη συγκεκριμένη περιοχή.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Βαρβαρούσης, Π., 1998. *Στρατηγική των Παιγνίων – Συνεργασία και Σύγκρουση στις Διεθνείς Σχέσεις* Εκδόσεις Παπαζήση ΑΕΒΕ, Αθήνα.
- Βελεγράκη, Θ., 2003. *Διαχείριση Υδατικών Πόρων στη Λεκάνη του Κομψάτου*. Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος Δ.Π.Θ., Ξάνθη.
- Biswas, A., 1976. *Systems Approach to Water Management – International Student edition*. Published by Kosaido Printing, Tokyo.
- Διαμαντής, Ι., Μαρίνος, Π., 1986. *Τα υπόγεια νερά της περιοχής Βιστωνίδας και οι σχέσεις τους με τη λίμνη*. Θρακικά χρονικά, τεύχος 41, σελ. 174-181.
- Διαμαντής, Ι., 1985. *Υδρογεωλογική μελέτη της λεκάνης Βιστωνίδας. Μελέτη υδροφόρων οριζόντων μέσα σε ένα ευρύ ετερογενές πεδίο*. Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΔΠΘ, Ξάνθη.
- Ε.Μ.Π. – Υπουργείο Ανάπτυξης, 2003. *Σχέδιο Προγράμματος και Διαχείρισης των Υδατικών Πόρων της Χώρας*.
- Isaac, P., 1967. *River Management*. Published by Maclaren&Sons, London.
- Μιμίδης, Κ., 2006. *Ολοκληρωμένο Σχέδιο Διαχείρισης της Λεκάνης Απορροής του Ποταμού Κομψάτου και οι Επιπτώσεις στην ευρύτερη περιοχή*. Μεταπτυχιακή

Εργασία στο Π.Μ.Σ. «Οργάνωση και Διοίκηση Τεχνικών Συστημάτων», Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δ.Π.Θ., Ξάνθη.

Οδηγία 2000/60/ΕΚ (Επίσημη Εφημερίδα L. 327/22-12-2000) του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 23^{ης} Οκτωβρίου 2000: «Για τη θέσπιση πλαισίου κοινοτικής δράσης στον τομέα της πολιτικής των υδάτων».

Παναγιωτακόπουλος, Δ., 2001. *Συστημική Ανάλυση και Επικινδυνότητα και Τεχνική Οικονομία*. Εκδόσεις: Εταιρεία Αξιοποίησης και Διαχείρισης Περιουσίας Δ.Π.Θ., Ξάνθη.

Πεταλάς, Χ., Πλιάκας, Φ., Διαμαντής, Ι., 2002. *Το πρόβλημα της διείσδυσης της θάλασσας σε παράκτιους υδροφορείς της Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης και μέθοδοι αντιμετώπισής του*. Τεχνικά Χρονικά, Επιστημονική Έκδοση του Τ.Ε.Ε., σειρά Ι, τόμος 22, τεύχος 1-2, 2002, σελ. 31-43.

Πουρναράκης, Ε., Κιντής, Α., 1998. *Αρχές Οικονομικής Ανάλυσης*. Εκδόσεις Εκδοτικές Επιχειρήσεις: Το οικονομικό, Αθήνα.

Τερζίδης, Α., Παπαζαφειρίου Γ., 1987. *Γεωργική υδραυλική*. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.

Υ.ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ., 1967. *Μελέτη Έργων Αξιοποίησης Περιοχής Ροδόπης: Προμελέτη φράγματος Πολυάνθου*. Κομοτηνή, Διεύθυνση Έργων Βελτιώσεων Κομοτηνής.

<http://pespmc1.vub.ac.be>

**ΝΕΕΣ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΕΡΕΥΝΕΣ ΓΙΑ ΤΗ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ
ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ SAT ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΝΕΑΣ
ΠΕΡΑΜΟΥ Ν. ΚΑΒΑΛΑΣ.**

Χ. Κατιμάδα, Θ. Τζεβελέκης, Ι. Γκιουγκής, Ι. Διαμαντής

Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας, Τομέας Γεωτεχνικής Μηχανικής,
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών,
Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, 67100 Ξάνθη

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην περιοχή της Νέας Περάμου του Ν. Καβάλας, έχει αρχίσει τα τελευταία χρόνια μια προκαταρκτική έρευνα για τη δυνατότητα εφαρμογής των συστημάτων επεξεργασίας εδάφους-υδροφορέα (Soil Aquifer Treatment Systems, SAT) με σκοπό την αντιμετώπιση της θαλάσσιας διείσδυσης στα υπόγεια υδροφόρα στρώματα της περιοχής. Στο πλαίσιο αξιολόγησης της περιοχής όσον αφορά στις γεωλογικές, υδρογεωλογικές, υδραυλικές και υδροχημικές παραμέτρους πραγματοποιήθηκε μια σειρά εργασιών που περιέλαβαν: (α) τη ρίψη (προσθήκη) νερού σε πηγάδια (slug test) για τον υπολογισμό της υδραυλικής αγωγιμότητας K του εδάφους, (β) τη δειγματοληψία νερού από 10 επιλεγμένες γεωτρήσεις και πηγάδια της περιοχής για τον προσδιορισμό των ποιοτικών χαρακτήρων του υπόγειου νερού, (γ) την πραγματοποίηση ηλεκτρικών τομογραφιών με σκοπό τον καθορισμό της στρωματογραφίας της περιοχής. Από τα αποτελέσματα αυτών των εργασιών φαίνεται ότι η περιοχή σε ορισμένες θέσεις, κατ' αρχήν ενδείκνυται για την εφαρμογή των συστημάτων SAT.

**NEW HYDROGEOLOGICAL RESEARCH APPROACH FOR THE
IMPLEMENTATION OF SAT SYSTEM
IN N. PERAMOS OF KAVALA PREFECTURE**

Ch. Katimada, Th. Tzevelekis, I. Gkiougkis, I. Diamantis

Laboratory of Engineering Geology, Section of Geotechnical Engineering,
Department of Civil Engineering,
Democritus University of Thrace, 67100 Xanthi

ABSTRACT

In N. Peramos of Kavala Prefecture, a preliminary investigation of the applicability of the Soil Aquifer Treatment Systems (SAT), has begun in recent years, to address the seawater intrusion into groundwater aquifers in the region. Under site assessment for the geological, hydrological, hydraulic and hydrochemical parameters, a series of field works followed: (a) slug tests on water wells to calculate the hydraulic conductivity K of the soil, (b) groundwater sampling from 10 selected boreholes and wells in the area to determine groundwater quality, (c) execution of electrical tomography to determine the stratigraphy of the area. From the results of this work it appears that the area in some hot spots is suitable for application of SAT systems.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το φαινόμενο της θαλάσσιας διείσδυσης αποτελεί ένα σοβαρό περιβαλλοντικό πρόβλημα που οφείλεται κυρίως σε ανθρωπογενείς δραστηριότητες όπως οι εντατικές υπεραντλήσεις των υπόγειων υδατικών πόρων των παράκτιων υδροφόρων για άρδευση, προκειμένου να ικανοποιηθούν οι συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις.

Τα συστήματα επεξεργασίας εδάφους-υδροφορέα (Soil Aquifer Treatment Systems, SAT) έχουν ως στόχο τον τεχνητό εμπλουτισμό υπόγειων υδροφόρων συστημάτων με επεξεργασμένα υγρά απόβλητα.

Στην περιοχή της Νέας Περάμου του Ν. Καβάλας, έχει αρχίσει τα τελευταία χρόνια μια προκαταρκτική έρευνα για τη δυνατότητα εφαρμογής αυτών των συστημάτων με σκοπό την αντιμετώπιση της θαλάσσιας διείσδυσης στα υπόγεια υδροφόρα στρώματα της περιοχής (Pliakas et al., 2011).

Στην συγκεκριμένη περιοχή πραγματοποιήθηκε το καλοκαίρι του 2011 μια σειρά ερευνητικών εργασιών από το Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Δ.Π.Θ. σε συνέχεια σχετικών ερευνών στην ίδια περιοχή με σκοπό τον καθορισμό γεωλογικών, υδρογεωλογικών, υδραυλικών και υδροχημικών παραμέτρων ώστε να αξιολογηθεί η δυνατότητα εφαρμογής των συστημάτων SAT (Pliakas et al., 2007). Οι εργασίες αυτές περιέλαβαν (Κατιμάδα, 2011):

- τη ρίψη (προσθήκη) νερού σε πηγάδια (slug test) για τον υπολογισμό της υδραυλικής αγωγιμότητας K του εδάφους,
- τη δειγματοληψία από 10 επιλεγμένες γεωτρήσεις και πηγάδια της περιοχής για τον προσδιορισμό των ποιοτικών χαρακτήρων του νερού,
- την πραγματοποίηση ηλεκτρικών τομογραφιών με σκοπό τον καθορισμό της στρωματογραφίας της περιοχής.

2. ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ-ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΑ-ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Η περιοχή έρευνας εντοπίζεται στο παράκτιο πεδίο της Νέας Περάμου του Δήμου Παγγαίου του Ν. Καβάλας (Σχήμα 1). Στην περιοχή λειτουργεί Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων (Ε.Ε.Λ.) από το 2008. Η ευρύτερη υδρολογική λεκάνη περιβάλλεται από το Σύμβολο όρος (βόρειο, δυτικό και νότιο όριο), γεγονός που συμβάλλει στη γεωλογία της περιοχής, ενώ το ανατολικό όριο καταλήγει στο Αιγαίο πέλαγος. Η έκταση της περιοχής έρευνας είναι περί τα 20 km², όπου βρίσκονται μικροί οικισμοί με μικρούς πληθυσμούς που αυξάνονται το καλοκαίρι λόγω τουριστικής δραστηριότητας. Η γεωμορφολογία της περιοχής χαρακτηρίζεται ως επίπεδη με υψόμετρα μέχρι περίπου 20 m, ενώ ο χειμάρρος Ελευθερών αποτελεί τον κυριότερο χειμάρρο της περιοχής με ροή από ΒΔ προς ΝΑ (Pliakas et al., 2007, Pliakas et al., 2011).



Σχήμα 1: Η περιοχή έρευνας (©Gogle Earth 2005) (Pliakas et al., 2007).

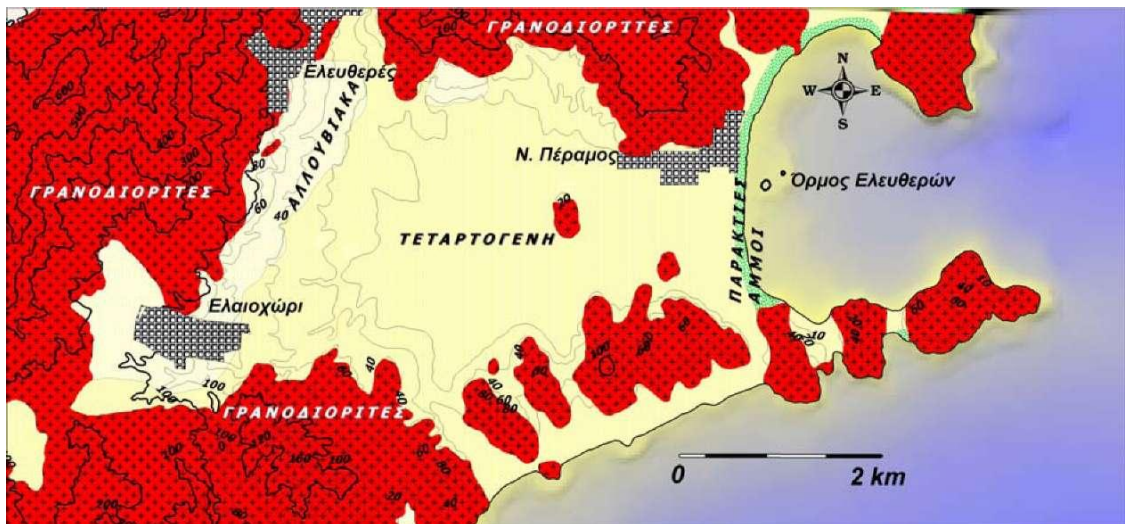
Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που δομούν την περιοχή είναι οι εξής (Pliakas et al., 2007, Pliakas et al., 2011, Σχήμα 2):

- χερσαίες αποθέσεις του τεταρτογενούς με κύρια στοιχεία: ογκόλιθους, χαλαρά κροκαλοπαγή, κροκάλες, λεπτοκοκκώδες υλικό και ερυθρούς πηλούς. Στα τοπογραφικά χαμηλότερα μέρη, κατά τόπους σχηματίζονται αναβαθμίδες. Οι επίπεδες αγροτικές εκτάσεις στη περιοχή του έργου αποτελούνται από τους προαναφερόμενους γεωλογικούς σχηματισμούς,
- γρανίτης που εμφανίζεται στις λοφώδεις εκτάσεις της περιοχής όπως, στη θέση της Ε.Ε.Λ. καθώς και ανάντη της Ν. Πέραμος, της Ν. Ηρακλείτσας, Ελευθερών και Ελαιοχωρίου. Πρόκειται για το γρανιοδιорίτη Συμβόλου ή Καβάλας που ανήκει στα κρυσταλλικά πετρώματα.

Το υπόγειο υδροφόρο σύστημα περιλαμβάνει ένα υπερκείμενο στρώμα τεταρτογενών και αλλουβιακών αποθέσεων, βάθους μέχρι 20 m και τον υποκείμενο σχηματισμό του σχιστοφυή γρανιοδιорίτη. Η υδρογεωλογική έρευνα εντοπίζεται στον υπερκείμενο ελεύθερο πορώδη υδροφόρο όπου συντελείται η διαδικασία της θαλάσσιας διείσδυσης (Pliakas et al., 2007, Pliakas et al., 2011).

Στην περιοχή έρευνας υπάρχει ένα πυκνό δίκτυο υδρογεωτρήσεων, οι οποίες μπορούν να διακριθούν σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με το βάθος τους και συνεπώς ανάλογα με την εκμετάλλευση συγκεκριμένων υδροφόρων στα αντίστοιχα βάθη (Pliakas et al., 2007, Pliakas et al., 2011):

- ρηχές γεωτρήσεις που αντλούν από τον ελεύθερο υδροφόρο μόνο,
- βαθιές γεωτρήσεις που αντλούν αποκλειστικά από τον υποκείμενο υπό πίεση υδροφόρο στο γρανιοδιорίτη και
- βαθιές γεωτρήσεις που έχουν φίλτρα και στους δυο τύπους υδροφόρων και αντλούν και από τους δύο.



Σχήμα 2: Γεωλογικός χάρτης της περιοχής έρευνας (Pliakas et al., 2007, Pliakas et al., 2011 ΓΓΜΕ, 1983 με τροποποιήσεις).

3. ΥΔΡΟΧΗΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Η έρευνα περιέλαβε τη διερεύνηση των ποιοτικών χαρακτήρων του υπόγειου νερού, με τη διεξαγωγή ανάλογων χημικών αναλύσεων δειγμάτων νερού από 10 επιλεγμένες γεωτρήσεις και πηγάδια παρακολούθησης (Σχήμα 3). Η δειγματοληψία έγινε στις 11-7-2011 και επακολούθησαν χημικές αναλύσεις και σχετική επεξεργασία

από το Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Δ.Π.Θ. Τα χημικά στοιχεία και παράμετροι που ερευνήθηκαν ήταν: Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , NO_3^- , pH, αγωγιμότητα, αλκαλικότητα P, παροδική σκληρότητα, μόνιμη σκληρότητα και ολική σκληρότητα (Πίνακας 1).



Σχήμα 3: Δίκτυο γεωτρήσεων και πηγαδιών δειγματοληψίας 2011 (Κατιμάδα, 2011).

Πίνακας 1: Ποιοτικά χαρακτηριστικά δειγμάτων νερού από γεωτρήσεις (Γ) και πηγάδια (Π) της περιοχής έρευνας (mg/L, δειγματοληψία: 11/07/2011) (Κατιμάδα, 2011).

	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	NO_3^-	PO_4^{3-}
148 (Γ)	63,73	57,83	112,00	3,30	328,18	223,40	120,20	24,00	0,36
E109 (Γ)	32,87	41,30	155,50	7,80	256,81	198,58	107,20	12,00	0,54
E127 (Γ)	40,08	54,92	151,10	5,50	316,59	205,67	175,20	24,00	0,78
145 (Γ)	82,56	47,38	68,00	2,00	268,40	102,83	173,20	46,00	0,83
152 (Π)	98,60	96,71	100,00	1,00	397,11	180,85	182,20	8,00	0,69
153 (Π)	73,75	103,76	108,00	2,50	348,42	258,86	192,00	0,00	0,08
F53 (Γ)	72,14	48,60	120,00	1,50	599,63	138,29	169,20	9,00	0,67
154 (Γ)	68,94	30,62	44,00	2,00	239,12	71,00	123,80	46,00	0,65
E028 (Γ)	36,07	31,35	56,00	5,00	186,66	113,47	142,60	3,00	0,53
155 (Γ)	34,47	31,35	80,00	3,00	239,58	102,83	92,40	19,00	0,56

	pH	Αγωγιμότητα ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Αλκαλικότητα P	Παροδική σκληρότητα ($^{\circ}\text{F}$)	Μόνιμη σκληρότητα ($^{\circ}\text{F}$)	Ολική σκληρότητα ($^{\circ}\text{F}$)
148 (Γ)	7	1434	5,38	26,9	12,80	39,70
E109 (Γ)	7,85	1216	4,21	21,05	4,15	25,20
E127 (Γ)	7,20	1416	5,19	25,95	6,65	32,60
145 (Γ)	7,15	1204	4,40	22,00	18,10	40,10
152 (Π)	7,30	1894	6,51	32,55	32,09	64,64
153 (Π)	7,75	2040	5,22	26,10	34,90	61,00
F53 (Γ)	7,47	1549	9,83	49,15	1,70	38,00
154(Γ)	6,87	1001	3,92	12,60	17,20	29,80
E028 (Γ)	7,88	795	3,06	15,30	6,60	21,90
155 (Γ)	7,80	943	3,78	18,90	2,60	21,50

Μια γενική ταξινόμηση του αρδευτικού νερού με βάση τα κριτήρια TDS και ηλεκτρικής αγωγιμότητας EC (κατά Richards, 1954) είναι η παρακάτω, στην οποία προτείνονται και μέτρα διαχείρισης του αρδευτικού νερού (Καλλέργης, 2000):

- Τάξη C₁: (TDS<200, και EC<250). Νερό χαμηλής αλατότητας. Κανένα πρόβλημα. Σε περιοχές πολύ μικρής περατότητας απαιτείται κάποια απόπλυση.
- Τάξη C₂: (200< TDS <500, 250 <EC <750). Μέτρια αλατότητα. Απαιτείται μέτρια απόπλυση των αρδευόμενων εδαφών.
- Τάξη C₃: (500< TDS <1500, 750 <EC <2250). Νερό υψηλής αλατότητας, ακατάλληλο για άρδευση σε εδάφη περιορισμένης στράγγισης. Απαιτούνται μέτρα ελέγχου της αλατότητας και καλλιέργεια μόνο ανθεκτικών σε αυτή φυτών.
- Τάξη C₄: (1500< TDS <3000, 2250 <EC <5000). Νερό πολύ υψηλής αλατότητας. Ακατάλληλο για άρδευση κάτω από συνηθισμένες συνθήκες. Χρησιμοποιήσιμο σε ειδικές συνθήκες (εδάφη πολύ περατά, στράγγιση πολύ καλή). Συνιστάται η χρησιμοποίηση πλεονάσματος νερού ώστε να επιτευχθεί η απόπλυση εδάφους και η καλλιέργεια πολύ ανθεκτικών στην αλατότητα φυτών.

$$[\text{TDS}(\text{ppm}) = 0,65 \times \text{EC}(\mu\text{S}/\text{cm}), \text{TDS}(\text{meq}/\text{l}) = 0,01 \times \text{EC}(\mu\text{S}/\text{cm})]$$

Η τάξη των δειγμάτων της περιοχής έρευνας φαίνονται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2: Ταξινόμηση του νερού με βάση τα κριτήρια TDS και EC (κατά Richards, 1954) (Κατιμάδα, 2011).

Γεώτρηση/Πηγάδι	EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	TDS (mg/L)	Τάξη
148 (Γ)	1434	932,1	C ₃
E109 (Γ)	1216	790,4	C ₃
E127 (Γ)	1416	920,4	C ₃
145 (Γ)	1204	782,6	C ₃
152 (Π)	1894	1231,1	C ₃
153 (Π)	2040	1326	C ₃
F53 (Γ)	1549	1006,85	C ₃
154(Γ)	1001	650,65	C ₃
E028 (Γ)	795	516,75	C ₃
155 (Γ)	943	612,95	C ₃

Με βάση τα στοιχεία που προέκυψαν από τις πραγματοποιηθείσες χημικές αναλύσεις προκύπτει ότι σύμφωνα με την ταξινόμηση του αρδευτικού νερού κατά Richards το νερό κατατάσσεται στην τάξη C₃ (Κατιμάδα 2011).

4. ΕΡΕΥΝΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΤΗΣ ΝΕΑΣ ΠΕΡΑΜΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ SAT

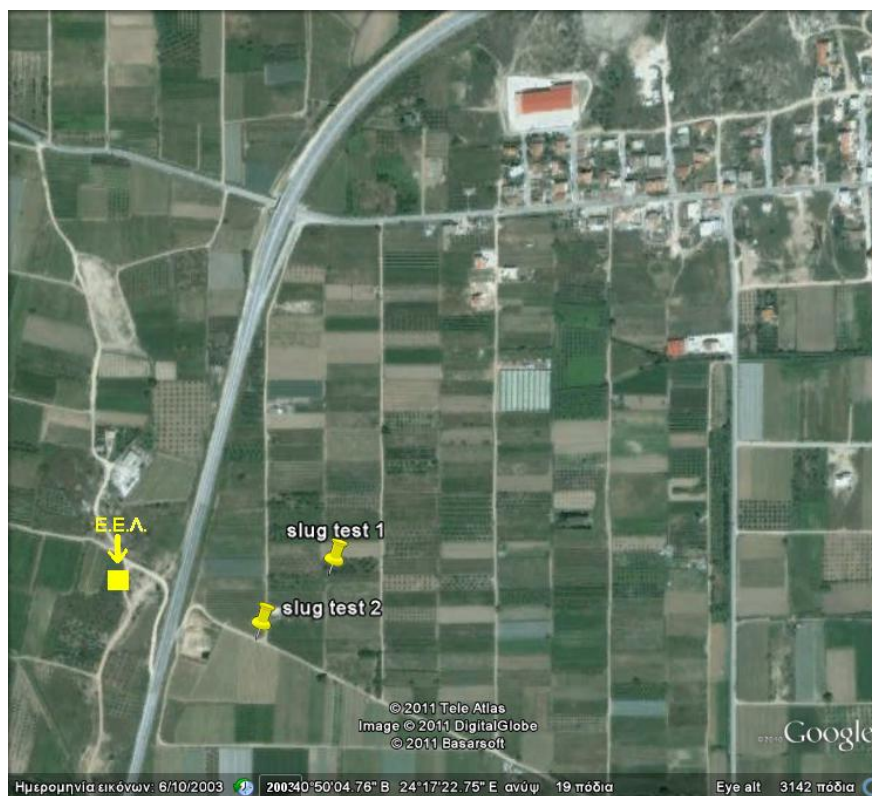
Για να εκτιμηθεί η καταλληλότητα του εδάφους της περιοχής της Νέας Περάμου από γεωλογικής-υδρογεωλογικής πλευράς πραγματοποιήθηκαν δύο κύριες εργασίες:

α) Υπολογισμός της υδραυλικής αγωγιμότητας K του εδάφους με τη μέθοδο ρίψης (προσθήκης) νερού (slug test) σε σημεία της περιοχής έρευνας. Ο υπολογισμός της υδραυλικής αγωγιμότητας πραγματοποιήθηκε σε δύο επιλεγμένα πηγάδια της περιοχής στα οποία έγινε ρίψη νερού και κατόπιν μέτρηση της μεταβολής της στάθμης σε κάθε πηγάδι, συναρτήσει του χρόνου.

β) Πραγματοποίηση ηλεκτρικών τομογραφιών σε επιλεγμένους άξονες εκατέρωθεν της Ε.Ε.Λ. με σκοπό τον καθορισμό της στρωματογραφίας του εδάφους και της γενικής εκτίμησης της κοκκομετρικής διαβάθμισης των αποθέσεων (ιζημάτων) της περιοχής.

4.1 Υπολογισμός υδραυλικής αγωγιμότητας με τη μέθοδο ρίψης (προσθήκης) νερού (slug test) σε δυο(2) πηγάδια της περιοχής έρευνας

Στην περίπτωση της μέτρησης της υδραυλικής αγωγιμότητας στην περιοχή της Νέας Περάμου το πείραμα έλαβε χώρα σε δυο πηγάδια της περιοχής έρευνας (Σχήμα 4). Ο υπολογισμός της K πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τη μέθοδο Bower και Rice (αναθεωρημένη με βάση τον Hroslev) για ελεύθερο υδροφόρο σχηματισμό (Todd and Mays, 2005).

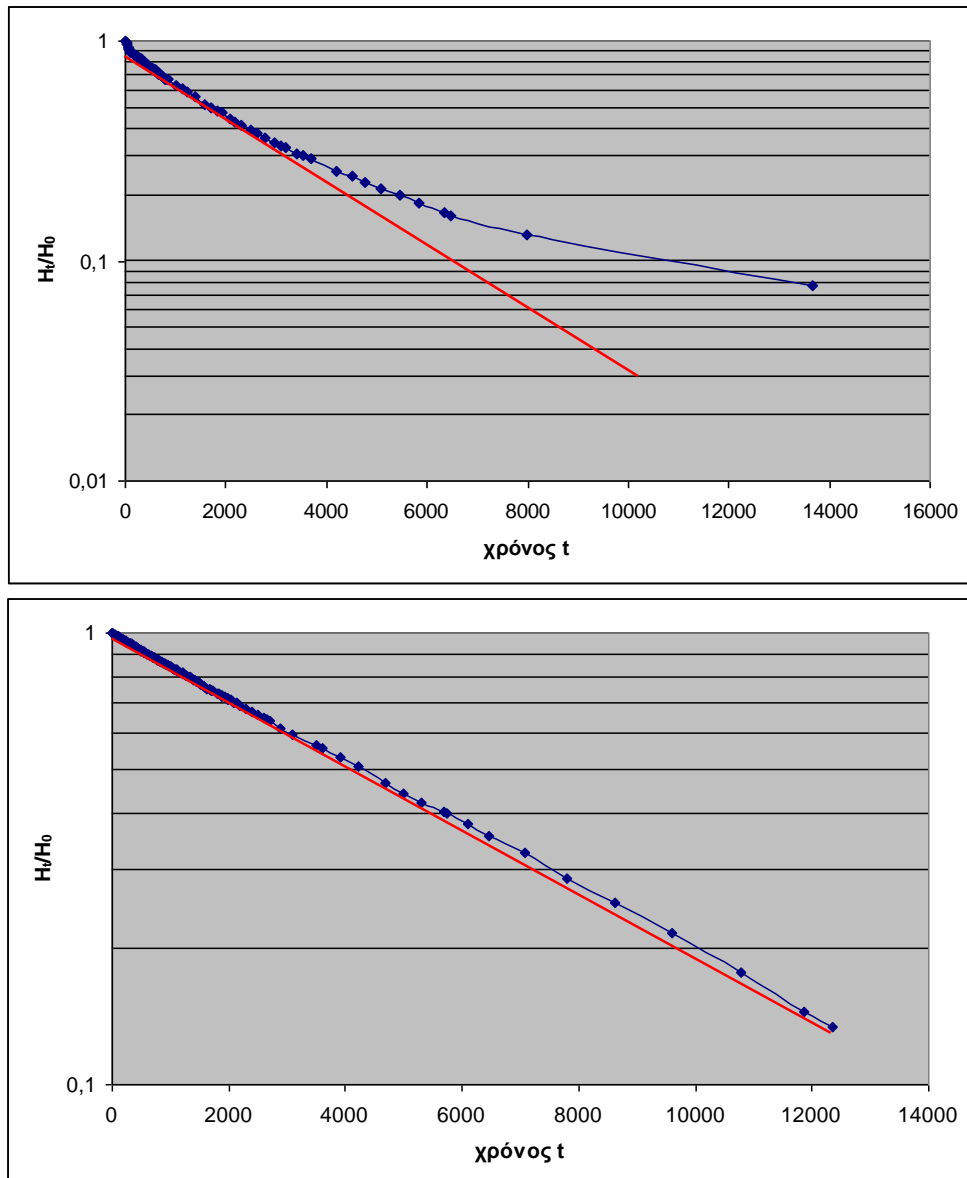


Σχήμα 4: Θέσεις πηγαδιών στα οποία πραγματοποιήθηκαν τα slug tests (Κατιμάδα, 2011).

Η μέθοδος βασίζεται στη σχεδίαση της κανονικοποιημένης πτώσης στάθμης σε σχέση με το χρόνο ως μία ευθεία γραμμή και περιλαμβάνει τον υπολογισμό της κλίσης αυτής της ευθείας γραμμής, σύμφωνα με τα δεδομένα απόκρισης. Στη συνέχεια η κλίση χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της υδραυλικής αγωγιμότητας K (Bower H., 1978). Από την επεξεργασία των δεδομένων του πειράματος στο πηγάδι 1 (slug test 1) η υδραυλική αγωγιμότητα προσδιορίστηκε σε $K = 9,19 \times 10^{-5} \text{ m/sec} = 0,33 \text{ m/h} = 8 \text{ m/d}$. Από την επεξεργασία των δεδομένων του πειράματος στο πηγάδι 2 (slug test 2) η υδραυλική αγωγιμότητα προσδιορίστηκε σε $K = 2,89 \times 10^{-5} \text{ m/sec} = 0,104 \text{ m/h} = 2,5 \text{ m/d}$ (Κατιμάδα 2011) (Σχήμα 5). Οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας που υπολογίστηκαν αντιστοιχούν στην πρώτη περίπτωση (slug test 1) σε μεσόκοκκη άμμο και στη δεύτερη περίπτωση (slug test 2) σε λεπτόκοκκη άμμο (Brassington, 1988).

4.2 Ηλεκτρικές τομογραφίες για τον καθορισμό της στρωματογραφίας της περιοχής έρευνας.

Στην περιοχή της Νέας Περάμου Καβάλας πραγματοποιήθηκαν τρεις ηλεκτρικές τομογραφίες S1, S2, και S3 (Σχήμα 6). Οι τομογραφίες πραγματοποιήθηκαν με σκοπό τη διερεύνηση των γεωλογικών στρωμάτων του υπεδάφους και τον καθορισμό της στρωματογραφίας της περιοχής. Η στρωματογραφική δομή του υπεδάφους ειδικά στα πρώτα μέτρα είναι πολύ σημαντική για την εφαρμογή των συστημάτων SAT. Τα γενικά κριτήρια επιλογής κατάλληλων θέσεων πιλοτικών έργων SAT περιλαμβάνουν κατάλληλες υδρογεωλογικές συνθήκες, απαιτούμενο βάθος ακόρεστης ζώνης $> 3 \text{ m}$, κατάλληλο υλικό ακόρεστης ζώνης, που να εξασφαλίζει ικανοποιητικό ρυθμό διήθησης, κλίση εδάφους $< 5 \%$ (Pliakas et al., 2011).



Σχήμα 5: Διάγραμμα Bouwer και Rice για το πηγάδι 1 (επάνω) και για το πηγάδι 2 (κάτω) (Κατιμάδα, 2011).

Για την πραγματοποίηση των ηλεκτρικών τομογραφιών χρησιμοποιήθηκε το όργανο ABEM SAS 4000 ως κεντρική μονάδα των μετρήσεων. Χρησιμοποιήθηκαν 2 καρούλια καλωδίων (πολύκλιωνα καλώδια) μήκους 200 m έκαστο, το σύστημα πολλαπλών καναλιών (πολυπλέκτης) ES464, 40 μεταλλικά ηλεκτρόδια, 40 καλώδια σύνδεσης και μια εξωτερική μπαταρία 45Ah (Instruction manual Terrameter SAS 4000, 2009). Για τις μετρήσεις των S1, S2 και S3 χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Schlumberger.

Η τομή S1 (Σχήμα 7) είχε ανάπτυγμα 200 m, ενώ τα ηλεκτρόδια ρεύματος τοποθετήθηκαν ανά 10 m στη διάταξη μέτρησης. Το μέγιστο βάθος διείσδυσης ήταν 24 m. Από τις τιμές των αντιστάσεων φαίνεται ότι επικρατούν κυρίως αδρόκοκκα υλικά (λεπτόκοκκες και μεσόκοκκες άμμοι, χαλίκια) με ενστρώσεις αργίλων κατά θέσεις. Οι υψηλές τιμές αντίστασης που εμφανίζονται επιφανειακά, από το κέντρο της διάταξης και ανατολικά, οφείλονται σε μεταφερόμενα υλικά (μπάζα).

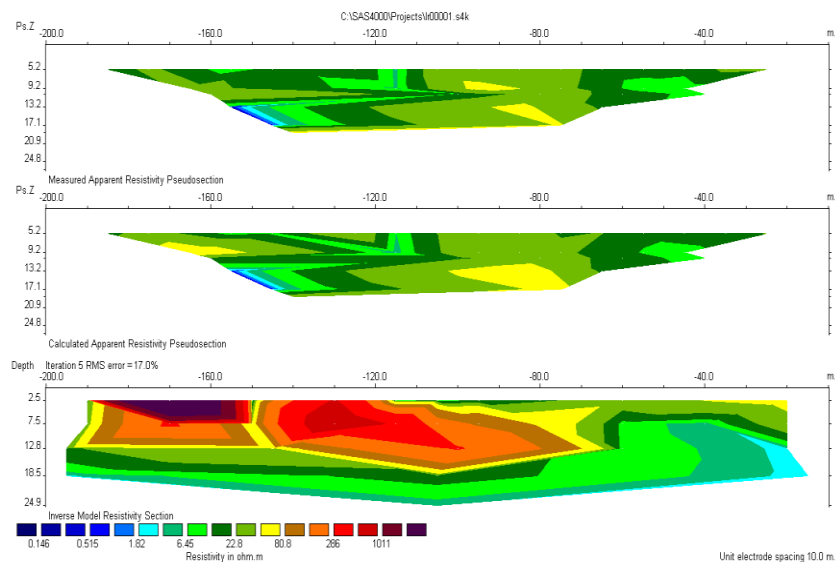
Η τομή S2 (Σχήμα 8) είχε ανάπτυγμα 400 m, ενώ τα ηλεκτρόδια ρεύματος τοποθετήθηκαν ανά 10 m στη διάταξη μέτρησης. Το μέγιστο βάθος διείσδυσης ήταν περίπου 58 m. Από τις τιμές των αντιστάσεων φαίνεται ότι επικρατούν κυρίως

αδρόκοκκα υλικά (άμμοι, χαλίκια) καθώς και άργιλοι σε μικρότερο ποσοστό, ενώ από τις χαμηλές τιμές αντίστασης προκύπτουν υφάλμυρα υδροφόρα στρώματα κατά θέσεις.

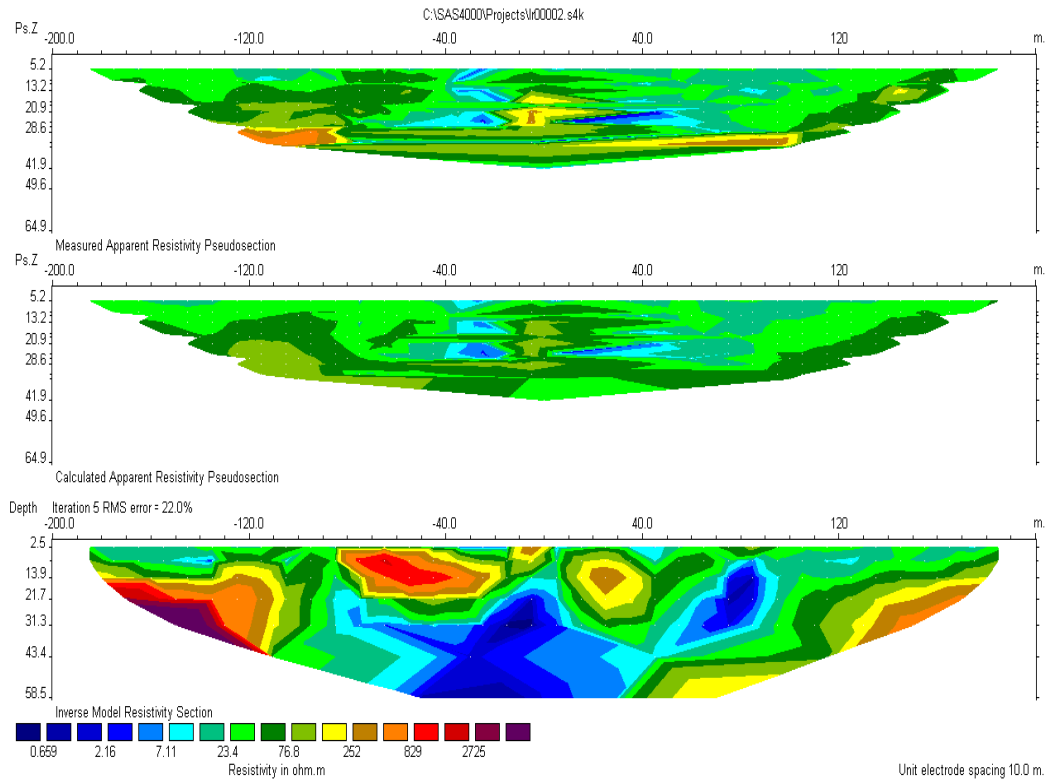
Η τομή S3 (Σχήμα 9) είχε ανάπτυγμα 400 m, ενώ τα ηλεκτρόδια ρεύματος τοποθετήθηκαν ανά 10 m στη διάταξη μέτρησης. Το μέγιστο βάθος διεξόδου ήταν περίπου 60 m. Από τις τιμές των αντιστάσεων φαίνεται ότι επικρατούν κυρίως αδρόκοκκα υλικά (άμμοι, χαλίκια) καθώς και άργιλοι κατά θέσεις σε μικρότερο ποσοστό. Επίσης εντοπίστηκε το υπόβαθρο της περιοχής (γρανίτης) σε βάθη που ποικίλουν από 5 έως 60 m. Γενικά στη συγκεκριμένη ηλεκτρική τομή το πάχος των ιζηματογενών αποθέσεων είναι μικρότερο σε σχέση με τις S1 και S2 και το υπόβαθρο (γρανίτης) εμφανίζεται πιο κοντά στην επιφάνεια του εδάφους.



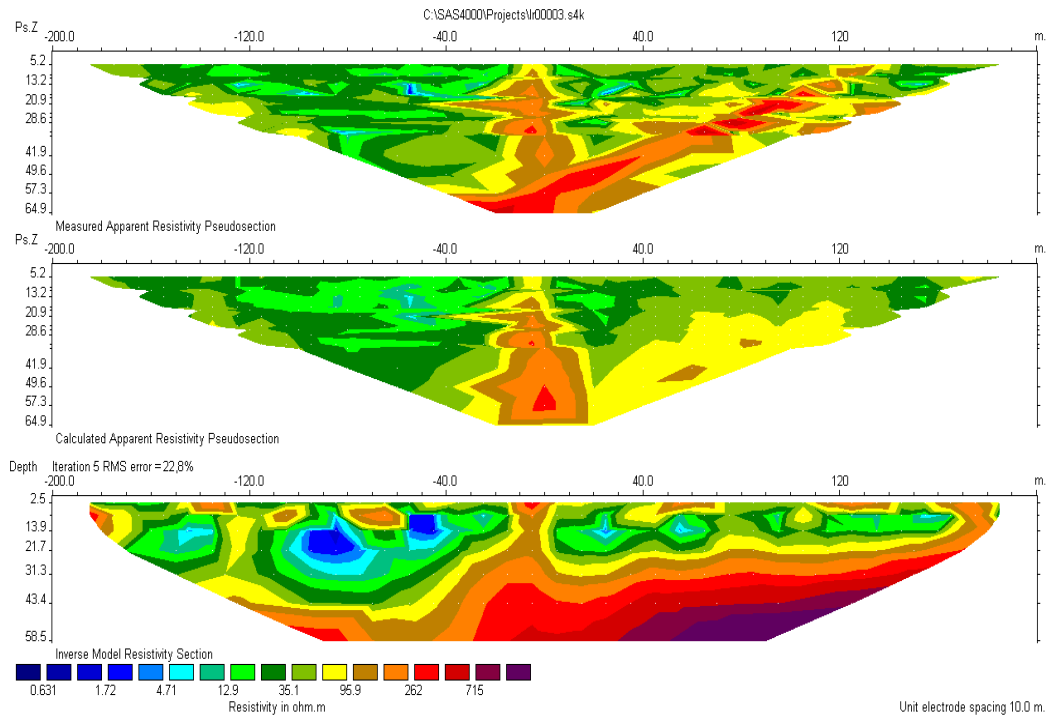
Σχήμα 6: Θέση ηλεκτρικών τομογραφιών S1,S2 και S3 που πραγματοποιήθηκαν στην περιοχή της Νέας Περάμου (Κατιμάδα, 2011).



Σχήμα 7: Ηλεκτρική τομογραφία S1.



Σχήμα 8: Ηλεκτρική τομογραφία S2.



Σχήμα 9: Ηλεκτρική τομογραφία S3.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην περιοχή της Νέας Περάμου του Νομού Καβάλας έχει αρχίσει τα τελευταία χρόνια μια προσπάθεια διερεύνησης της δυνατότητας τεχνητού εμπλουτισμού του παράκτιου υδροφόρου της περιοχής, με επεξεργασμένα υγρά απόβλητα μέσω των συστημάτων επεξεργασίας εδάφους-υδροφορέα (Soil Aquifer Treatment Systems, SAT) με σκοπό τον περιορισμό του φαινομένου της θαλάσσιας διείσδυσης. Για την εφαρμογή των συστημάτων SAT απαιτείται να πληρούνται κάποια γεωλογικά, υδρογεωλογικά, υδραυλικά και υδροχημικά κριτήρια.

Η εφαρμογή συστήματος SAT στην περιοχή της Νέας Περάμου με βάση τα υπάρχοντα γεωλογικά, υδρογεωλογικά και υδροχημικά στοιχεία, κρίνεται εφικτή, διότι:

- Από τις μετρήσεις στάθμης στο πλαίσιο προηγούμενων ερευνών, προέκυψε ότι στο ΒΔ τμήμα του αλλουβιακού πεδίου της Νέας Περάμου (Pliakas et al., 2011) είναι δυνατή η κατασκευή λεκανών διήθησης, οι οποίες να πληρούν τις προδιαγραφές των 3 m πάχους της ακόρεστης ζώνης.
- Από τον υπολογισμό της υδραυλικής αγωγιμότητας της ακόρεστης ζώνης με τις δοκιμές slug tests, προέκυψαν ικανοποιητικές τιμές για την καλύτερη κατείσδυση του νερού εμπλουτισμού.
- Από τις ενδεικτικές χημικές αναλύσεις σε δείγματα υπόγειου νερού της περιοχής έρευνας, φαίνεται ότι το νερό με βάση τις τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας EC, αλλά και την αξιολόγηση σύμφωνα με τα σταθερότυπα άρδευσης είναι σχετικά επιβαρυνόμενο, ειδικότερα, N και NA της Ε.Ε.Λ. (παράκτια ζώνη). Επομένως ένα σύστημα SAT θα μπορούσε να συνεισφέρει μέσω τεχνητού εμπλουτισμού στην αντιμετώπιση της θαλάσσιας διείσδυσης.
- Από τις ηλεκτρικές τομογραφίες προκύπτει η ύπαρξη γενικά αδρόκοκκων ιζηματογενών γεωλογικών σχηματισμών (κυρίως άμμοι). Άρα η ταχύτητα κίνησης του υπόγειου νερού με βάση τη βιβλιογραφία σε αυτού του είδους τους σχηματισμούς, είναι 1 ως 10 m/day, γεγονός που επιβεβαιώθηκε και με τα slug tests.

Στο πλαίσιο της περαιτέρω διερεύνησης της δυνατότητας επαναχρησιμοποίησης της εκροής από την Ε.Ε.Λ. της Νέας Περάμου κρίνεται απαραίτητος ο συστηματικός έλεγχος όλων των απαραίτητων ποιοτικών χαρακτηριστικών της εκροής με βάση τις σχετικές προδιαγραφές, καθώς και οι αντίστοιχες εφαρμογές και εμπειρίες από το διεθνή χώρο. Επίσης, απαραίτητος θεωρείται ο έλεγχος των ποιοτικών παραμέτρων του ανανεωμένου νερού. Επισημαίνεται ότι οι τιμές εξόδου της εκροής της Ε.Ε.Λ. BOD, COD και SS πρέπει να είναι μέσα στα απαιτούμενα όρια για εμπλουτισμό υπόγειου υδροφόρου, που δεν χρησιμοποιείται για πόση και με διήθηση διαμέσου κατάλληλου εδαφικού στρώματος, δηλαδή BOD<25 mg/L, COD<125 mg/L, SS<35 mg/L (ΚΥΑ 145116 - ΦΕΚ 354-8 Μαρτίου 2011, ΚΥΑ 5673/400/1997).

Επομένως, για την πρόταση ενός ολοκληρωμένου σχεδίου εφαρμογής συστήματος SAT στην περιοχή της Νέας Περάμου, εκτός των ευνοϊκών, καταρχήν, γεωλογικών-υδρογεωλογικών-υδροχημικών-υδραυλικών παραμέτρων απαιτείται και ενδελεχής έλεγχος της ποιότητας της εκροής όσον αφορά σε θέματα που αφορούν στη δημόσια υγεία, γεγονός που στην περιοχή έρευνας χρήζει περαιτέρω διερεύνησης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ABEM, 2009. Instrument – instruction manual Terrameter SAS 4000.

Bouwer H., and Rice, R.C., 1989. *Effect of water depth in ground water recharge basins on infiltration rate.*

- Bouwer, H., 1978. *Ground Water Hydrology*. New York: McGraw-Hill. 480p.
- Brassington, R., 1988. *Field Hydrogeology*. Geological Society of London Handbook Series, Open University Press.
- Ι.Γ.Μ.Ε., 1983. Απόσπασμα από Γεωλογικό χάρτη κλίμακας 1:50.000, φύλλο Καβάλα.
- Καλλέργης, Γ., 2000. *Εφαρμοσμένη Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία*, 2ος Τόμος, Έκδοση ΤΕΕ, Αθήνα.
- Κατιμάδα, Χ., 2011. *Έρευνες για την εφαρμογή συστήματος SAT περιοχή της Νέας Περάμου του Νομού Καβάλας*. Μεταπτυχιακή Διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δ.Π.Θ., Ξάνθη.
- Pliakas F., Kallioras, A., Diamantis, I., Stergiou, M., 2011. *Groundwater recharge using a Soil Aquifer Treatment (SAT) system in NE Greece*. Advances in the Research of Aquatic Environment, Environmental Earth Sciences, Springer, Vol. 1, pp. 291-298.
- Pliakas F., Kallioras, A., Diamantis, I., and Giougis, I., 2007. *Seawater intrusion in a coastal phreatic aquifer of Kavala Prefecture, Northern Greece*. Proceedings of the 10th International Conference on the Environmental Science and Technology (CEST2007), University of the Aegean, Dept. of Environmental Studies, and Global Nest, 5-7/9/2007, Cos Island, Greece, Vol. B, pp. 626-633.
- Richards, I.A., (ed), 1954. *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*. Agric Handbook 60, U.S. Dept. Agric., Washington, D.C., 160p.
- Todd, D.K., and Mays L.W., 2005. *Groundwater Hydrology* (3rd edition). John Wiley & Sons, Inc., New York, USA.

**ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΑΙ ΠΟΙΟΤΗΤΕΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ
ΝΕΡΩΝ ΣΤΟ ΥΔΡΟΦΟΡΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΤΩΝ ΠΟΤΑΜΩΝ ΚΑΤΩ ΡΟΥ
ΑΛΙΑΚΜΟΝΑ - ΛΟΥΔΙΑ, Κ. ΜΑΚΕΔΟΝΙΑ, ΒΟΡΕΙΑ ΕΛΛΑΔΑ**
Νικόλαος Βεράνης¹, Χρήστος Χρηστίδης¹, Αλεξάνδρα Χρυσάφη²,
Κωνσταντίνα Μακροβασίλη²

¹Ινστιτούτο Γεωλογικών & Μεταλλευτικών Ερευνών, Π.Μ.Κ.Μ.,

²Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Γεωλογικό Τμήμα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το κοκκώδες υδροφόρο σύστημα των ποταμών κάτω ρου Αλιάκμονα και Λουδία, καταλαμβάνει έκταση 1638 km² και φιλοξενείται κύρια σε Τεταρτογενή, Νεογενή ιζήματα. Από την πιεζομετρική μελέτη διαπιστώνεται ότι το υδατικό έλλειμμα είναι 28,6*10⁶ m³/έτος, που είχε ως αποτέλεσμα την ταπείνωση της πιεζομετρικής επιφάνειας. Προβλήματα υφαλμύρινσης παρουσιάζονται στις παράκτιες περιοχές, κατά μήκος του ποταμού Λουδία και στο δέλτα του ποταμού Αλιάκμονα. Υπερβάσεις σχετικά με τα ανώτερα επιτρεπτά όρια για το υδρευτικό νερό εντοπίστηκαν σε μερικές γεωτρήσεις και αφορούν τα στοιχεία: μαγγάνιο, σίδηρος, αρσενικό και χρώμιο. Τα νιτρικά είναι γενικά σε χαμηλές συγκεντρώσεις και σπάνια υπερβαίνουν την τιμή των 50 mg/l. Τα υπόγεια νερά κατατάσσονται στα χαμηλού κινδύνου αλμυρότητας και είναι κατάλληλα για άρδευση.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Υπόγειοι υδροφορείς, υδατικό ισοζύγιο, ταπείνωση πιεζομετρικής επιφάνειας, ποιότητες υπόγειων νερών.

**HYDROGEOLOGICAL CONDITIONS AND GROUNDWATER
QUALITIES OF THE LOWER REACHES OF ALIAKMONA &
LOUDIA RIVERS AQUIFER SYSTEM, REGION OF CENTRAL
MACEDONIA, NORTHERN GREECE**

N. Veranis¹, C. Christidis¹, A. Chrysafi², K. Makrovasilis²

¹Institute of Geology and Mineral Exploration of Greece, Regional Unit of Central Macedonia,

²Aristotle University of Thessaloniki, Geology Department

ABSTRACT

The aquifer system of the lower reaches of Aliakmon and Loudias rivers covers an area of 1638 km² and is mainly hosted within the Quaternary and Neocene sediments. Based on data of piezometric records concluded that the water-balance deficit of 28,6*10⁶ m³/year, resulted to decline of the piezometric surface. Salinization problems are located in the coastal areas, along the Loudias river and in the delta of Aliakmon river. Exceeding of upper limits of the drinkable waters are located in some wells and related to the elements: Mn, Fe, As and Cr. Nitrates are generally at low concentrations and very rarely exceeds the upper limit of 50 mg/l. The ground waters are classified to lower dangerous of salinity and are suitable for the irrigation.

KEYWORDS: Aquifers, water balance, piezometric surface decline, groundwater qualities.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι προηγούμενες μελέτες στην περιοχή του υδροφόρου συστήματος ποταμών κάτω ρου Αλιάκμονα και Λουδία αναφέρονται στα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά (Veranis et. al., 2011), στην ποιοτική κατάσταση των υδρευτικών νερών (Τζιμούρτας 2002, Βεράνης, 2008 & 2009) ή περιλαμβάνουν μόνο το βορειοδυτικό τμήμα του (Ράπτη, 1995).

Στην εργασία αυτή γίνεται ολοκληρωμένη αναφορά στα υδρογεωλογικά και υδροχημικά χαρακτηριστικά του υδροφόρου συστήματος που βασίζεται σε δεδομένα υπαίθρου και χημικών αναλύσεων τα οποία προέκυψαν από τη μελέτη του ΙΓΜΕ για τα υδροφόρα συστήματα της Περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας (Βεράνης κ.ά., 2010).

2. ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Το υδροφόρο σύστημα έχει έκταση 1.638 km² και το περισσότερο τμήμα του είναι πεδινό που καταλαμβάνει έκταση 950 km² με υψόμετρα 0 έως 20 m. Η λοφώδη ζώνη (20-200 m) εκτείνεται περιμετρικά της πεδινής περιοχής και καταλαμβάνει έκταση 654 km², ενώ μία μικρή ημιορεινή ζώνη έκτασης 36 km² στο βόρειο τμήμα του εκτείνεται μεταξύ των υψομέτρων 200 έως 550 m. Το ημιορεινό και λοφώδες τμήμα διατρέχονται από υδρογραφικό δίκτυο δενδριτικής μορφής. Η φυσική απορροή γίνεται κύρια από τον ποταμό Αλιάκμονα. Στο πεδινό τμήμα είναι έντονη η ανθρωπογενής επέμβαση που αποδίδεται στην κατασκευή από τη δεκαετία του 1930 της αποστραγγιστικής τάφρου του Λουδία ποταμού, με την οποία έγινε η αποξήρανση της λίμνης Γιαννιτσών, της Τάφρου 66 όπου παροχετεύεται η παροχή των ποταμών Αλμωπαίου, του Εδεσσαίου καθώς και τα νερά των πηγών του Βερμίου όρους. Επίσης έχει κατασκευασθεί πυκνό δίκτυο τάφρων αποστράγγισης όμβριων νερών και αρδευτικών καναλιών.

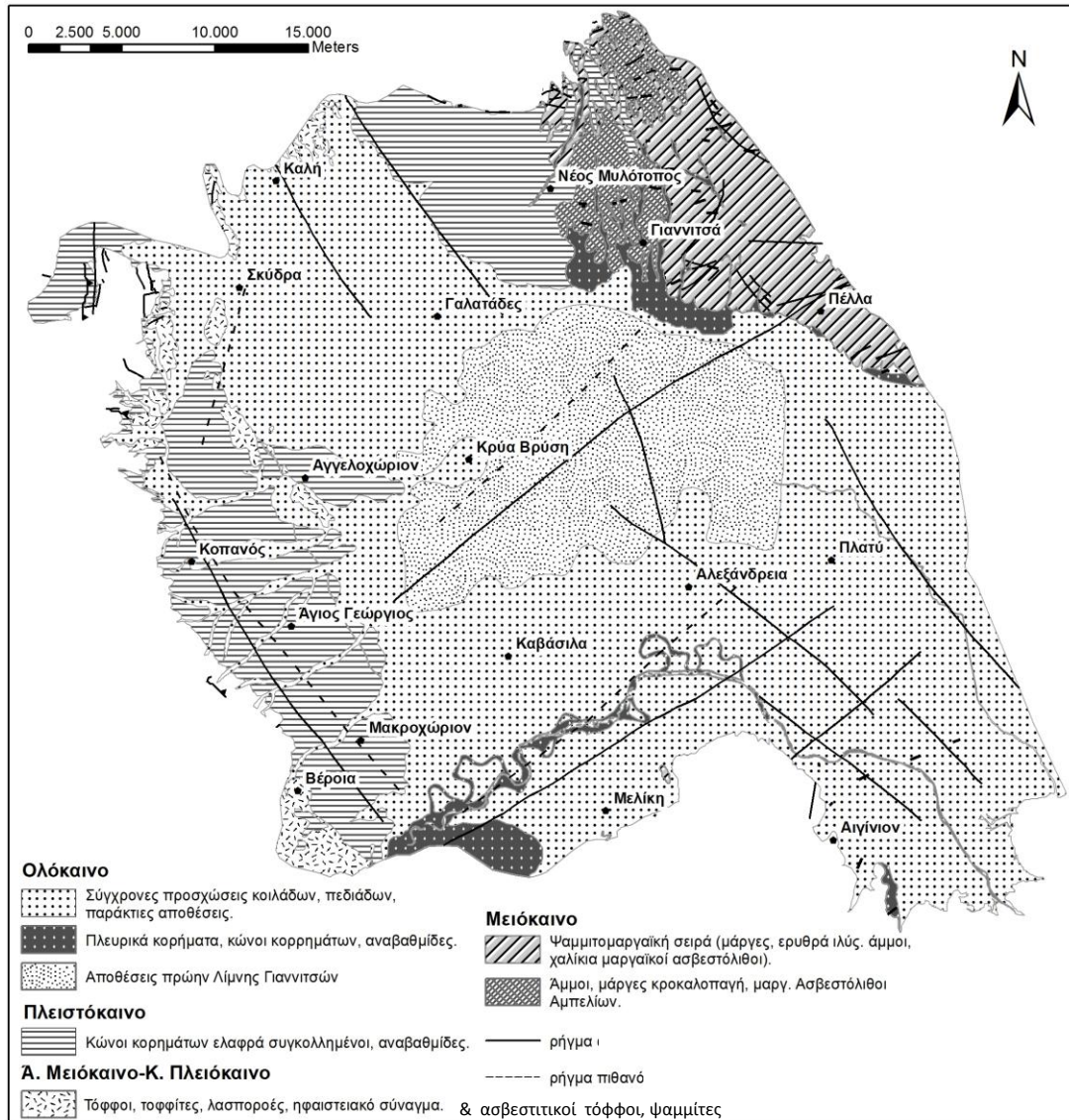
3. ΓΕΩΛΟΓΙΑ

Για τη μελέτη της στρωματογραφίας χρησιμοποιήθηκαν τριακόσιες (300) λιθολογικές τομές από υδρογεωτρήσεις καθώς και βαθιές γεωτρήσεις (600-3400 m) που έγιναν για την έρευνα της γεωθερμίας (Κολιός κ.ά., 2005) και υδρογονανθράκων (Lalechos, 1986). Οι χαρτογραφικές ενότητες του υδροφόρου συστήματος συνίστανται από Τεταρτογενή και Νεογενή ιζήματα (Πλειόκαινο-Μειόκαινο), (Εικόνα 1). Τα Τεταρτογενή ιζήματα διακρίνονται σε Ολοκαινικής και Πλειστοκαινικής ηλικίας.

Τα *Ολοκαινικά ιζήματα* εντοπίζονται στην πεδινή περιοχή. Αποτελούνται από αποθέσεις λεπτόκοκκων άμμων, πηλών, αργιλούχων πηλών, κροκαλολατύπες και άμμοις στις κοίτες των χειμάρρων καθώς και υλικά χειμαρρωδών αναβαθμίδων με μικρό πάχος. Κώνοι κορημάτων και πλευρικά κορήματα από ασύνδετες, αδιαβάθμητες λατύπες και κροκάλες. Αποθέσεις αποξηραμένης λίμνης Γιαννιτσών από ιλεις, αργίλους και αργιλοαμμούχα υλικά. Σύγχρονοι και πρόσφατοι κώνοι χειμαρρωδών αποθέσεων.

Τα *Πλειστοκαινικά ιζήματα* εντοπίζονται στη πεδινή και λοφώδη περιοχή του δυτικού τμήματος καθώς και στο βόρειο τμήμα, στους πρόποδες του Πάϊκου. Διακρίνονται κώνοι συγκολλημένων κορημάτων από ερυθρά ιλύ, ασβεστολιθικό λατυποπαγές, ογκόλιθοι, κώνοι χειμαρρωδών αποθέσεων ασύνδετοι ή ελαφρά συγκολλημένοι, κολλουβιακές αποθέσεις, αποθέσεις ποταμοχειμαρρώδους προέλευσης. Το πάχος των Πλειστοκαινικών ιζημάτων φθάνει μέχρι τα 100 m.

Διακρίνονται κώνοι συγκολλημένων κορημάτων από ερυθρά ιλύ, ασβεστολιθικό λατυποπαγές, ογκόλιθοι, κώνοι χειμαρρωδών αποθέσεων ασύνδετοι ή ελαφρά συγκολλημένοι, κολλουβιακές αποθέσεις, αποθέσεις ποταμοχειμαρρώδους προέλευσης. Το πάχος των Πλειστοκαινικών ιζημάτων φθάνει μέχρι τα 100 m.



Εικόνα 1: Γεωλογικός Χάρτης υδροφόρου συστήματος ποταμών κάτω ρου Αλιάκμονα και Λουδία.

Οι *Άνω Μειοκαινικής-Κάτω Πλειοκαινικής* ηλικίας αποθέσεις διακρίνονται σε τόφφους, τοφφίτες και λασποροές που απαντούν στη λοφώδη περιοχή μεταξύ Ανυδρου - Μάνδαλου καθώς και δυτικά- βόρεια της Σκύδρας. Επίσης ασβεστιτικοί τόφφοι με πορώδη υφή και ψαμμιτικές παρεμβολές στην περιοχή Βεροίας (Πλειστόκαινο-Πλειόκαινο). Τα *Μειοκαινικά ιζημάτα* εμφανίζονται στο ανατολικό, βορειοανατολικό τμήμα της ιζηματογενούς ταφρολεκάνης του Λουδία και αποτελούνται από: (α) Ψαμμιτομαργαϊκή σειρά, που είναι εναλλαγές αδρόκκοκων άμμων ή αμμοχάλικων με παρεμβολές φακών μαργών ή μαργαϊκών ψαμμιτών ή μαργαϊκών ασβεστόλιθων και σπανιότερα μικροκροκαλοπαγών. (β) Μάργες, ερυθρά ιλύς. (γ) Άμμοι, χαλίκια και μάργες. Κατά θέσεις καλύπτονται από ασβεστόλιθους, μαργαϊκούς ασβεστόλιθους, μάργες και ψαμμιτοκροκαλοπαγή.

Από τη μελέτη των λιθολογικών τομών των γεωτρήσεων που ανορύχθηκαν για την έρευνα υδρογονανθράκων, προκύπτει ότι η ιζηματογένεση ξεκίνησε από το Ηώκαινο και το συνολικό πάχος των ιζημάτων υπερβαίνει τα 3400 m (Βεράνης κ.ά., 2010). Το πάχος των Τεταρτογενών και Νεογενών ιζημάτων κυμαίνεται από μερικές δεκάδες μέτρα στα περιθώρια της ιζηματογενούς λεκάνης και φθάνει τα 1500 m περίπου στο κεντρικό και ανατολικό

τμήμα. Η υδρογεωλογική έρευνα αναφέρεται μέχρι το βάθος των 650 m περίπου, διότι σε μεγαλύτερα βάθη η θερμοκρασία των νερών είναι 33-35°C και τα νερά χαρακτηρίζονται ως γεωθερμικά (Κολιός κ.ά., 2005).

Τα ρήγματα που εντοπίζονται στο υδροφόρο σύστημα έχουν διεύθυνση ΒΒΔ-ΝΝΑ έως ΒΔ-ΝΑ και μόνο στο κεντρικό τμήμα του η διεύθυνση είναι ΒΒΑ-ΝΝΔ έως ΒΑ-ΝΔ (Εικόνα 1). Η βύθιση του υποβάθρου και κατά συνέπεια η αύξηση του πάχους των υπερκείμενων ιζηματογενών σχηματισμών αποδίδεται σε κανονικά ρήγματα διεύθυνσης ΒΑ-ΝΔ. Η αλλαγή της διεύθυνσης ροής του ποταμού Αλιάκμονα από Β-ΒΑ προς Ν-ΝΑ αποδίδεται σε μεταπρωτικό ρήγμα διεύθυνσης ΒΒΔ-ΝΝΑ (Lalechos, 1986).

4. ΥΔΡΟΛΙΘΟΛΟΓΙΚΑ ΚΑΙ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Το υδροφόρο σύστημα από το βόριο έως το δυτικό όριο του περιβάλλεται από τα ανθρακικά πετρώματα του Πάϊκου, τους ηφαιστειακούς τόφφους της Αλμωπίας και τα ανθρακικά ή κρυσταλλοσχιτώδη πετρώματα του Βερμίου από τα οποία τροφοδοτείται με υπόγεια πλευρική διήθηση. Στο νότιο και ανατολικό όριο του περιβάλλεται από Νεογενή ιζήματα, με τα οποία διαχωρίζεται υδραυλικά μέσω υπόγειου υδροκρίτη, ενώ στο νοτιοανατολικό όριο του επικοινωνεί υδραυλικά με την ακτή.

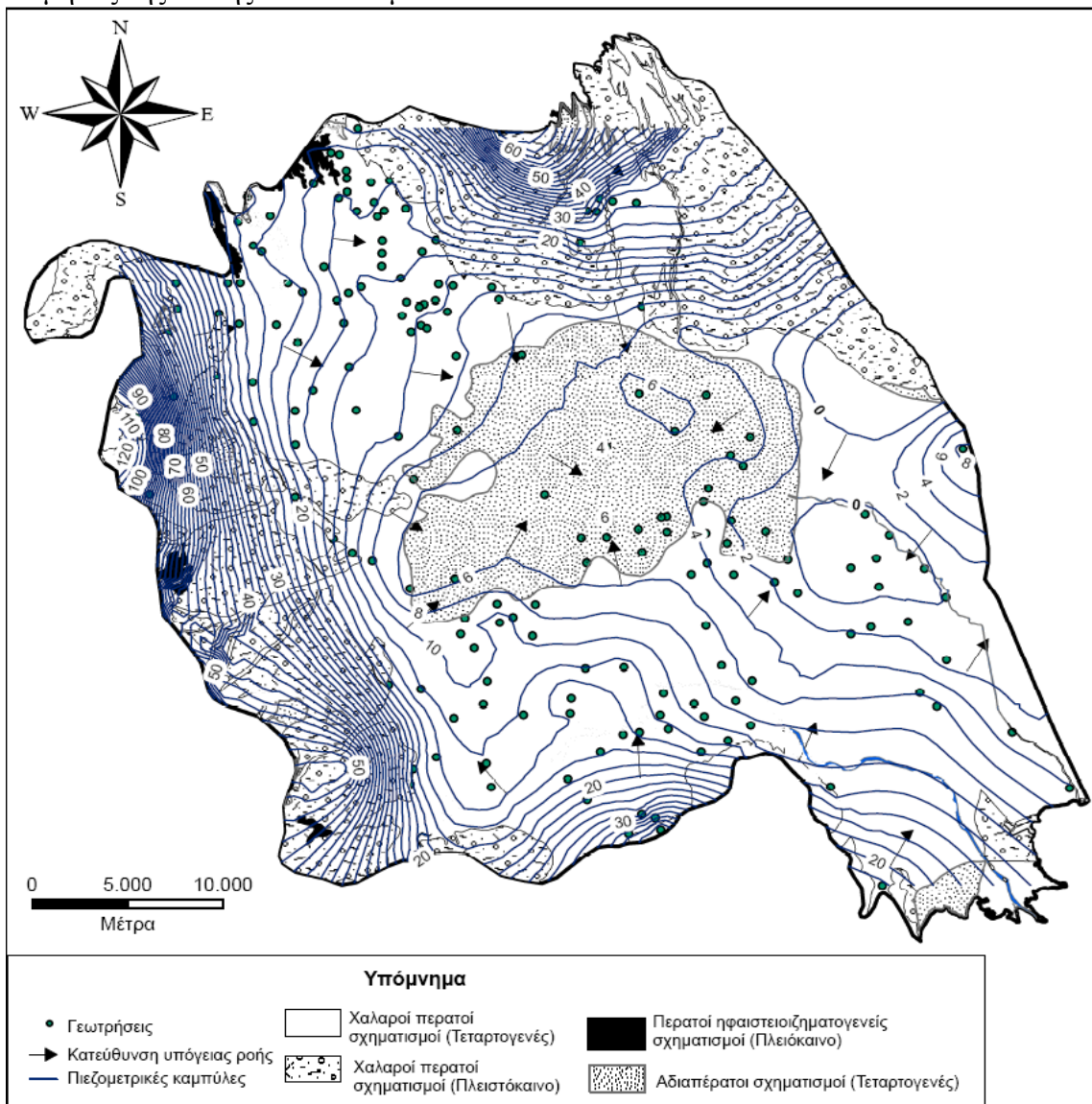
Το υδροφόρο σύστημα αποτελείται από επαλληλία υδροφόρων στρωμάτων που συνίσταται από άμμους, χάλικες, κροκαλοπαγή, ηφαιστειοκλαστικούς σχηματισμούς, μαργαϊκούς ασβεστόλιθους και ψαμμίτες που διαχωρίζονται μεταξύ τους από στρώματα αργίλων και μαργών, που όμως δεν είναι αρκετά στεγανά ώστε να παρεμποδίσουν την υδραυλική επικοινωνία των ρηχών με τους βαθείς υδροφορείς. Πρόκειται για ένα σύστημα υπό πίεση έως μερικώς υπό πίεση και στο σύνολο του χαρακτηρίζεται από σημαντική υδροδυναμικότητα. Με βάση την υδρολιθολογική τους συμπεριφορά διακρίνονται (Εικόνα 2).

(α) *Μικροπερατοί-Μακροπερατοί χαλαροί ιζηματογενείς σχηματισμοί μεγάλης έκτασης* (1330 km²) και *υψηλής υδροδυναμικότητας*. Πρόκειται για σύγχρονες προσχώσεις Τεταρτογενούς ηλικίας και ποταμοχειμάρριες αποθέσεις Πλειστοκαινικής ηλικίας. Το υδρογεωλογικό ενδιαφέρον τους θεωρείται σημαντικό. Λόγω της ποικίλης διαφορετικού ποσοστού συμμετοχής της αργίλου, τα ιζήματα παρουσιάζουν πλευρικά διαφορές στην υδρολιθολογική τους συμπεριφορά. Η υδροπερατότητα (K) κυμαίνεται από 10⁻⁴ έως 10⁻⁶ m/s, οι παροχές των γεωτρήσεων κυμαίνονται από 30 έως 350 m³/h, ο συντελεστής υδατοαγωγιμότητας (T) κυμαίνεται από 1*10⁻⁴ έως 2,9*10⁻² m²/s και η ειδική ικανότητα (Sc) των γεωτρήσεων από 0,5 έως 87 m²/h αντίστοιχα (Εικόνα 3).

(β) *Μακροπερατός σχηματισμός μικρής έκτασης* (50 km²) και *μέτριας-καλής υδροδυναμικότητας, τοπικής σημασίας*. Πρόκειται για υδροπερατό σχηματισμό που αποτελείται από ηφαιστειοκλαστικά υλικά με παρεμβολές από κροκαλοπαγή ενδιάμεσως και παρουσιάζει αξιόλογη υδροφορία. Το πάχος του σχηματισμού κυμαίνεται από 25 έως 270 m και υπέρκειται ενός αργιλικού στεγανού σχηματισμού (Ράπτη 1995). Οι παροχές των γεωτρήσεων κυμαίνονται από 55 έως 240 m³/h, η ειδική ικανότητα (Sc) από 1,96 έως 36,4 m²/h (Εικόνα 3), η υδατοαγωγιμότητα (T) κυμαίνεται από 1,17*10⁻² έως 2,4*10⁻⁴ m²/s και ο συντελεστής της υδραυλικής αγωγιμότητας (K) κυμαίνεται από 1,1*10⁻³ έως 2,7*10⁻⁶ m/s. Ο συντελεστής εναποθήκευσης (S) είναι 1,5*10⁻³ έως 1,36*10⁻⁴.

Εκτός από τις εμφανίσεις των, τα ηφαιστειοκλαστικά υλικά έχουν σημαντική συμμετοχή σαν παρεμβολές στα κλαστικά ιζήματα στο βόριο, στο δυτικό έως και στο κεντρικό τμήμα του υδροφόρου συστήματος και αποτελούν θετικό παράγοντα για την ανάπτυξη αξιόλογης υδροφορίας.

(γ) Αδιαπέρατοι έως ελάχιστα περατοί ιζηματογενείς σχηματισμοί μικρής έκτασης (8 km²). Πρόκειται για συνεκτικά κροκαλοπαγή με μεγάλο ποσοστό αργίλου και συμπαγείς στρώσεις ερυθρών αργίλων που εντοπίζονται στο βορειοδυτικό τμήμα του υδροφόρου συστήματος και κατά μήκος της κοίτης του Αλιάκμονα.



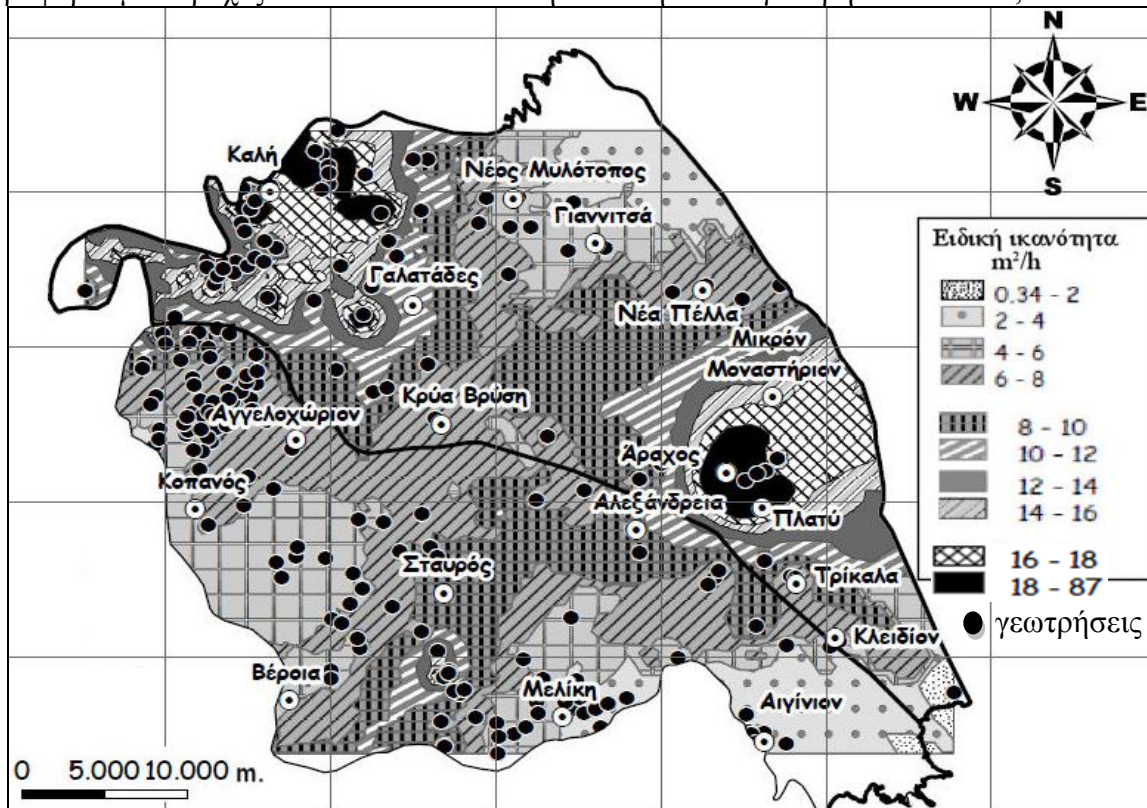
Εικόνα 2: Υδρογεωλογικός χάρτης του υδροφόρου συστήματος ποταμών κάτω ρου Αλιάκμονα και Λουδία.

(δ) Αδιαπέρατοι σχηματισμοί μεγάλης έκτασης (250 km²). Εντοπίζονται στην περιοχή της αποξηραμένης λίμνης Γιαννιτσών, έχουν μικρό πάχος και αποτελούνται από αργίλους, πηλούς, αμμοπηλούς, κάτω όμως από τους σχηματισμούς αυτούς αναπτύσσονται αξιόλογα υδροφόρα συστήματα σε εναλλαγές άμμων με αργίλους και κροκαλοπαγή.

Το βάθος των υδρογεωτρήσεων κυμαίνεται από 30 έως 400 m με γεωμετρικό μέσο 150m. Το πάχος της ακόρεστης ζώνης κυμαίνεται από 2 έως 145 m με γεωμετρικό μέσο τα 21 m και αποτελείται σε μεγάλο ποσοστό (60%) από ημιπερατά υλικά όπως εναλλαγές αργίλων με άμμους, χαλίκια, κροκάλες ή μίγματα αυτών. Ένα ποσοστό 22% συνίσταται από αδιαπέρατα υλικά (άργιοι, μάργες) και το υπόλοιπο 18% από περατά υλικά (άμμοι, κροκάλες). Το συνολικό πάχος των υδροφόρων στρωμάτων κυμαίνεται από 4 έως 145m με γεωμετρικό μέσο τα 32m. Η ποσοστιαία συμμετοχή των υδροφόρων στρωμάτων στο

συνολικό μήκος διάτρησης της γεώτρησης κυμαίνεται από 4 έως 60% με γεωμετρικό μέσο 24% και εφόσον το πάχος των ιζημάτων που ενδιαφέρει την υδρογεωλογική έρευνα φθάνει μέχρι βάθος 650 m, το πάχος του υδροφόρου συστήματος υπολογίζεται στα 150 m.

Στο περισσότερο τμήμα το υδροφόρο σύστημα χαρακτηρίζεται από σημαντική υδροφορία με παροχές 40-300 m³/h. Η ειδική ικανότητα των γεωτρήσεων είναι 3,7 m²/h



Εικόνα 3: Χάρτης κατανομής της ειδικής ικανότητας των υδρογεωτρήσεων στο υδροφόρο σύστημα ποταμών κάτω ρου Αλιάκμονα και Λουδία.

(0,17-87) και οι μεγαλύτερες τιμές (12-87 m²/h) εντοπίζονται στο νοτιοανατολικό τμήμα του, που αποτελεί και την περιοχή εκφόρτισης του, καθώς και στο δυτικό τμήμα όπου επικρατούν οι ηφαιστειοκλαστικοί σχηματισμοί (Ράπτη, 1995). Επίσης υψηλές τιμές ειδικής ικανότητας (8-14 m²/h) εντοπίζονται κατά μήκος του άξονα Άμμος-Σταυρός- περιοχή Αλεξάνδρειας που αποτελεί και την παλαιοκοίτη του Αλιάκμονα, όταν ακόμη εκφορτιζόταν στην λίμνη των Γιαννιτών (Ghilardi et. al., 2007).

5. ΠΙΕΖΟΜΕΤΡΙΑ

Το βάθος της πιεζομετρικής επιφάνειας κυμαίνεται από +0,2 (αρτεσιανές) έως 125 m με γεωμετρικό μέσο τα 4,10 m. Οι μεγαλύτερες τιμές εντοπίζονται στο λοφώδες τμήμα που αποτελεί την περιφέρεια του υδροφόρου συστήματος και οι μικρότερες στο πεδινό τμήμα αντίστοιχα. Διαπιστώνεται διαφορά στο υδραυλικό φορτίο (Dφ=1,5-4,5 m) μεταξύ των διαφορετικού βάθους υδροφορέων. Η πιεζομετρική επιφάνεια στους βαθείς υδροφορείς είναι σε μικρότερο βάθος απ ότι στους ρηχούς αντίστοιχα.

Παρατηρείται εποχιακή διακύμανση της πιεζομετρικής επιφάνειας. Στο δυτικό τμήμα του συστήματος, όπου επικρατούν τα Πλειστοκαινικά ιζήματα, με το χαμηλότερο συντελεστή υδραυλικής αγωγιμότητας, η διακύμανση (Ds) είναι 2,0 έως 10,9 m, ενώ στο πεδινό κεντρικό και νότιο τμήμα, όπου επικρατούν τα Τεταρτογενή ιζήματα και είναι η περιοχή

εκφόρτισης του συστήματος, η διακύμανση είναι 0,2 έως 2,0 m αντίστοιχα. Η μέση τιμή υπολογίζεται από το αρχείο raster στο GIS που είναι: $D_s=2,57m$ ($n=235$) και τα 0,25 m αποδίδονται στην άντληση από τα μόνιμα αποθέματα.

Παρατηρείται γενικά ακτινωτή ροή από την περιφέρεια προς το κεντρικό τμήμα στο χώρο της αποξηραμένης λίμνης Γιαννιτσών, που είναι και η περιοχή εκφόρτισης του συστήματος. Οι μεγαλύτερες υδραυλικές κλίσεις παρατηρούνται στο ανατολικό, βόρειο και στο δυτικό τμήμα (Εικόνα 2). Στο πεδινό τμήμα οι πιεζομετρικές καμπύλες είναι αραιές που σημαίνει καλή υδατοαγωγιμότητα και καλή υδραυλική αγωγιμότητα. Στη λοφώδη περιοχή όπου επικρατούν οι Πλειστοκαινικές αποθέσεις ή τα Νεογενή ιζήματα, η υδραυλική κλίση και η εποχιακή διακύμανση της πιεζομετρικής επιφάνειας έχουν μεγαλύτερες τιμές. Οι μεγαλύτερες υδραυλικές κλίσεις παρατηρούνται στο Β-ΒΔ τμήμα του συστήματος (20-25%), αλλά γενικά κυμαίνονται από 7,0-1,5‰ με τις μικρότερες τιμές να φθάνουν 0,8 έως 0,5‰ στην περιοχή του Πλατέως. Στην περιοχή Πλατύ-εκβολές Λουδία και στο δέλτα του Αλιάκμονα οι υδραυλικές κλίσεις είναι πολύ χαμηλές γεγονός που καθιστούν τα τμήματα αυτά του υδροφόρου συστήματος ευαίσθητα στην υφαλμύριση.

Στην περιοχή της Τάφρου 66 οι πιεζομετρικές καμπύλες είναι παράλληλες που σημαίνει ότι δεν υφίσταται υδραυλική επικοινωνία μεταξύ της τάφρου και του υδροφόρου συστήματος. Στην περιοχή ανάντη της Τάφρου 66 φαίνεται ότι γίνεται από το υδροφόρο σύστημα μικρή τροφοδοσία των υδρορεμάτων του Αν. Βερμίου.

Στο ΝΔ τμήμα ο Αλιάκμονας κατά την είσοδό του στην πεδιάδα Ημαθίας στην περιοχή Άμμος- Βαρβάρες τροφοδοτεί το σύστημα. Κατά μήκος του άξονα Βεργίνα-Κουλούρα – Σταυρός, που αποτελεί και το χαμηλότερο τοπογραφικό σημείο, φαίνεται ότι η εκφόρτιση του συστήματος γίνεται προς την περιοχή της αποξηραμένης λίμνης Γιαννιτσών. Προς το νότιο τμήμα, ο Αλιάκμονας ποταμός τέμνει υπό γωνία τις πιεζομετρικές καμπύλες που σημαίνει ότι τροφοδοτείται από το νότο από το σύστημα και το τροφοδοτεί στη συνέχεια προς τα ΒΑ (Kresic, 2007). Στο νοτιοδυτικό τμήμα, από τα υδρορέματα της λοφώδους περιοχής φαίνεται ότι γίνεται μερική τροφοδοσία του συστήματος. Στην περιοχή νότια των ΔΔ Κορυφής και Πρασινάδας γίνεται εκφόρτιση του συστήματος προς τον Αλιάκμονα. Στο κεντρικό και νότιο τμήμα του συστήματος η κατεύθυνση της υπόγειας ροής είναι σταθερά $NN\Delta \rightarrow BBA$ μέχρι την κοίτη του Λουδία. Στις περιοχές Πλατύ, Άραχος, Μικρό Μοναστηράκι, κατά μήκος του εθνικού δρόμου Χαλκηδόνα-Πέλλα και νοτιότερα απ αυτόν παρατηρούνται αρνητικά απόλυτα υψόμετρα της πιεζομετρικής επιφάνειας (Εικόνα 2).

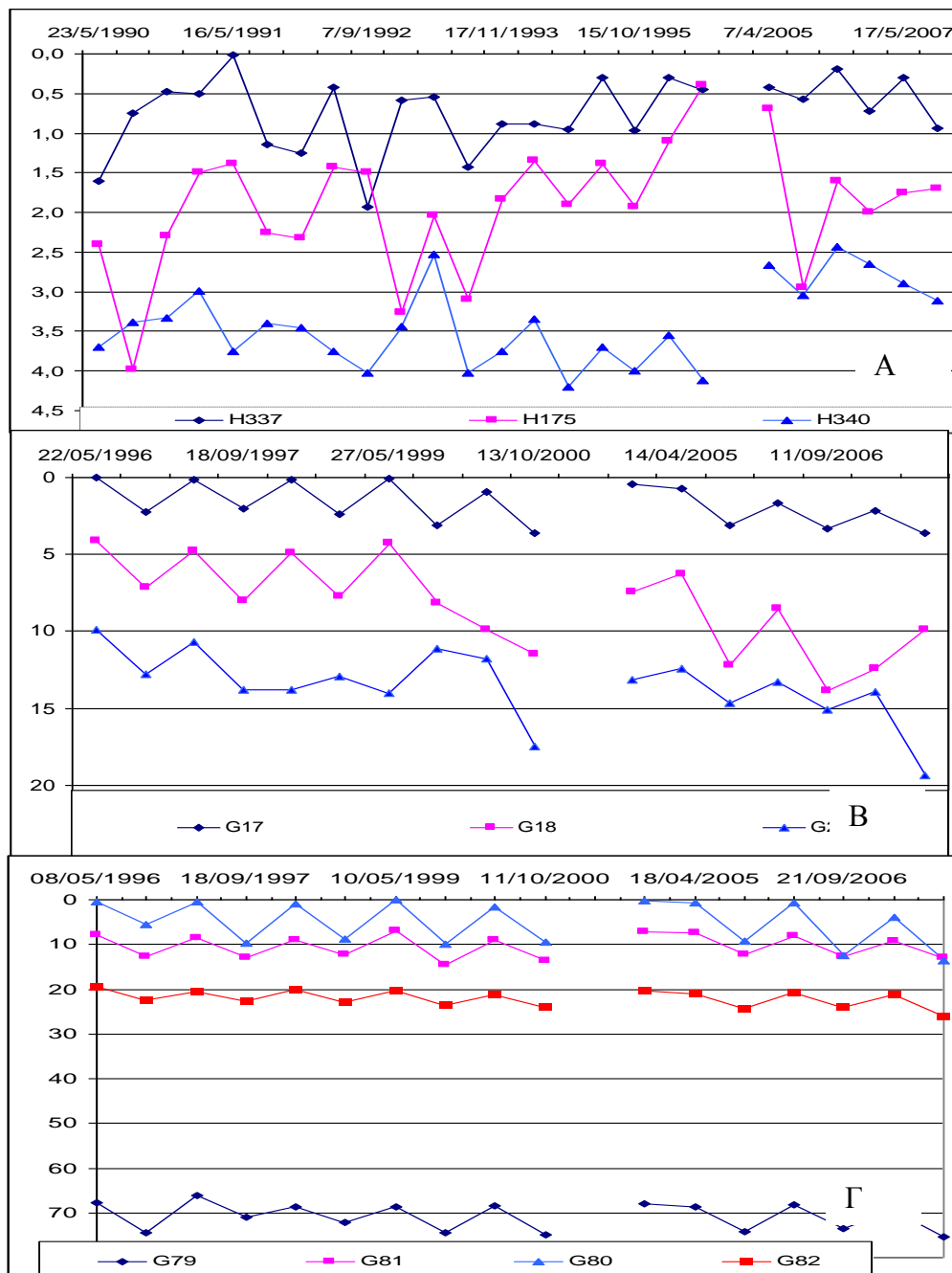
Μετά την παροχέτευση των νερών του Αλιάκμονα ($516 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{yr}$) στα αρδευτικά κανάλια, που γίνεται κάθε χρόνο με την έναρξη της αρδευτικής περιόδου κατά τον Μάιο, παρατηρείται απότομη άνοδος στην πιεζομετρική επιφάνεια.

Μακράς περιόδου (1990-2007) δεδομένα από σταθμημετρήσεις σε εβδομήντα πέντε (75) αρδευτικές γεωτρήσεις στο Β-ΒΔ τμήμα του συστήματος δείχνουν διαχρονική ταπείνωση της πιεζομετρικής επιφάνειας στην περιοχή αυτή που αποδίδεται στις υπεραντλήσεις. Αντίθετα στο κεντρικό ή στο νότιο τμήμα του συστήματος και ιδιαίτερα στην περιοχή μεταξύ των ποταμών Αλιάκμονα και Λουδία, όπου η άρδευση γίνεται μόνο από επιφανειακά νερά, παρατηρείται κατά θέσεις ακόμη και άνοδος της πιεζομετρικής επιφάνειας (Εικόνα 4), (Βεράνης κ.ά., 2010).

6. ΥΔΑΤΙΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ

Εισροές: Από την επεξεργασία δεδομένων των μετεωρολογικών σταθμών της περιοχής, προκύπτει ότι τα μέσα ετήσια κατακρημνίσματα στο υδροφόρο σύστημα κατά την περίοδο 1980-2007 είναι 549mm. Η μέση ετήσια πραγματική εξατμισοδιαπνοή υπολογίζεται ότι είναι 412mm και η ωφέλιμη απορροή είναι 137mm (Βεράνης κ.α., 2010). Η μέση κατείσδυση

υπολογίζεται με βάση την κατανομή των πετρωμάτων στον ψηφιακό γεωλογικό χάρτη και τα βιβλιογραφικά δεδομένα (Σούλιος 2004, Ράπτη 1995) ότι είναι 67 mm/yr (11%). Η επιφανειακή απορροή υπολογίζεται από την εξίσωση του υδρολογικού ισοζυγίου και είναι 70 mm/yr. Εκτός από την άμεση κατείσδυση, η τροφοδοσία του υδροφόρου συστήματος γίνεται από διήθηση των επιφανειακών νερών των τάφρων αποστράγγισης, μέσω των αρδευτικών καναλιών και από την υπόγεια πλευρική διήθηση νερών από τους ορεινούς όγκους Πάικου και Βερμίου. Σημαντική τροφοδοσία συμβαίνει επίσης από τις επιστροφές του αρδευτικού νερού που είναι 15-25% των καταναλώσεων (ENM & Ειδικοί Σύμβουλοι, 2008).



Εικόνα 4: Εποχιακές μεταβολές του βάθους της πιεζομετρικής επιφάνειας στο υδροφόρο σύστημα κάτω ρου Αλιάκμονα –Λουδία. Α=κεντρικό τμήμα, Β=Ανατολικό τμήμα και Γ= Δυτικό τμήμα.

Με βάση τα δεδομένα από λιθολογικές τομές σε 300 υδρογεωτρήσεις, τις παρατηρήσεις πεδίου και τη βιβλιογραφία εκτιμάται ότι η μέση τιμή ενεργού πορώδους είναι $n_e = 7\%$ (Βεράνης κ.ά., 2010, Ράπτη, 1995, Σούλιος, 2004). Από τη σχέση $V_p = E \cdot D_s \cdot n_e$ προκύπτει ότι τα ρυθμιστικά αποθέματα είναι $V_p = 1.638 \text{ km}^2 \cdot 2,32 \text{ m} \cdot 0,07 = 266 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{yr}$. Από αυτά ένα ποσοστό εκφορτίζεται προς την περιοχή της αποξηραμένης λίμνης Γιαννιτσών ή τον Αλιάκμονα ποταμό και το υπόλοιπο αντλείται για την ικανοποίηση των καταναλώσεων.

Εκροές: Οι εκροές διακρίνονται στις ποσότητες νερών που αντλούνται και στην φυσική εκφόρτιση. Οι καταναλώσεις από αντλήσεις υπόγειων νερών είναι για την ύδρευση ($25,2 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{yr}$), τη βιομηχανία και τη βιοτεχνία ($8,8 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{yr}$) και την κτηνοτροφία ($2,7 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{yr}$). Οι αρδευθείσες εκτάσεις κατά το 2005-08 στο υδροφόρο σύστημα ανέρχονται σε 900.000 στρ. περίπου, από τα οποία τα 500.000 στρ. αρδεύονται από επιφανειακά νερά και τα υπόλοιπα 400.000 στρ. από αντλήσεις υπόγειων νερών. Χωρικά οι αντλήσεις υπόγειων νερών για την άρδευση εντοπίζονται στο ανατολικό, βόριο και δυτικό τμήμα του υδροφόρου συστήματος, ενώ στο κεντρικό και στο περισσότερο από το νότιο τμήμα οι εκτάσεις αρδεύονται από επιφανειακά ή πηγαία νερά που προέρχονται από περιοχές εκτός του υδροφόρου συστήματος.

Λαμβάνοντας υπόψη την στρεμματική κατανομή των διαφόρων καλλιεργειών στην περιοχή μελέτης, τα βιβλιογραφικά δεδομένα για τις αναγκαίες ποσότητες νερού σε σχέση με το είδος της καλλιέργειας και τη θερμοκρασία με τη μέθοδο Penman-Monteith εκτιμάται ότι μέση ποσότητα νερών που απαιτείται είναι $550 \text{ m}^3/\text{στρ.}$ (ENM & Ειδικοί Σύμβουλοι, 2008), που αντιστοιχεί σε ποσότητες νερών της τάξης των $220 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{yr}$ που αντλούνται από το υδροφόρο σύστημα. Οι συνολικές ποσότητες που αντλούνται ανέρχονται σε $257 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{yr}$.

Αποτέλεσμα των υπεραντλήσεων είναι το αρνητικό υδρολογικό ισοζύγιο που εκφράζεται με την ταπείνωση της πιεζομετρικής επιφάνειας ιδιαίτερα στις περιοχές που ασκούνται οι μεγαλύτερες πιέσεις στο υδροφόρο σύστημα. Η μέση τιμή ταπείνωσης της πιεζομετρικής επιφάνειας στο διάστημα 2005-08 υπολογίσθηκε με βάση το αρχείο raster που έγινε στο GIS και είναι 25 cm/y . Έτσι, οι ποσότητες νερών που αντλούνται από τα μόνιμα αποθέματα είναι: $V_\mu = 1.638 \text{ km}^2 \cdot 0,25 \text{ m} \cdot 0,07 = 28,6 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{yr}$.

Ο Λουδίας είναι ο αποδέκτης της φυσικής εκφόρτισης του συστήματος, της περίσσειας των αρδευτικών νερών των καναλιών και των επιστροφών του αρδευτικού νερού στο υδροφόρο σύστημα και παρουσιάζει ροή μόνο κατά τη θερινή περίοδο που ανέρχεται σε $15\text{-}20 \text{ m}^3/\text{s}$ (Πανώρας και Χατζηγιαννάκης, 1992).

7. ΥΔΡΟΧΗΜΕΙΑ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕΡΩΝ

7.1 ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ ΚΑΙ ΧΗΜΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

Δείγματα νερών για χημικές αναλύσεις και φυσικοχημικούς προσδιορισμούς συλλέχθηκαν κατά το χρονικό διάστημα 2004-2008 σε τριακόσιες τριάντα (330) γεωτρήσεις που είναι σχετικά ομοιόμορφα κατανομημένες στο υδροφόρο σύστημα και στις εκατό πέντε (105) από αυτές πραγματοποιήθηκαν επαναληπτικές δειγματοληψίες και χημικές αναλύσεις. Επίσης αξιοποιήθηκαν κατάλληλα δεδομένα χημικών αναλύσεων νερών από προηγούμενες έρευνες του ΙΓΜΕ στην περιοχή που εκτελέστηκαν κατά το διάστημα 1985-2001. Οι δειγματοληψίες πραγματοποιήθηκαν κύρια κατά τις θερινές περιόδους. Τα δείγματα αναλύθηκαν για τα στοιχεία: Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , Cl^- , NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , PO_4^{2-} , SiO_2 , F, B, Fe, Mn, As, Cr, Pb, Zn, Cu, Cd, Co, Ni, Sb, Mo, Se, Sr. Η μέθοδος δειγματοληψίας και χημικών προσδιορισμών, τα αναλυτικά αποτελέσματα των προσδιορισμών υπαίθρου και εργαστηρίου είναι καταχωρημένα σε βάση δεδομένων καθώς και οι υδροχημικοί χάρτες κατανομής των κύριων στοιχείων και ιχνοστοιχείων παρουσιάζονται σε προηγούμενες εργασίες του ΙΓΜΕ (Βεράνης κ.ά., 2010). Από τον έλεγχο της αξιοπιστίας των χημικών

αναλύσεων με τη γνωστή μέθοδο της μεταξύ τους ισορροπίας των ανιόντων και κατιόντων, διαπιστώθηκε ότι είναι μέσα στα αποδεκτά όρια: $(\Sigma C - \Sigma A) / (\Sigma C + \Sigma A) * 100 \leq 5\%$, όπου: ΣC =το άθροισμα των κατιόντων, ΣA = το άθροισμα των ανιόντων (Hounslow, 1995).

7.2. ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕΡΩΝ

Στον πίνακα 1 παρουσιάζονται οι πλέον συνήθεις στατιστικοί παράμετροι των υπόγειων νερών του υδροφόρου συστήματος.

Πίνακας 1: Κύριοι στατιστικοί παράμετροι της ποιότητας των υπόγειων νερών στο υδροφόρο σύστημα ποταμών κάτω ρου Αλιάκμονα & Λουδία.

α/α	M.O	±SD	MIN	MAX	25 ^(*)	50 ^(*)	75 ^(*)	95 ^(*)	97,5 ^(*)
pH	7,69	0,66	6,9	8,64	7,56	7,7	7,88	8,2	8,29
Αγωγιμότητας μS/cm	580	363	182	4517	460	547	673	1205	1534
mg/l									
Ca	52,9	23,9	6,8	158,0	35,6	50,0	65,7	97,5	104,0
Mg	30,3	19,6	2,2	143,0	15,5	29,0	39,1	64,6	75,5
Na	26,2	57,6	2,0	750,0	8,0	13,0	21,0	86,0	168,0
K	3,11	2,61	0,8	17,0	2,0	2,0	4,0	8,9	10,0
HCO ₃	278,0	102,0	82,0	640,0	218,0	277,0	339,0	434,0	494,0
Cl	30,8	85,7	2,0	1276,0	10,6	16,0	25,5	72,3	115,0
SO ₄	31,9	36,1	0,2	230,0	9,9	23,0	46,0	100,0	135,0
NO ₃	15,4	16,7	0,5	234,0	3,96	11,0	20,4	48,3	62,9
NO ₂	0,75		<0,001	1,45	<0,001	0,001	0,02	0,05	0,09
NH ₄	0,05		<0,001	1,5	0,01	0,01	0,06	0,18	0,3
PO ₄	0,23		<0,05	8,04	0,05	0,2	0,31	0,67	0,8
μgr/l									
Fe	102	630	5	8878	5	10	40	258	490
Mn	34	88	5	716	6	16	33	113	135
As	<5		<4	208	<4	<4	<4	15	25
Cr	<5		<5	90	<5	<5	15	40	60
F	174		<100	1600	<100	160	300	560	650
B	192		<10	4100	43	115	300	500	670

^(*) % της καμπύλης αθροιστικής συχνότητας των δειγμάτων (n=330)

Τα νερά είναι γενικώς αλκαλικά με $pH=7,69$ (6,90-8,64) και η *αγωγιμότητα* των κυμαίνεται από 182 έως 4517 $\mu S/cm$ με γεωμετρική μέση τιμή 580 $\mu S/cm$. Οι μεγαλύτερες τιμές της αγωγιμότητας (>1500 $\mu S/cm$) εντοπίζονται στις παράκτιες περιοχές, κατά μήκος του ποταμού Λουδία, στο δέλτα του Αλιάκμονα και σε εγκλωβισμένους βαθείς υδροφορείς που εντοπίζονται στο κεντρικό τμήμα του υδροφόρου συστήματος. Οι χαμηλότερες τιμές της αγωγιμότητας εντοπίζονται στο νότιο και στο δυτικό τμήμα και σχετίζονται με εμπλουτισμό από τη διήθηση επιφανειακών νερών του Αλιάκμονα, νερά πηγών του Βερμίου ή όμβριων υδάτων από τα Πιέρια όρη. Οι *θερμοκρασίες* των υπόγειων νερών αναλόγως και του βάθους της γεώτρησης κυμαίνονται από 12⁰C στις ρηχές και φθάνει έως 25⁰ C σε γεωτρήσεις βάθους 400 m. Το *διαλυμένο οξυγόνο* (DO) κυμαίνεται από 1,1 έως 8,2 mg/l με γεωμετρικό μέσο τα 5,2 mg/l. Οι μικρότερες τιμές εντοπίζονται στους βαθείς υπο πίεση υδροφορείς και οι μεγαλύτερες στους ρηχούς υδροφορείς.

Οι τιμές του *ασβεστίου* κυμαίνονται από 7 έως 158 mg/l με μέση τιμή 50 mg/l και του *μαγνησίου* είναι από 2 έως 143 mg/l με μέση τιμή 29 mg/l.

Τα *χλωριόντα* κυμαίνονται από 3,5 έως 1276 mg/l με γεωμετρικό μέσο τα 16 mg/l. Οι τιμές του *νατρίου* κυμαίνονται από 2 έως 750 mg/l με γεωμετρικό μέσο τα 13 mg/l. Οι υψηλότερες τιμές στα *χλωριόντα* και στο *νάτριο* εντοπίζονται σε υδροφορείς κατά μήκος του Λουδία ποταμού, στην παράκτια περιοχή, στο δέλτα του ποταμού Αλιάκμονα και σε εγκλωβισμένους βαθείς υδροφορείς που εντοπίζονται στο κεντρικό τμήμα του υδροφόρου συστήματος. Η κατεύθυνση αύξησης του λόγου Cl/HCO_3^- (σε meq/l) συμπίπτει κατά προσέγγιση με τη κατεύθυνση κίνησης του υπόγειου νερού που προκύπτει από τους πιεζομετρικούς χάρτες. Κατά την πορεία κίνησης του υπόγειου νερού ο λόγος Cl/HCO_3^- αυξάνεται λόγω αυξημένης προσφοράς από διάλυση του χλωρίου και της ελαττωμένης προσφοράς του HCO_3^- αντίστοιχα (Hounslow, 1995). Στην περιοχή του Πλατύ κατά μήκος του Λουδία ο λόγος Cl/HCO_3^- λαμβάνει τιμές 2-50 που αποδίδονται και στην υφαλμύριση. Στο παρελθόν, η χαμηλή ταχύτητα ροής του ποταμού Λουδία συνέβαλλε στην δημιουργία των κατάλληλων συνθηκών για την είσοδο της θάλασσας κατά την παλίρροια σε μεγάλο βάθος που έφθανε μέχρι την περιοχή Πλατύ-Αλεξάνδρεια, αλλά η διαδικασία αυτή παρεμποδίστηκε από δύο χωμάτινα θυροφράγματα που τοποθετήθηκαν μέσα στην κοίτη του (Πανώρας και Χατζηγιαννάκης, 1992). Επίσης η κατασκευή των φραγμάτων στον ποταμό Αλιάκμονα συνέβαλε στην επέκταση της θάλασσας στην περιοχή του δέλτα (ENM & Ειδικό Σύμβουλο, 2008). Στο κεντρικό και δυτικό τμήμα του υδροφόρου συστήματος εντοπίζονται κατά θέσεις υφάλμυροι εγκλωβισμένοι βαθείς υδροφορείς σε Νεογενείς αποθέσεις (ψαμμίτες, μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι) που αποδίδονται σε κακές συνθήκες αποστράγγισης της εβαποριτικής λεκάνης (Mazor, 2004, Κολιός κ.ά., 2005).

Οι συγκεντρώσεις των *νιτρικών ριζών* (NO_3^-) κυμαίνονται από 0,5 έως 234 mg/l με γεωμετρικό μέσο τα 11 mg/l. Σε ποσοστό 4,3% των γεωτρήσεων οι τιμές των νιτρικών ριζών υπερβαίνουν το ανώτατο όριο για το πόσιμο νερό που είναι 50 mg/l (European Union Council, 1998). Σύμφωνα με δεδομένα της περιόδου 1985-2008, οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις νιτρικών ριζών εντοπίζονται στο βόρειο, στο δυτικό τμήμα και σε ορισμένες περιοχές του ανατολικού τμήματος παρουσιάζουν διαχρονικά αυξητικές τάσεις. Οι περιοχές αυτές δομούνται από ηφαιστειοκλαστικά υλικά, ερυθρές αργίλους, ποταμοχειμάρριες αποθέσεις, Νεογενή ιζήματα (Εικόνα 1) και επικρατούν οι οξειδωτικές συνθήκες. Αντίθετα στο πεδινό κεντρικό και νότιο τμήμα, οι συγκεντρώσεις των νιτρικών είναι φυσιολογικές (<10 mg/l NO_3^-) και δεν παρουσιάζουν αυξητικές τάσεις. Οι κύριες αιτίες για τη νιτρορύπανση είναι τα νιτρικά λιπάσματα, ακολουθούν τα οικιστικά λύματα και τα κτηνοτροφικά απόβλητα. Παρόλο που γίνονται εντατικές καλλιέργειες στην περιοχή του κεντρικού και νότιου τμήματος, με υπερβολική χρήση νιτρικών λιπασμάτων, οι τιμές των νιτρικών δεν είναι αυξημένες. Αυτό αποδίδεται στις διαδικασίες αυτοκαθαρισμού του υδροφορέα που εξαρτάται από το ποσοστό και το είδος των υπολειμμάτων της οργανικής ύλης καθώς και των θειούχων ενώσεων του σιδήρου που περιέχονται στα ιζήματα. Λόγω της παρουσίας υπολειμμάτων οργανικής ύλης στα ιζήματα της ακόρεστης ζώνης και του υδροφορέα της πεδινής περιοχής, επικρατούν οι αναγωγικές συνθήκες και στην περίπτωση αυτή γίνεται η μετατροπή των νιτρικών σε νιτρώδη, αμμωνία ή και αέριο άζωτο. Χαμηλό δυναμικό απονιτροποίησης περιέχουν οι ποταμοχειμάρριες αποθέσεις επειδή περιέχουν χαμηλό ποσοστό οργανικής ύλης και υψηλό οι λεπτόκοκκες ποτάμιες, λιμναίες, ελώδης (σαπροπηλοί), δελταϊκές και παράκτιες αποθέσεις αντίστοιχα επειδή περιέχουν οργανική ύλη και σουλφίδια. Οι θαλάσσιες αποθέσεις παρουσιάζουν ενδιάμεσο δυναμικό απονιτροποίησης (Bachman & Krantz, 2000).

Η οδηγία πλαίσιο 2000/60 (article 17.2a & 17.2b) και η θυγατρική της 2006/118/EK, προβλέπουν ότι τα κράτη μέλη πρέπει να εκτιμήσουν τη χημική κατάσταση των υπόγειων νερών με τη χρήση τιμών κατωφλίου (threshold value). Οι τιμές threshold που έχουν καθορισθεί

για το εν λόγω υδροφόρο σύστημα είναι τα 27 mg/l NO₃, οι τιμές παρέμβασης και λήψης μέτρων είναι τα 22 mg/l NO₃ που αντιστοιχεί στο 75% των δειγμάτων (Βεράνης κ.ά., 2010).

Τα νιτρώδη (NO₂⁻) κυμαίνονται από <0,001 έως 1,45 mg/l και τα ιόντα αμμωνίου (NH₄⁺) κυμαίνονται από <0,001 έως 1,5 mg/l.

Οι συγκεντρώσεις του σιδήρου και μαγγανίου σε αρκετές γεωτρήσεις υπερβαίνουν τα όρια που έχουν θεσπισθεί για το πόσιμο νερό (200 µg/l Fe, 50 µg/l Mn). Οι τιμές του μαγγανίου κυμαίνεται από 5 έως 716 µg/l με γεωμετρικό μέσο τα 16 µg/l, ενώ οι τιμές του σιδήρου κυμαίνονται από 5 έως 8878 µg/l με γεωμετρικό μέσο τα 10 µg/l. Η υπέρβαση από το ανώτατο επιτρεπτό όριο για το μαγγάνιο παρουσιάζεται στο 15% των γεωτρήσεων που έγιναν προσδιορισμοί και για το σίδηρο ανέρχεται στο 7% αντίστοιχα. Οι τιμές του αρσενικού γενικά είναι γενικά χαμηλές (< 4 µg/l). Εξαιρούνται όμως οι περιοχές Νεοχωρίου, Σχοινά, Άραχου, Πλατέως, Λειανοβεργίου, Τρικάλων, όπου σε υδρευτικές και αρδευτικές γεωτρήσεις διαπιστώθηκαν σχετικά υψηλές τιμές αρσενικού (10-208 µg/l), που αντιστοιχούν στο 4,7% των δειγμάτων και υπερβαίνουν το ανώτατο επιτρεπτό όριο των 10 µg/l για το πόσιμο νερό (Βεράνης, 2008). Οι υψηλές τιμές στα ιχνοστοιχεία μαγγάνιο, σίδηρο και αρσενικό χωρικά σχετίζονται με τα υπολείμματα οργανικής ύλης που απαντώνται σε σαπροπηλούς, μαύρες και γκρίζες αργίλους. Λόγω της αποσύνθεσης της οργανικής ύλης από αναερόβια βακτήρια, δημιουργούνται αναγωγικές συνθήκες και στην περίπτωση αυτή αποσταθεροποιούνται τα σιδηρο-οξείδια, μαγγανο-οξείδια στα οποία ήταν μερικώς προσροφημένο το αρσενικό. Ποσοστό του αρσενικού είναι επίσης προσροφημένο και σε αργιλικά ορυκτά. Διαπιστώθηκε επίσης θετική συσχέτιση μεταξύ των υψηλών τιμών σε αρσενικό και των φωσφορικών ριζών (PO₄³⁻) που αποδίδεται στις ομοιότητες στην υδροχημική συμπεριφορά μεταξύ των H₃AsO₄ και H₃PO₄ (Smedley and Kinniburgh, 2002, Cheng et. al., 2009). Γενικά τα αρσενικούχα νερά του υδροφόρου συστήματος χαρακτηρίζονται από υψηλές τιμές σε Mn, ±Fe, NH₄, NO₂, ±PO₄, με αντίστοιχα χαμηλές τιμές σε NO₃, SO₄ και σε μερικές περιπτώσεις αναφέρεται η παρουσία μεθανίου. Οι σχετικά υψηλές τιμές στα ιχνοστοιχεία μαγγάνιο, σίδηρο, αρσενικό και σπανιότερα NH₄, αποτελούν ένα από τα κύρια προβλήματα για την ανεύρεση πόσιμου νερού στο κεντρικό και νότιο τμήμα του συστήματος. Για την επίλυση του προβλήματος αυτού σε δυο θέσεις στα ΔΔ Πρασινάδας και Κορυφής στο Δήμο Πλατέως έγιναν με επιτυχία κατασκευές υδρευτικών γεωτρήσεων με υδραυλική απομόνωση των επιβαρυσμένων στρωμάτων (σαπροπηλοί, μαύρες αργίλοι), (Βεράνης κ.ά., 2010).

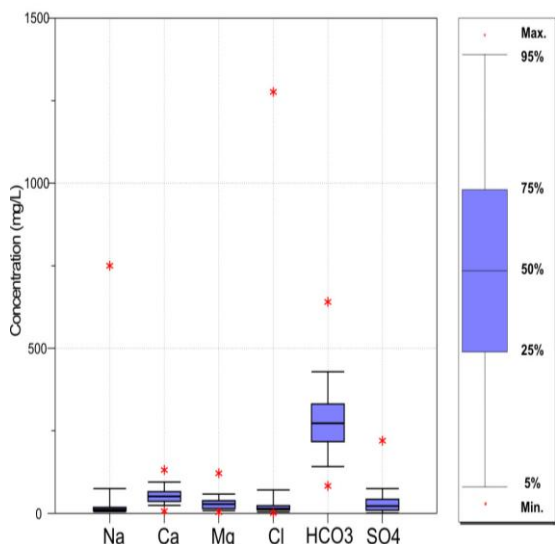
Οι τιμές του χρωμίου κυμαίνονται από <5 έως 90 µg/l. Οι γεωτρήσεις με τις σχετικά αυξημένες τιμές στο χρώμιο (50-90 µg/l) αντιστοιχούν στο 2% των δειγμάτων και χωρικά, γενετικά σχετίζονται με τα προϊόντα διάβρωσης και μεταφοράς των υλικών από τα υπερβασικά πετρώματα που εντοπίζονται στο όρος Βέρμιο. Το χρώμιο περιέχεται στους κόκκους του χρωμίτη που είναι διάσπαρτοι μέσα στα αλλουβιακά ιζήματα είναι σχετικά ακίνητο, αλλά συναντάμε και χρώμιο που έχει προσροφηθεί στα οξείδια του μαγγανίου ή στα αργιλικά ορυκτά που κάτω από οξειδωτικές συνθήκες και σε αλκαλικό περιβάλλον είναι ευδιάλυτο (Guertin et. al., 2005).

Οι συγκεντρώσεις των φωσφορικών ριζών, των θειικών ριζών, του φθορίου και του βορίου είναι σε χαμηλές τιμές (Πιν. 1). Σε τρεις μόνο γεωτρήσεις διαπιστώθηκαν σχετικά αυξημένες τιμές στο βόριο που είναι 1,6 - 4,5 mg/l. Τα ιχνοστοιχεία: Pb, Zn, Cu, Cd, Co, Mo, Ni, Sb, Se απαντούν επίσης σε πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις.

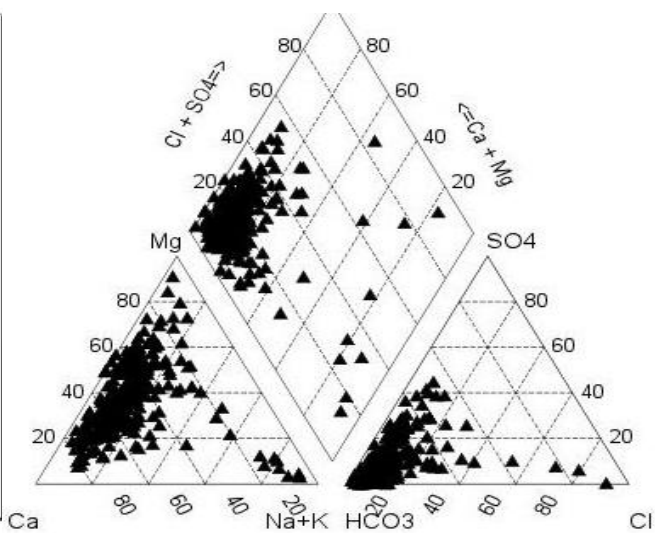
7.3. ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕΡΩΝ

Η επεξεργασία των χημικών αναλύσεων έγινε με το λογισμικό Aqua Chem 5. Σύμφωνα με το διάγραμμα Box –Whisker (Εικόνα 5) η σειρά των κύριων ιόντων στα υπόγεια νερά του υδροφόρου συστήματος είναι: Ca>Mg>Na και HCO₃>SO₄>Cl. Από τα γνωστά

διαγράμματα Piper (Εικόνα 6) προκύπτει ότι επικρατούν οι τύποι $\text{Ca}\pm\text{Mg}-\text{HCO}_3$, που σημαίνει μετεωρική προέλευση νερών, με αντιδράσεις ιοντοανταλλαγής και τον εμπλουτισμό τους σε μαγνήσιο και νάτριο, χλώριο (Edmunds and Shand, 2008, Hounslow, 1995). Οι τύποι αυτοί εντοπίζονται κύρια στο ανατολικό και βόρειο έως δυτικό τμήμα. Εκεί παρουσιάζονται επίσης οι τύποι $\text{Ca}\pm\text{Mg}-\text{HCO}_3+\text{SO}_4$ και ο εμπλουτισμός σε θεικές ρίζες σχετίζονται χωρικά με τις ενστρώσεις των ηφαιστειακών τόφων. Στο κεντρικό έως το νότιο τμήμα εντοπίζονται κατά θέσεις οι τύποι: $\text{Na}-\text{Ca}\pm\text{Mg}-\text{HCO}_3\pm\text{SO}_4$, $\text{Na}-\text{HCO}_3\pm\text{Cl}$, $\text{Na}\pm\text{Mg}\pm\text{Ca}-\text{Cl}$, που αποδίδονται σε αντιδράσεις ιοντοανταλλαγής και σε ανάμειξη-διάλυση με υφάλμυρα νερά.



Εικόνα 5: Διάγραμμα Box –Whisker



Εικόνα 6: Διαγράμματα Piper

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το υδροφόρο σύστημα κάτω ρου Αλιάκμονα-Λουδία φιλοξενείται σε επαλληλία ιζημάτων Τεταρτογενούς και Νεογενούς ηλικίας υπό πίεση έως μερικώς υπό πίεση. Στο περισσότερο τμήμα του χαρακτηρίζεται από σημαντική υδροφορία με παροχές 40-300 m^3/h . Η ειδική ικανότητα των γεωτρήσεων είναι 3,7 m^2/h (0,17-87). Η υδατοαγωγιμότητα (T) είναι $1,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ ($5,67 \cdot 10^{-5}$ έως $1,9 \cdot 10^{-2}$), η υδραυλική αγωγιμότητα (K) είναι $4,1 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ ($3,3 \cdot 10^{-6}$ έως $1,33 \cdot 10^{-3}$) και η μέση υπερετήσια διακύμανση πιεζομετρικής επιφάνειας (Ds) είναι 2,32 m (0,2-10,9). Το υδρολογικό ισοζύγιο είναι αρνητικό, ανέρχεται σε $28,6 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{yr}$ και αποδίδεται στις υπεραντλήσεις για τις αρδεύσεις που εντοπίζονται στο ανατολικό, βόρειο και βορειοδυτικό τμήμα του υδροφόρου συστήματος. Η μέση τιμή ταπείνωσης της πιεζομετρικής επιφάνειας είναι 25 cm/yr.

Προβλήματα υφαλμύρινσης παρουσιάζονται στις παράκτιες περιοχές, κατά μήκος του ποταμού Λουδία και στο δέλτα του ποταμού Αλιάκμονα. Στο κεντρικό τμήμα του συστήματος σε βαθείς υδροφορείς που φιλοξενούνται σε Νεογενείς αποθέσεις παρουσιάζονται αυξημένες τιμές αγωγιμότητας (2200 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Υπερβάσεις σχετικά με τα ανώτερα επιτρεπτά όρια για το υδρευτικό νερό εντοπίστηκαν σε μερικές γεωτρήσεις και αφορούν τα στοιχεία: μαγγάνιο, σίδηρος, αρσενικό και χρώμιο. Τα υπόγεια νερά κατατάσσονται στα χαμηλού κινδύνου αλμυρότητας και είναι κατάλληλα για άρδευση.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Βεράνης Ν., 2008. *Υδρογεωλογική αναγνώριση και αποτύπωση των συνθηκών ύδρευσης στο Δήμο Πλατέως, Ν. Ημαθίας*. Αδ. μελέτη, ΙΓΜΕ, Θεσσαλονίκη, 80 σελ.

- Βεράνης Ν., 2009. *Υδρογεωλογική αναγνώριση και αποτύπωση των συνθηκών ύδρευσης στο Δήμο Μελέτης, Ν. Ημαθίας*. Αδ. μελέτη, ΙΓΜΕ, Θεσσαλονίκη, 71 σελ.
- Βεράνης, Ν., Καλούση, Ε., Λαζαρίδου, Μ., Πρατανόπουλος, Α. & Χατζηκύρκου, Α., 2010. *Υδρογεωλογική Μελέτη Υδροφόρων Συστημάτων Κεντρικής Μακεδονίας*. Έργο Γ ΚΠΣ (2003-2009) <<Καταγραφή και Αποτίμηση των Υδρογεωλογικών Χαρακτήρων των Υπόγειων Νερών και των Υδροφόρων Συστημάτων της Χώρας>>. Αδημ. Μελέτη ΙΓΜΕ, Θεσσαλονίκη. 15 Τεύχη, Χάρτες.
- ENM & Ειδικοί Σύμβουλοι, 2008. *Ανάπτυξη Συστημάτων και Εργαλείων Διαχείρισης Υδατικών Πόρων Υδατικών Διαμερισμάτων Δυτ. Μακεδονίας, Κεντ. Μακεδονίας, Αν. Μακεδονίας και Θράκης. Σχέδια Διαχείρισης Υδατικών Πόρων των Υδατικών Διαμερισμάτων (ΣΑΕ061/3-20002 ΣΕ06130000)*. Αδημ. Μελ Υπουργείου Ανάπτυξης.
- Bachman, J. and Krantz, D., 2000. *The Potential for Denitrification of Ground Water by Coastal Plain Sediments in the Patuxent River Basin, Maryland*. USGS Fact Sheet FS-053-00.
- Cheng, H., Hu, Y., Luo, J., Xu, B., Zhao, J., 2009. *Geochemical processes controlling fate and transport of arsenic in acid mine drainage (AMD) and natural systems*. Journal of Hazardous Materials 165, pp.13-26.
- Edmunds, M. and Shand, P., 2008. *Natural Groundwater Quality*. Blackwell Publ., 469 pp.
- European Union Council, 1998. *Council directive on the quality of water intended for human consumption, 98/83/EC*. Official Journal of the Europ. Comm. 330, 32-54.
- Ghilardi M., Kunesch S., Styllas M., Fouache E., 2007. *Reconstruction of Mid-Holocene sedimentary environments in the central part of the Thessaloniki plain (Greece), based on microfaunal identification, magnetic susceptibility and grain-size analyses*. Geomorphology, Vol. 97, Issue 3-4, pp. 617-630.
- Guertin, J., Jacobs, J., Avakian, C., 2005. *Chromium (VI) Handbook*. CRC Press. 761 pp.
- Hounslow, A., 1995. *Water Quality Data. Analysis and Interpretation*. Lewis Publ., 398pp.
- Κολιός, Ν., Κουτσινός, Σ., Αρβανίτης, Α. & Καρυδάκης, Γ., 2005. *Έρευνα και Εντοπισμός Γεωθερμικών Πεδίων Περιοχής Λεκάνης Θεσσαλονίκης*. (Γ ΚΠΣ. Μελέτη Καταγραφής, Αποτίμησης, Προσομοίωσης & Αξιολόγησης των Γεωθερμικών Πεδίων Της Χώρας). Αδημ. μελέτη, ΠΜΚΜ-ΙΓΜΕ, 217 σελ.
- Kresic, N., 2007. *Hydrogeology and Groundwater modeling*, 2nd ed. CRC Press. 807 pp.
- Lalechos, N., 1986. *Correlations and observations in molassic sediments in onshore and offshore areas of Northern Greece*. Mineral Wealth 42: 7-34.
- Mazor, E., 2004. *Chemical and Isotopic Groundwater Hydrology*, 3rd edition. Taylor & Francis, UK, 439 pp.
- Πανώρας, Α., Χατζηγιαννάκης, Σ., 1992. *Εκτίμηση της παροχής και της ποιότητας των νερών του παλιρροιακού ποταμού Λουδία*. Υδροτεχνικά, Τόμ. 2, Τ.1, σελ. 25-38.
- Ράπτη, Δ., 1995. *Υδρογεωλογικές έρευνες στην περιοχή Σκύδρας-Επισκοπής (Κεντρική Μακεδονία)*. Διδ. Διατριβή, Γεωλογικό Τμήμα, ΑΠΘ, 266 σελ.
- Σούλιος, Γ., 2004. *Γενική Υδρογεωλογία*. STUDIO PRESS, Θεσσαλονίκη. 374 σελ.
- Smedley, P. and Kinniburgh, H., 2002. *A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural water*. Applied Geochemistry, V. 17: pp. 517-568.
- Τζιμούρτας, Σ., 2002. *Ποιοτική Παρακολούθηση και Έλεγχος Υδάτινων Πόρων Κ. Μακεδονίας, Ν. Ημαθίας*. ΕΡΓΟ: Β ΚΠΣ. (αδ. μελ. ΙΓΜΕ), 44 σελ.
- Veranis, N., Chrysafi, A. and Makrovassili, K., 2011. *Hydrogeological conditions of the lower reaches of Aliakmona and Loudia rivers aquifer system, Region of Central Macedonia, Northern Greece*. 9th Int. Hydrogeological Congress of Greece, Vol. 1, pp. 357-364. In Lambrakis, N., Stournaras, G. & Katsanou, K. (Editors), Advances in the Research of Aquatic Environment, XXVIII, 568 pp., SPRINGER.

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΟΥ
ΠΑΡΑΚΤΙΟΥ ΠΡΟΣΧΩΜΑΤΙΚΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΤΗΣ
ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΛΜΥΡΟΥ ΤΗΣ Π.Ε. ΜΑΓΝΗΣΙΑΣ
Χ. Μυριούνης¹, Γ. Δημόπουλος²**

¹Δρ. Γεωλόγος - Αγρονόμος & Τοπογράφος Μηχανικός – Ηγουμενίτσα 46100
cmyriounis@teemail.gr

²Τμήμα Γεωλογίας Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η διερεύνηση των υδραυλικών χαρακτηριστικών του προσχωματικού υδροφορέα στο παράκτιο τμήμα της υδρολογικής λεκάνης Αλμυρού Ν. Μαγνησίας. Αρχικά αναλύονται οι μέθοδοι προσδιορισμού των υδραυλικών παραμέτρων των προσχωματικών υδροφόρων και προσδιορίζεται η σχέση που παρουσιάζει η ειδική παροχή με τη μεταβιβαστικότητα σε ένα δείγμα 43 υδρογεωτρήσεων. Στη συνέχεια πραγματοποιείται γεωστατιστική ανάλυση της μεταβιβαστικότητας εφαρμόζοντας τη μέθοδο Ordinary Kriging, και τη μέθοδο CoKriging. Από τη γεωστατιστική ανάλυση των υδραυλικών χαρακτηριστικών των προσχωματικών υδροφόρων της περιοχής προκύπτει ότι, η μέθοδος η οποία και προσαρμόζεται καλύτερα στα πειραματικά δεδομένα είναι η CoKriging με τη συνδυασμένη χρήση δεδομένων ειδικής παροχής.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Υπόγεια υδραυλική, μεταβιβαστικότητα, ειδική παροχή, γεωστατιστική ανάλυση, γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών.

**INVESTIGATION OF HYDRAULIC FEATURES OF THE COSTAL
ALLUVIAL AQUIFER OF THE ALMYROS HYDROLOGICAL
BASIN, PREFECTURE MAGNESIA
Ch. Myriounis¹, G. Dimopoulos²**

¹Dr. Geologist – Rural and Surveyor Engineer – Igoumenitsa 46100
cmyriounis@teemail.gr

²School of Geology, Aristotle University of Thessaloniki, Thessaloniki

ABSTRACT

In this paper are analysed the hydraulic characteristics of the coastal area of the hydrological basin Almyros which belongs in the Prefecture of Magnesia, Greece. At first the pumping tests theory of determination hydraulic parameters of coastal sediment aquifers are described and is determined the best-fit line between specific capacity and transmissivity in a network of 43 wells. Then a geostatistical analysis of transmissivity is applied using the method Ordinary Kriging, and the method CoKriging. Based on the results produced by the conducted geostatistical survey, the method which is adapted better in the experimental data is the CoKriging with the combined use of special capacity data and transmissivity data.

KEY WORDS: Groundwater hydraulics, trasmissivity, specific capacity, geostatistical analysis, geographical information systems.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στον καθορισμό των υδρογεωλογικών συνθηκών μιας περιοχής πρωταρχική σημασία έχει η γνώση των υδραυλικών παραμέτρων των υδροφορέων. Με τον προσδιορισμό των παραμέτρων αυτών, καθίσταται δυνατός ο προσδιορισμός της υδραυλικής συμπεριφοράς των υδροφορέων, η εκτίμηση των αποθεμάτων του υπόγειου νερού και κατά συνέπεια η ορθότερη διαχείριση του υδατικού δυναμικού της περιοχής. Οι κυριότερες υδραυλικές παράμετροι που προσδιορίζονται είναι η μεταβιβαστικότητα T , ο συντελεστής εναποθήκευσης S , η υδραυλική αγωγιμότητα k , και η ειδική παροχή Q/S . Για τον προσδιορισμό των παραπάνω υδραυλικών παραμέτρων των υδροφορέων έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι που στηρίζονται στην επεξεργασία δεδομένων από δοκιμές άντλησης.

Ειδικότερα, αναφορικά με τη μεταβιβαστικότητα T , δεδομένα ειδικής παροχής μπορεί να είναι πολύ χρήσιμα για τον προσδιορισμό της και θα πρέπει να χρησιμοποιούνται όποτε είναι αυτό δυνατόν στις υδρογεωλογικές έρευνες (Mace, 2000). Η χρήση των δεδομένων αυτών μπορεί να αυξήσει τον αριθμό των δεδομένων της μεταβιβαστικότητας επιτρέποντας έτσι τον πιο ακριβή, στατιστικά και χωρικά, προσδιορισμό της, καθώς επίσης και της υδραυλικής αγωγιμότητας.

Υπάρχουν διάφορες τεχνικές προσδιορισμού της μεταβιβαστικότητας από την ειδική παροχή. Αυτές οι τεχνικές διακρίνονται σε αναλυτικές εκφράσεις, σε ημι-αναλυτικές εκφράσεις, εμπειρικές, γεωστατιστικές και σε υβριδικές μεθόδους (Μυριούνης, 2008). Το πρότυπο του Theis, (1963) αποτελεί την πιο αυστηρή θεωρητική μέθοδο προσδιορισμού της σχέσης της μεταβιβαστικότητας και της ειδικής παροχής. Οι πρώτες εμπειρικές σχέσεις προσδιορίστηκαν από τους Eagon and Johe (1972) και στη συνέχεια βελτιώθηκαν και έγιναν ευρύτερα διαδεδομένες από τους Razack and Huntley (1991). Γεωστατιστικές μέθοδοι μεταξύ άλλων χρησιμοποιήθηκαν από τους Delhomme (1976) και από τους Aboufirassi and Marino (1984).

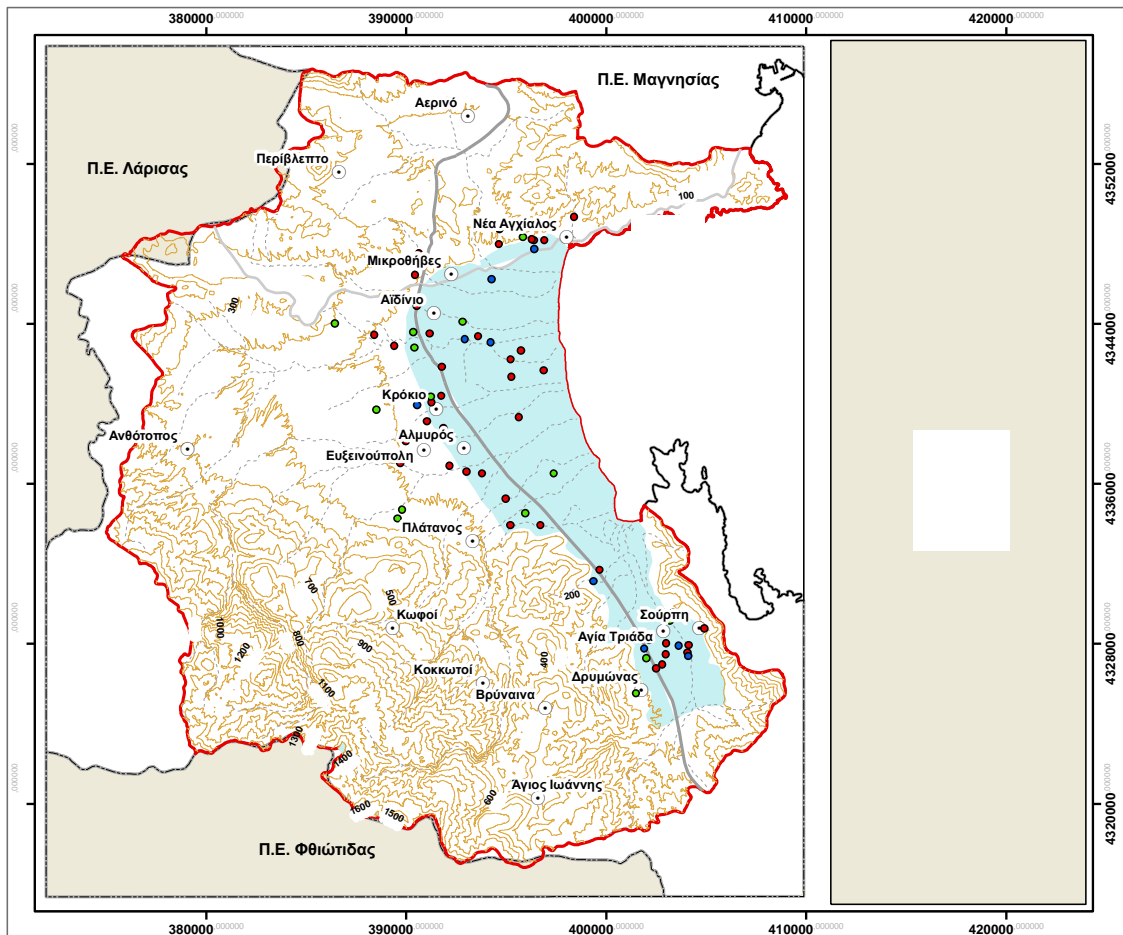
Όλες οι φυσικές ιδιότητες των εδαφών μπορούν να χαρακτηρισθούν από μια χωρική κατανομή, ορισμένων χαρακτηριστικών μετρήσιμων ποσοτήτων που καλούνται περιφερειακές μεταβλητές (Regional Variables). Η γεωστατιστική προσέγγιση στη μελέτη των υδραυλικών χαρακτηριστικών των υπόγειων υδροφορέων βασίζεται στη χωρική δομή που παρουσιάζουν όλες οι περιφερειακές μεταβλητές (Regional Variables). Έτσι λοιπόν σύμφωνα με τη θεωρία των περιφερειακών μεταβλητών τα διαθέσιμα δειγματοληπτικά δεδομένα είναι αποτέλεσμα μιας τυχαίας διεργασίας ή εκφράσεις μιας τυχαίας συνάρτησης, εισάγοντας έτσι ένα βαθμό πιθανότητας ή αβεβαιότητας για την εκτίμηση μιας εδαφικής ιδιότητας (Journel and Huijbregts, 1991, Cressie, 1993).

Στόχος μας λοιπόν στην προκείμενη περίπτωση είναι ο προσδιορισμός εκείνης της τυχαίας διεργασίας ή συνάρτησης η οποία και θα περιγράψει με τον καλύτερο δυνατό τρόπο τις υδραυλικές παραμέτρους των προσχωματικών υδροφορέων της παράκτιας ζώνης της λεκάνης του Αλμυρού.

2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η λεκάνη Αλμυρού βρίσκεται στην Π.Ε. Μαγνησίας, νότια της πόλης του Βόλου. Η περιοχή έρευνας συνολικής έκτασης 134,32 km² καλύπτει το παράκτιο τμήμα της λεκάνης Αλμυρού. Βόρεια οριοθετείται από τη ρηξιγενή ζώνη της Ν. Αγχιάλου, νότια φτάνει μέχρι και νότια του χωριού Σούρπη, ενώ περιορίζεται από τα δυτικά στο παράκτιο τμήμα της λεκάνης (Εικόνα 1).

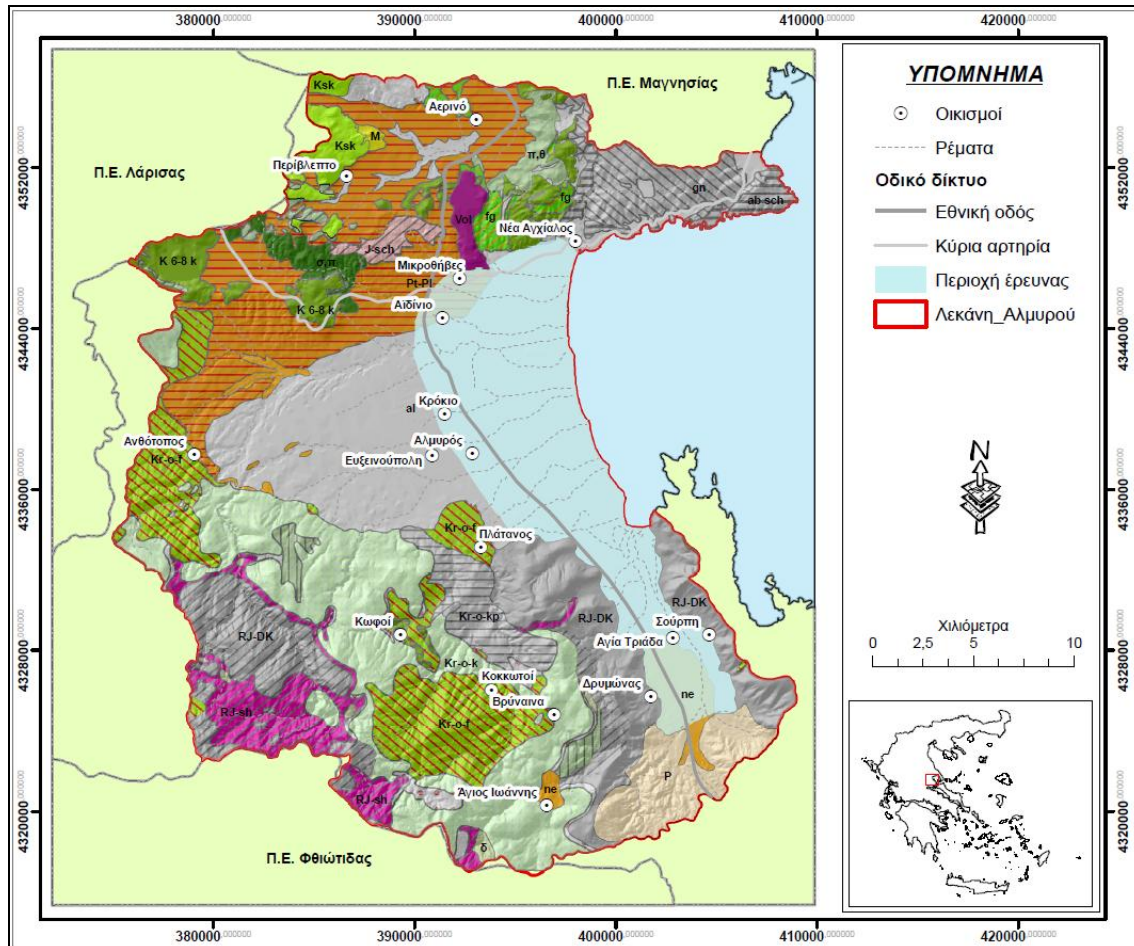
Η λεκάνη Αλμυρού αποτελεί τμήμα του ενιαίου βυθίσματος Αλμυρού-Παγασητικού. Τα 2/3 του βυθίσματος αυτού καλύπτονται ανατολικά από τον Παγασητικό κόλπο, ενώ το 1/3 προς τα δυτικά αποτελεί την ημιορεινή ζώνη και την χαμηλού αναγλύφου χερσαία περιοχή, με υψόμετρα μέχρι 200m, που είναι η περιοχή έρευνας. Η λεκάνη γεωμορφολογικά διακρίνεται στην υπολεκάνη της Σούρπης και την υπολεκάνη της Ευξεινούπολης (Γαλανάκης 1997). Σύμφωνα με το Γαλανάκη (1997) το ανάγλυφο της λεκάνης Αλμυρού οφείλεται κυρίως στην τεκτονική δράση ενεργών ρηγμάτων που δραστηριοποιούνται στην περιοχή από το Πλειόκαινο μέχρι σήμερα, με επαναδραστηριοποίηση πολλών εξ' αυτών κατά το Τεταρτογενές, και δευτερευόντως στις κλιματικές συνθήκες και στη διαφορική διάβρωση των πετρωμάτων. Κύριο χαρακτηριστικό της λεκάνης Αλμυρού είναι η σχετική βύθιση του ανατολικού τμήματος της λεκάνης σε σχέση με το δυτικό.



Εικόνα 1. Η περιοχή έρευνας και θέσεις των γεωτρήσεων (Μυριούνης, 2008)

Τα αλκικά ιζήματα που παρουσιάζονται στην περιοχή της λεκάνης Αλμυρού ανήκουν στην Υποπελαγονική και στην Πελαγονική ζώνη (Εικόνα 2). Συνοπτικά στην ευρύτερη περιοχή έρευνας οι σχηματισμοί Πελαγονικής ζώνης που απαντώνται είναι το αλκικό υπόβαθρο, οι σχιστόλιθοι, οι ασβεστιτικοί σχιστόλιθοι και τα υπερβασικά πετρώματα. Σχηματισμοί της Υποπελαγονικής που εντοπίζονται στην περιοχή είναι τα παλαιοζωικά πετρώματα του Περμίου, οι κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι Τριαδικού-Ιουρασικού, η σχιστοκερατολιθική διάπλαση και οι οφιόλιθοι, οι επικλυσιγενείς ασβεστόλιθοι και ο φλύσχης.

Αναφορικά με τη στρωματογραφική διάρθρωση των μεταλλικών, στην περιοχή απαντώνται νεογενή ιζημάτα απολιθωματοφόρα και λιγνιτοφόρα (μάργες) τα οποία είναι λιμναίας προέλευσης και ανήκουν στο Κάτω Πλειόκαινο. Κατά τη διάρκεια του Ανωτέρου Πλειοκαίνου πραγματοποιείται απόθεση υποκίτρινων αργιλικών μαργών, διακοπτόμενη κατά μικρά χρονικά διαστήματα ημιξηρασίας και χέρσευσης. Τέλος κατά το Πλειστόκαινο επικρατεί ιζηματογένεση κλαστικών υλικών, κυρίως ποτάμιας και ποταμοχερσαίας προέλευσης (Γαλανάκης 1997).



Εικόνα 2. Γεωλογικός χάρτης της λεκάνης Αλμυρού από ΙΓΜΕ με τροποποιήσεις από Μυριούνη, (2008).

3. ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ

Στην περιοχή έρευνας οι κύριοι υδροφορείς εντοπίζονται στα χαλαρά νεογενή και τεταρτογενή υδροφόρα στρώματα, καθώς επίσης και στους ανθρακικούς όγκους που εντοπίζονται στα βορειοδυτικά και νότια τμήματά της. Για τον υπολογισμό των υδραυλικών χαρακτηριστικών των νεογενών και τεταρτογενών ιζημάτων χρησιμοποιήθηκαν (Εικόνα 1):

α. Τα δεδομένα 8 δοκιμαστικών αντλήσεων που συγκεντρώθηκαν για την περιοχή. Τα δεδομένα αυτά προέρχονται από σειρά δοκιμαστικών αντλήσεων που πραγματοποιήθηκαν στον προσχωματικό υδροφορέα και στους καρστικούς υδροφορείς στα πλαίσια μελέτης με τίτλο «Υδρογεωλογική Έρευνα: Θεσσαλία – Σποράδες – Κοιλάδα Κατερίνης», η οποία πραγματοποιήθηκε από τη Διεύθυνση Υδρογεωλογίας του Ι.Γ.Μ.Ε. Για την ανάλυση των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των Cooper – Jacob και όπου δεν τηρούνταν οι απαραίτητες προϋποθέσεις χρησιμοποιήθηκε η

μέθοδος του Theis. Για την επεξεργασία των δεδομένων που προέκυψαν από την επαναφορά της στάθμης χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος επαναφοράς της στάθμης σύμφωνα με το πρότυπο του Theis.

β. Από την Υ.Ε.Β. του νομού Μαγνησίας αποκτήθηκαν 13 λιθολογικές τομές γεωτρήσεων για τις οποίες είχε προσδιορισθεί η μεταβιβαστικότητα T και υπήρχαν στοιχεία για την παροχή άντλησης και την αντίστοιχη πτώση στάθμης.

γ. Από την Υ.Ε.Β. επίσης αποκτήθηκαν άλλες 17 λιθολογικές τομές γεωτρήσεων οι οποίες και παρουσίαζαν την παροχή άντλησης και την αντίστοιχη πτώση στάθμης.

δ. Επίσης κατά τη διάρκεια των μετρήσεων υπαίθρου, σε 5 γεωτρήσεις μετρήθηκαν στατική στάθμη και η στάθμη άντλησης, ενώ ήταν γνωστή η παροχή με την οποία γινόταν η άντληση.

4. ΣΧΕΣΗ ΕΙΔΙΚΗΣ ΠΑΡΟΧΗΣ ΜΕ ΜΕΤΑΒΙΒΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑ

Για τον προσδιορισμό της σχέσης της ειδικής παροχής με τη μεταβιβαστικότητα χρησιμοποιήθηκαν οι γεωτρήσεις στις οποίες ήταν γνωστές οι δύο αυτές παράμετροι. Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε είναι η παρακάτω (Μυριούνης, 2008):

α) Διερεύνηση της κατανομής που ακολουθούν η μεταβιβαστικότητα και η ειδική παροχή για τις γεωτρήσεις που έχουν δεδομένα.

β) Προσδιορισμός της σχέσης μεταξύ των λογαριθμικά μετασχηματισμένων υδραυλικών χαρακτηριστικών των υδροφόρων στρωμάτων, καθώς επίσης και στατιστικός έλεγχος των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τη σχέση.

γ) Σχολιασμός της φυσικής σημασίας της σχέσης της ειδικής παροχής με τη μεταβιβαστικότητα.

δ) Προσδιορισμός της υδραυλικών χαρακτηριστικών για το σύνολο των διαθέσιμων γεωτρήσεων της περιοχής.

5. ΓΕΩΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Για τη γεωστατιστική ανάλυση των υδραυλικών χαρακτηριστικών του προσχωματικού υδροφορέα χρησιμοποιούνται τα βαριογράμματα και πιο συγκεκριμένα τα ημιβαριόγραμμα. Το ημιβαριόγραμμα περιέχει όλες τις πληροφορίες για τη χωρική διακύμανση της υδραυλικής παραμέτρου (Σχήμα 1). Πιο συγκεκριμένα παρέχει πληροφορίες γύρω από τη χωρική συσχέτιση μεταξύ των τιμών μιας τυχαίας συνάρτησης και των μεταξύ τους αποστάσεων στο χώρο.

Το πειραματικό ημιβαριόγραμμα μας παρέχει μία ποσοτική έκφραση της διακύμανσης της τυχαίας συνάρτησης, που εκφράζει μία υδραυλική παράμετρος στην περίπτωσή μας. Οι πληροφορίες που αποκαλύπτονται από το ημιβαριόγραμμα είναι οι εξής (Μυριούνης, 2008):

Η παράμετρος *nugget* (C_0) είναι η χωρική διακύμανση που οφείλεται στο συστηματικό λάθος μέτρησης και δειγματοληψίας, ή σε άλλες ανεξήγητες πηγές. Η παράμετρος (C) ονομάζεται *structural variance* και αποτελεί την χωρική δομή της διακύμανσης που οφείλεται στη διαφοροποίηση της τυχαίας συνάρτησης Z στο χώρο, έτσι όπως καταγράφηκε από τις παρατηρήσεις.

Το άθροισμα των (C_0+C) ονομάζεται όριο ή κατώφλι (*sill*), και θεωρητικά ισούται με τη διακύμανση του πληθυσμού των δειγμάτων σε μεγάλες αποστάσεις διαχωρισμού εάν απουσιάζουν τοπικές τάσεις. Αν το *nugget* είναι περίπου ίδιο με το *sill*, αυτό σημαίνει την απουσία χωρικής συσχέτισης και την τυχαία διακύμανση της Z , φαινόμενο γνωστό και ως φαινόμενο σβόλου, *nugget effect* (Cressie, 1993). Το

φαινόμενο αυτό μπορεί να οφείλεται σε λάθη παρατήρησης, αλλά και σε τοπικές διαταραχές του φαινομένου σε μικροκλίμακες μελέτης (Σπυρίδης, 1998).

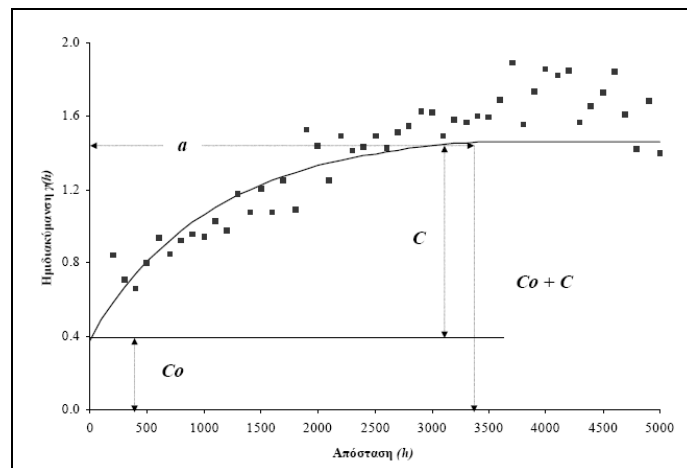
Η μέθοδος Kriging αποτελεί την πιο διαδεδομένη μέθοδο χωρικής κατανομής. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί γεωστατιστικές μεθόδους για την πρόβλεψη μιας μεταβλητής στο χώρο. Ο πρώτος που εφάρμοσε τέτοιες μεθόδους ήταν ο D.Krige (1951) στο χώρο της μεταλλειολογίας, ενώ στη συνέχεια υπήρξε μεγάλη εφαρμογή των μεθόδων αυτών σε διάφορες επιστημονικές περιοχές. Οι μέθοδοι Kriging που εφαρμόζονται στην εργασία είναι οι παρακάτω (Μυριούνης, 2008):

α) Μέθοδος Ordinary Kriging. Η παραπάνω μέθοδος βασίζεται στην εξίσωση (5.1) και με βαριόγραμμα που δίνεται από την εξίσωση (5.2). Η πρόβλεψη της μεθόδου για την τυχαία συνάρτηση $Z(s)$, στη θέση s_0 , είναι ο σταθμισμένος όρος των n γειτονικών τιμών της θέσης s_0 .

$$Z(s) = \mu + \delta(s), \quad (5.1)$$

$$\hat{z}(s_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(s_i) \quad (5.2)$$

όπου λ_i οι σταθμικοί συντελεστές που συνδέονται με τις γειτονικές θέσεις δειγματοληψίας.



Σχήμα 1. Τυπικό πειραματικό ημιβαριόγραμμα

β) Μέθοδος CoKriging. Η μέθοδος CoKriging χρησιμοποιεί τη συσχέτιση που παρουσιάζουν δύο φυσικές παράμετροι για τον προσδιορισμό της χωρικής κατανομής της μίας εκ των δύο παραμέτρων. Η κύρια παράμετρος ουσιαστικά «υποβοηθάται» κατά τον χωρικό προσδιορισμό της από την κατανομή της δευτερεύουσας παραμέτρου. Συνήθως η δευτερεύουσα παράμετρος παρουσιάζει μεγαλύτερο πλήθος απ' ότι η κύρια. Στην CoKriging ο βαθμός της συσχέτισης μεταξύ των παραμέτρων και η χωρική κατανομή της συσχέτισης καθορίζονται από το διασταυρούμενο ημιβαριόγραμμα (cross variogram).

Για τον προσδιορισμό και την εξακρίβωση της ποιότητας του γεωστατιστικού μοντέλου ως προς τα πειραματικά δεδομένα είναι σκόπιμο να ποσοτικοποιηθεί το σφάλμα που παρουσιάζεται κατά την εφαρμογή του όποιου μοντέλου. Δύο παράμετροι θα πρέπει να διερευνηθούν:

α) Το κατά πόσο το θεωρητικό μοντέλο μπορεί να προβλέψει με ακρίβεια τιμές της παραμέτρου σε άγνωστες θέσεις.

β) Το κατά πόσο το θεωρητικό μοντέλο μπορεί να προβλέψει με ακρίβεια τιμές της παραμέτρου σε γνωστές θέσεις.

Για την πρώτη περίπτωση χρησιμοποιείται η μέθοδος της διασταυρούμενης επιβεβαίωσης των προβλέψεων (cross validation). Σύμφωνα με την μέθοδο αυτή γίνεται απαλοιφή μιας τιμής από το σύνολο των χωρικών δεδομένων, και χρησιμοποίηση των υπολοίπων με τις εξισώσεις της μεθόδου Kriging, για την πρόβλεψή της (Cressie, 1993, de Marcily, 1986). Η επανάληψη της διαδικασίας για το σύνολο των τιμών μας παρέχει την δυνατότητα της σύγκρισης των εκτιμώμενων $\hat{z}(x_i)$ με τις πραγματικές τιμές $z(x_i)$ για κάθε χωρική θέση i , και την εκτίμηση της ακρίβειας των προβλέψεων με την μορφή των τετραγωνισμένων διαφορών όπως παρακάτω (5.3).

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [\hat{z}(x_i) - z(x_i)]^2 \quad \text{ή} \quad ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [\hat{z}(x_i) - z(x_i)] \quad (5.3)$$

Επίσης οι Yu-Pin Lin et al. (2000), για την ποσοτικοποίηση της ακρίβειας του αγνώστων τιμών χρησιμοποιούν τη σύγκριση του συντελεστή μεταβλητότητας μεταξύ των αρχικών μετρήσιμων τιμών και των τιμών που προκύπτουν από την εφαρμογή της μεθόδου Kriging. Σύμφωνα με τους ίδιους ερευνητές καλύτερα αποτελέσματα παρουσιάζονται όταν οι συντελεστές αυτοί παρουσιάζουν μικρή διαφορά.

Αναφορικά με την δεύτερη περίπτωση της εξακρίβωσης των τιμών της παραμέτρου σε γνωστές θέσεις, αυτή πραγματοποιείται από την σύγκριση των αρχικών μετρήσιμων τιμών και των τιμών που προκύπτουν από την μέθοδο Kriging. Όσο πιο μικρή απόκλιση παρουσιάζουν οι τιμές τόσο πιο καλά προσεγγίζει το θεωρητικό μοντέλο της μεθόδου Kriging την πραγματική χωρική κατανομή της παραμέτρου.

6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Για την προσδιορισμό της σχέσης μεταξύ της ειδικής παροχής και της μεταβιβαστικότητα κατασκευάστηκαν διαγράμματα Q-Q, καθώς επίσης και του λογαρίθμου αυτών (Διάγραμμα 1). Από το διαγράμματα αυτά διαπιστώνεται πως οι λογάριθμοι των υδραυλικών χαρακτηριστικών των προσχωσιγενών σχηματισμών της περιοχής ακολουθούν την κανονική κατανομή.

Τα αποτελέσματα αυτά συμφωνούν με τους στατιστικούς ελέγχους που πραγματοποιήθηκαν με βάση τη δοκιμασία X^2 και τη δοκιμασία Kolmogorov – Smirnov (K-S test) (Κολυβά – Μαχαίρα και Μπόρα – Σέντα, 1995). Σύμφωνα με τις δοκιμασίες αυτές τα δεδομένα προσαρμόζονται καλύτερα στην κανονική κατανομή έχοντας υποστεί λογαριθμική μετασχηματισμό, καθώς τα συγκρινόμενα στατιστικά μέτρα που χρησιμοποιούνται στις παραπάνω δοκιμασίες παρουσιάζουν μεγαλύτερες τιμές κατά το λογαριθμικό μετασχηματισμό.

Το γεγονός αυτό έχει αρχικά διαπιστωθεί από τον Davis (1986) σε διάφορες γεωλογικές και υδρογεωλογικές παραμέτρους, όπως επίσης και από άλλους ερευνητές (Razack and Lasm, (2007), Jalludin and Razack, (2004)).

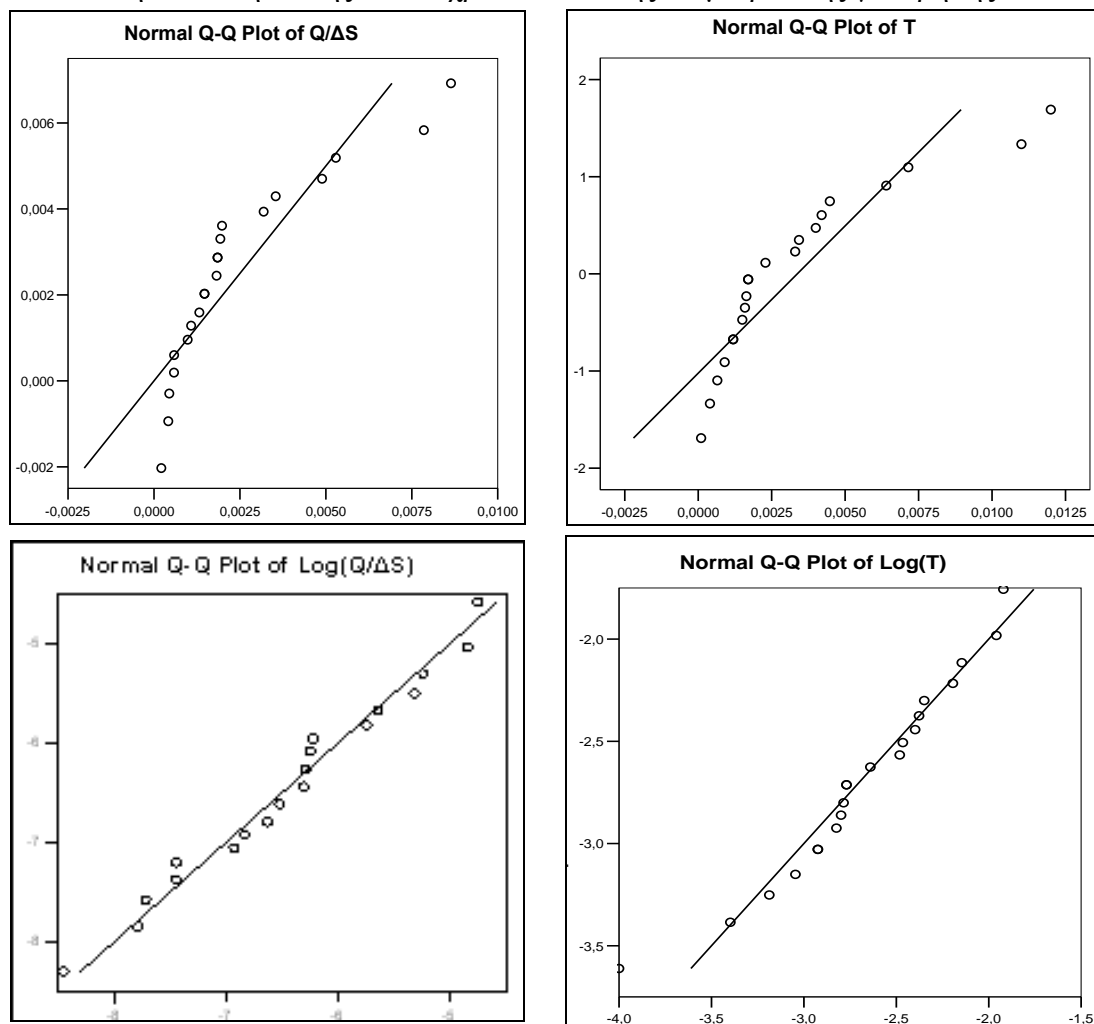
Στο παρακάτω Διάγραμμα 2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της συσχέτισης της υδραυλικής αγωγιμότητας και της ειδικής παροχής για τους προσχωματικούς σχηματισμούς της περιοχής. Από την ανάλυση συσχέτισης που πραγματοποιήθηκε, η σχέση που συνδέει τη μεταβιβαστικότητα και την ειδική παροχή είναι:

$$\text{Log}(T) = 1.019 \cdot \text{Log}\left(\frac{Q}{\Delta S}\right) + 0.147 \quad (5.4)$$

Ο συντελεστής συσχέτισης R^2 για την περίπτωση των νεογενών και τεταρτογενών σχηματισμών ανέρχεται σε 0.846, που υποδηλώνει ότι το μοντέλο εξηγεί το 84.6 % της διασποράς (Chatterjee and Price, 1991), ενώ το τυπικό σφάλμα είναι 1.55. Τα επίπεδα σημαντικότητας F και T είναι μικρά γεγονός που δείχνει ότι η ειδική παροχή συμμετέχει πολύ ικανοποιητικά στην πρόβλεψη της μεταβιαστικότητας.

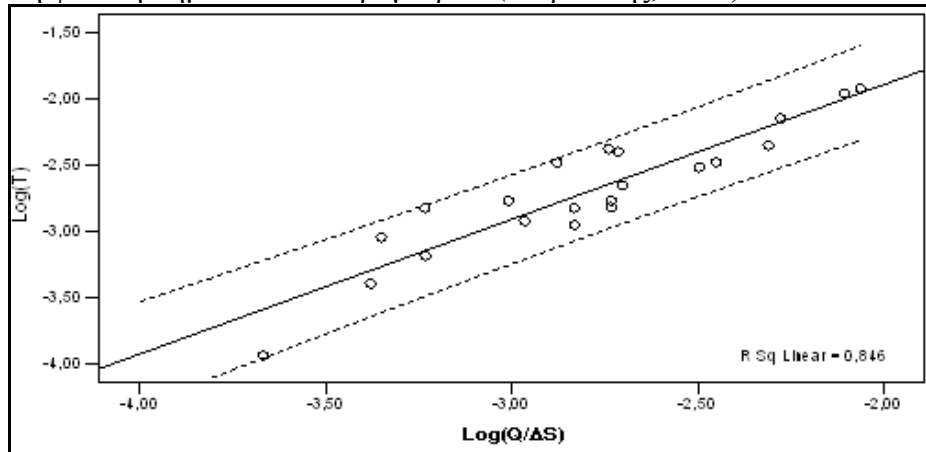
Αναφορικά με τους παράγοντες που επηρεάζουν τις εμπειρικές σχέσεις που προκύπτουν από δεδομένα ειδικής απόδοσης και μεταβιαστικότητας, αυτοί μπορεί να είναι οι γεωλογικές συνθήκες της περιοχής, τα χαρακτηριστικά των υδροφορέων, τα διάφορα τεχνικά χαρακτηριστικά των γεωτρήσεων, η διάρκεια της άντλησης αυτών, ο συντελεστής εναποθήκευσης, καθώς επίσης και το είδος του μοντέλου που θα χρησιμοποιηθεί στη συσχέτιση (Mace, (1997), Razack and Lasm, (2007)).

Οι Meier et al. (1999), ύστερα από αριθμητικές προσομοιώσεις έδειξαν ότι οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται από την ανάλυση συσχέτισης δεδομένων μεταβιαστικότητας και ειδικής παροχής επηρεάζονται από την ετερογένεια του υδροφορέα, από το χρονικό διάστημα της άντλησης, και από τις απώλειες φορτίου στη γεώτρηση. Ωστόσο, σύμφωνα με το πρότυπο του Theis (1963), ύστερα από ανάλυση ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκε από τον Mace (2000) η ειδική παροχή είναι πιο ευαίσθητη στη μεταβολή της μεταβιαστικότητας και μετά στη μεταβολή του συντελεστή εναποθήκευσης S , του χρόνου t και της διαμέτρου της γεώτρησης.



Διάγραμμα 1. Προσαρμογή των δεδομένων T , $Q/\Delta S$, $\text{Log}T$, $\text{Log}\Delta S$ στην κανονική κατανομή για τους προσχωματικούς υδροφορείς (Μυριούνης, 2008)

Το γεγονός αυτό δείχνει πως οι υδρογεωλογικές και υδραυλικές συνθήκες του υδροφόρου συστήματος είναι πιο σημαντικές από ότι η διάρκεια της άντλησης και η διάμετρος της γεώτρησης. Επίσης ο ίδιος ερευνητής διαπιστώνει πως σε περιπτώσεις που δεν είναι γνωστοί οι χρόνοι άντλησης των γεωτρήσεων, η πιο σημαντική παράμετρος που επηρεάζει τη μεταβιβατικότητα είναι η ειδική παροχή. Με βάση τα παραπάνω διαπιστώνεται πως η σχέση της μεταβιβατικότητας και της ειδικής παροχής είναι αξιόπιστη, σύμφωνα με τη διεθνή πρακτική, όχι μόνο από στατιστική άποψη αλλά και από τη φυσική σημασία των παραμέτρων (Μυριούνης, 2008).



Διάγραμμα 2. Σχέση των $\text{Log}(T)$ και $\text{Log}(Q/\Delta S)$ για τους προσχωσιγενείς υδροφόρους της περιοχής. Με στικτές γραμμές παρουσιάζονται τα διαστήματα εμπιστοσύνης 95%.

Κατά τη γεωστατιστική ανάλυση της μεταβιβατικότητας εφαρμόστηκε η μέθοδος Ordinary Kriging και η μέθοδος CoKriging. Για τον καθορισμό του θεωρητικού ημιβαριογράμματος χρησιμοποιήθηκε, το άθροισμα των τετραγώνων των αποκλίσεων (RSS) του πειραματικού ημιβαριογράμματος σε σχέση με το κάθε θεωρητικό που προσαρμόζονταν στα δεδομένα. Το θεωρητικό μοντέλο που είχε το χαμηλότερο RSS είναι το πιο κατάλληλο για την προσαρμογή των πειραματικών ημιβαριογραμμάτων. Επίσης χρησιμοποιήθηκε και ο συντελεστής συσχέτισης r^2 , ο οποίος και παρέχει μια ένδειξη του πόσο καλά προσαρμόζεται το θεωρητικό μοντέλο στα πειραματικά δεδομένα. Το θεωρητικό μοντέλο που παρουσιάζει τον υψηλότερο συντελεστή συσχέτισης είναι και το καταλληλότερο για την προσαρμογή των πειραματικών δεδομένων (Πίνακας 1). Τέλος για κάθε μέθοδο προσδιορίστηκε η αξιοπιστία της με την μέθοδο της διασταυρούμενης επιβεβαίωσης των προβλέψεων (cross validation), καθώς επίσης και συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της κάθε μεθόδου με τις μετρήσιμες τιμές (Μυριούνης, 2008).

A. Εφαρμογή της μεθόδου Ordinary Kriging. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές της μεταβιβατικότητας χωρίς αυτές που προέκυψαν και από τη συσχέτιση με την ειδική παροχή (21 τιμές). Στο Σχήμα 2.α παρουσιάζεται το ημιβαριόγραμμα το οποίο προσαρμόζεται καλύτερα στα πειραματικά δεδομένα με βάση τη συγκεκριμένη μέθοδο.

B. Εφαρμογή της μεθόδου Co Kriging. Για το σκοπό αυτό σαν κύρια μεταβλητή θεωρήθηκαν και οι τιμές της μεταβιβατικότητας χωρίς αυτές που προέκυψαν και από τη συσχέτιση με την ειδική παροχή (21 τιμές), ενώ σαν δευτερεύουσα μεταβλητή θεωρήθηκε η ειδική παροχή για το σύνολο των γεωτρήσεων της περιοχής (43 τιμές). Στο Σχήμα 2.β παρουσιάζεται το ημιβαριόγραμμα το οποίο προσαρμόζεται καλύτερα στα πειραματικά δεδομένα με βάση τη συγκεκριμένη μέθοδο.

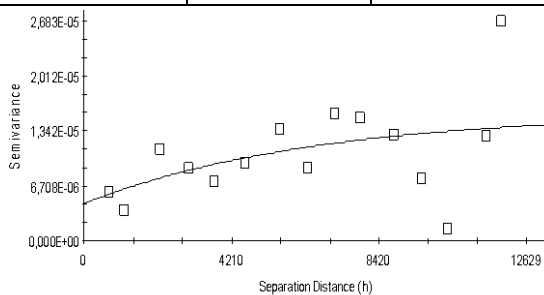
Από τον Πίνακα 1, για την μέθοδο Ordinary Kriging, προκύπτει πως το ημιβαριόγραμμα που προσαρμόζεται καλύτερα είναι το εκθετικό μοντέλο. Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό το εύρος της διακύμανσης είναι 20 km περίπου, το όριο αντιστοιχεί σε

$1.57 \cdot 10^{-5}$, ενώ το φαινόμενο σφάλου είναι ίσο με 0,000005. Από τη μέθοδο της διασταυρούμενης επιβεβαίωσης των προβλέψεων (cross validation) η ακρίβεια της πρόβλεψης των αγνώστων τιμών με τη μέθοδο αυτή είναι $MSS = 1.11 \cdot 10^{-5}$, ενώ η απόκλιση αυτής είναι $ME = -0.000086$. Τέλος από τις εκτιμήσεις της μεθόδου αυτής σε σχέση με τις πειραματικές τιμές της μεταβιβαστικότητας προκύπτει πως παρουσιάζονται αποκλίσεις (Σχήμα 3.α), με τον συντελεστή συσχέτισης μεταξύ των μετρήσιμων τιμών της μεταβιβαστικότητας και των εκτιμήσεων από τη μέθοδο Kriging να είναι 0,5616.

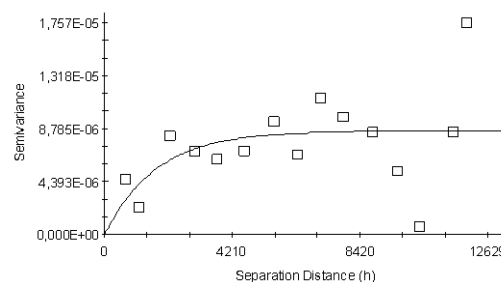
Για τη μέθοδο CoKriging, προκύπτει πως το ημιβαριόγραμμα που προσαρμόζεται καλύτερα είναι το εκθετικό μοντέλο. Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό το εύρος της διακύμανσης είναι 5.1 km περίπου, το όριο αντιστοιχεί σε $8.62 \cdot 10^{-6}$, ενώ το φαινόμενο σφάλου είναι μηδενικό. Από τη μέθοδο της διασταυρούμενης επιβεβαίωσης των προβλέψεων (cross validation) η ακρίβεια της πρόβλεψης των αγνώστων τιμών με τη μέθοδο αυτή είναι $MSS = 1.10 \cdot 10^{-5}$, ενώ η απόκλιση αυτής είναι $ME = -0.00017$. Τέλος από τις εκτιμήσεις της μεθόδου αυτής σε σχέση με τις πειραματικές τιμές της μεταβιβαστικότητας προκύπτει πως παρουσιάζεται πολύ καλή συσχέτιση των δύο παραμέτρων (Σχήμα 3.β), με τον συντελεστή συσχέτισης μεταξύ των μετρήσιμων τιμών της μεταβιβαστικότητας και των εκτιμήσεων από τη μέθοδο Kriging να είναι 0,9964.

Πίνακας 1. Ημιβαριόγραμμα για τις μεθόδους Ordinary Kriging και CoKriging

	Co	Sill	Range	RSS	r^2
Μέθοδος Ordinary Kriging					
Gaussian	0,000006	0,000013	7378,364	$4,119 \cdot 10^{-10}$	0,190
Exponential	0,000005	0,00016	20010,000	$4,026 \cdot 10^{-10}$	0,210
Spherical	0,000006	0,000013	8170,000	$4,098 \cdot 10^{-10}$	0,194
Linear	0,000004	0,00015	11904,0524	$3,995 \cdot 10^{-10}$	0,214
Μέθοδος CoKriging					
Gaussian	0,0000003	0,00000838	4520,6526	$1,816 \cdot 10^{-10}$	0,162
Exponential	0,0000000	0,00000862	5100,0000	$1,814 \cdot 10^{-10}$	0,165
Spherical	0,0000000	0,00000822	3060,0000	$1,845 \cdot 10^{-10}$	0,150
Linear	0,000005	0,000009873	11904,0524	$1,829 \cdot 10^{-10}$	0,156



α.



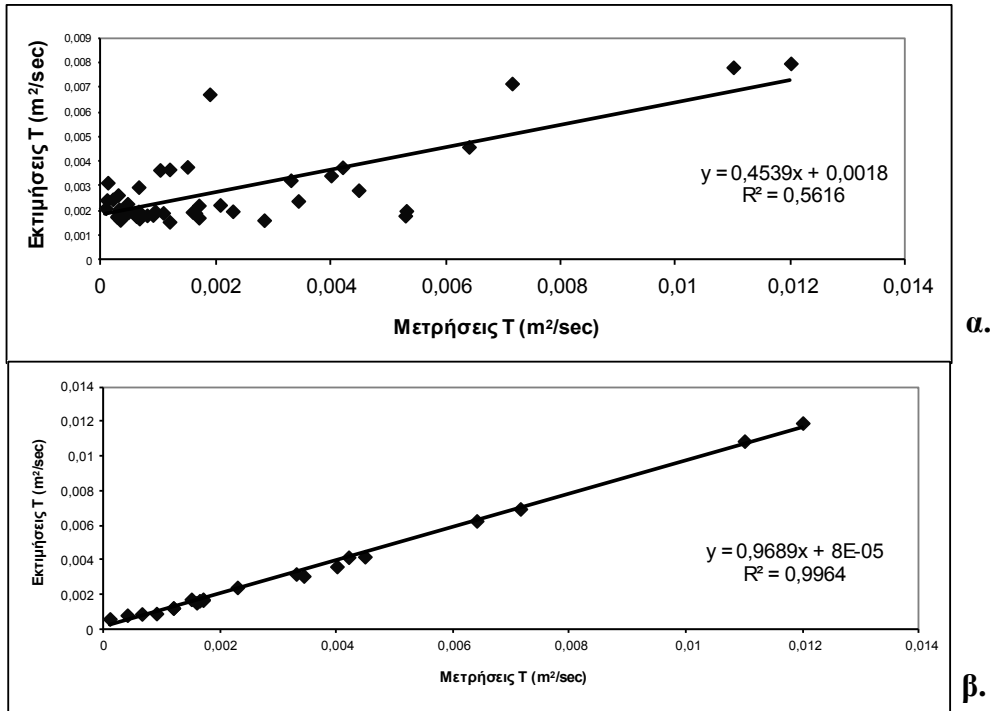
β.

Σχήμα 2.α. Εκθετικό ημιβαριόγραμμα για τη μέθοδο Ordinary Kriging **β.** διασταυρούμενο ημιβαριόγραμμα Gauss για τη μέθοδο CoKriging

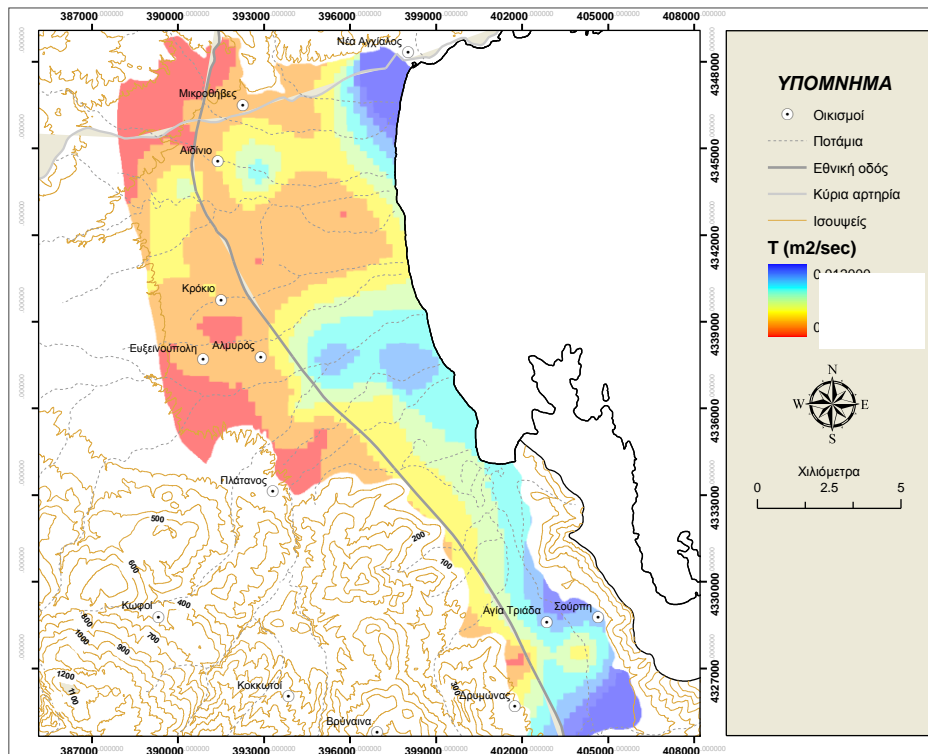
Από την ανάλυση cross validation, συγκρίνοντας τις δύο μεθόδους γεωστατιστικές μεθόδους, διαπιστώνεται πως οι τιμές MSS και ME παρουσιάζουν χαμηλές τιμές. Χαμηλότερες τιμές εντοπίζονται στην μέθοδο CoKriging, γεγονός το οποίο αποδίδεται στην υποβοήθηση των παραμέτρων της μεταβιβαστικότητας, από τις τιμές της ειδικής παροχής (Μυριούνης, 2008).

Αναφορικά με τις αποκλίσεις των τιμών της μεταβιβαστικότητας σε σχέση με τα πειραματικά δεδομένα, παρουσιάζονται μεγάλες αποκλίσεις συγκρίνοντας τις

προβλέψεις της μεθόδου Ordinary Kriging. Καλύτερα αποτελέσματα παρουσιάζονται με τη δεύτερη μέθοδο CoKriging με τη χρήση του συνόλου της διαθέσιμων μετρήσεων μεταβιβαστικότητα και των τιμών της ειδικής παροχής. Το γεγονός αυτό αποδεικνύει την αξιοπιστία της μεθόδου στη μελέτη των υδραυλικών χαρακτηριστικών της περιοχής έρευνας. Στο παρακάτω Σχήμα 4 παρουσιάζεται η κατανομή της μεταβιβαστικότητας για την περιοχή έρευνας με τη δεύτερη μέθοδο CoKriging.



Σχήμα 3.α. Τιμές μετρήσεων T και εκτιμήσεων T (Ordinary Kriging), β. Τιμές μετρήσεων T και εκτιμήσεων T (CoKriging)



Σχήμα 4. Κατανομή της μεταβιβαστικότητας εφαρμόζοντας τη μέθοδο CoKriging

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Aboufirassi, M., Marino, M., 1984. *Cokriging of aquifer transmissivities from field measurements of transmissivity and specific capacity*. Journal of the International Association for Mathematical Geology. v. 16, no. 1, pp. 19-35.
- Chatterjee, S., Price, B., 1991. *Regression Analysis by Example* (2nd ed.). John Wiley & Sons. New York.
- Cressie, N., 1993. *Statistics for Spatial Data*. John Wiley & Sons Inc.
- Davis, J., 1986. *Statistics and Data Analysis in Geology*. 2nd edition, John Wiley & Sons. pp. 644.
- De Marcily, G., 1986. *Quantitative Hydrogeology*. Groundwater Hydrology for Engineers. Academic Press, Paris, pp. 435.
- Delhomme, J., 1976. *Application de la théorie des variables régionalisées dans les sciences de l'eau*. Ph. D. Thesis. Ecole des Mines de Paris. Fontainebleau, France.
- Eagon, H., Johe, D., 1972. *Practical solutions for pumping tests in carbonate-rock aquifers*. Ground Water. v. 10, no. 4, pp. 6-13.
- Jalludin, M., Razack, M., 2004. *Assessment of hydraulic properties of sedimentary and volcanic systems under arid conditions in the Republic of Djibouti (Horn of Africa)*. J. Hydrogeol. 12, pp. 159-170.
- Journel, A., Huijbregts, Ch., 1991. *Mining Geostatistics*. Academic Press. London. pp. 600.
- Mace, R., 1997. *Determination of transmissivity from specific capacity tests in a karst aquifer*. Ground Water. 35, pp. 738-742.
- Mace, R., 2000. *Estimating transmissivity from specific capacity data*. http://www.state.us/asd/GAM_documents/sc_report.pdf, Cited 20 January 2006.
- Meier, P., Carrira, J., Sanchez-Vill, X., 1999. *A numerical study on relationship between transmissivity and specific capacity in heterogeneous aquifers*. Ground water. 37, pp. 611-617.
- Razack, M., Lasm, T., 2007. *Geostatistical estimation of the transmissivity in a highly fractured metamorphic and crystalline aquifer (Man-Danane Region, Western Ivory Coast)*. J. Hydrol. 325(1-4). pp. 164-178.
- Theis, C., 1963. *Estimating the transmissivity of water-table aquifer from the specific capacity of a well*. U.S. Geological Survey Water Supply Paper 1536-I. pp. 332-336.
- Thomason, H., Olmstead, F., LeRoux, E., 1960. *Geology, water resources, and usable ground water storage capacity of part of Solano Country*. CA: U.S. Geological Survey Water Supply Paper 1464. pp.693.
- Yu-Pin L., Tung-Po T., Tsun-Kuo C., 2000. *Multivariate analysis of soil heavy metal pollution and landscape pattern in Changhua county in Taiwan*, Landscape and urban Planning. 62, pp. 19-35.
- Γαλανάκης, Δ., 1997. *Νεοτεκτονική Δομή και Στρωματογραφία των Νεογενών – Τεταρτογενών ιζημάτων της λεκάνης του Αλμυρού – Παγασητικού, Πηλίου, Διαύλου Ωρεων – Τρικερίου και Μαλιακού*. Διδακτορική διατριβή. Τμήμα Γεωλογίας. Θεσσαλονίκη, σελ. 258.
- Κολυβά – Μαχαίρα, Φ., Μπόρα – Σέντα, Ε., 1995. *Στατιστική*. Εκδόσεις Ζήτη. Θεσσαλονίκη. σελ. 495.
- Μυριούνης, Χ., 2008. *Υδρογεωλογική και υδροχημική διερεύνηση των υπόγειων νερών της υδρολογικής λεκάνης Αλμυρού Μαγνησίας*. Διδακτορική διατριβή. Τμήμα Γεωλογίας. Θεσσαλονίκη. σελ. 397.
- Σπυρίδης, Α., 1998. *Γεωστατιστική εκτίμηση ορισμένων υδροδυναμικών παραμέτρων του εδάφους, εφαρμογή στη γεωργική υδραυλική*. Διδακτορική Διατριβή. Τμήμα Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών. Α.Π.Θ. Θεσσαλονίκη, σελ. 186.

ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΑΙ ΠΟΙΟΤΗΤΕΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕΡΩΝ ΣΤΟ ΟΡΕΙΝΟ ΣΥΓΚΡΟΤΗΜΑ ΚΕΡΔΥΛΛΙΩΝ -ΚΡΟΥΣΙΩΝ, ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑ, ΒΟΡΕΙΑ ΕΛΛΑΔΑ

Νικόλαος Βεράνης¹, Χρήστος Χρηστίδης¹

¹Ινστιτούτο Γεωλογικών & Μεταλλευτικών Ερευνών, Περιφερειακή Μονάδα Κεντρικής Μακεδονίας

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο ορεινό συγκρότημα Κερδυλλίων – Κρουσιών, έκτασης 2270 km², εντοπίζεται τοπικής σημασίας υδροφορία, κύρια σε διερρηγμένα μεταμορφωμένα, πυριγενή πετρώματα και σε κοκκώδεις υδροφορείς της λεκάνης Μαυρούδας. Οι παροχές των πηγών στα διερρηγμένα πετρώματα κυμαίνονται από 0,5 έως 5,0 m³/h και στα ανθρακικά είναι 5 - 15 m³/h αντίστοιχα. Η μέση παροχή των γεωτρήσεων στα διερρηγμένα πετρώματα είναι 18 m³/h (5-30 m³/h), ενώ στους κοκκώδεις υδροφορείς περιοχής Μαυρούδας είναι 35 m³/h (20-70 m³/h) αντίστοιχα. Στο περισσότερο τμήμα του, το ρωγματικό σύστημα χαρακτηρίζεται από φτωχή υδροφορία. Οι καταναλώσεις των υπόγειων νερών ανέρχονται σε 13*10⁶ m³/χρόνο, που είναι κύρια για την ύδρευση 30.000 μόνιμων κατοίκων και την άρδευση 12.300 στρ. Τα προβλήματα σχετικά με τις ποιότητες των υπόγειων νερών είναι οι συχνές υπερβάσεις στα επιτρεπτά όρια για το πόσιμο νερό στα στοιχεία Mn, Fe και σπανιότερα στα NO₃ ή στο F.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Διερρηγμένοι και κοκκώδεις υδροφορείς, υδατικό ισοζύγιο, χρήσεις νερών, ποιότητα υπόγειων νερών.

HYDROGEOLOGICAL CONDITIONS AND GROUNDWATER QUALITIES OF THE KERDYLLIA - KROYSIA MOUNTAINOUS AREA, REGION OF CENTRAL MACEDONIA, NORTHERN GREECE

Nikolaos Veranis¹, Christos Christidis¹

¹Institute of Geology and Mineral Exploration of Greece, Regional Unit of Central Macedonia

ABSTRACT

In the mountainous area of Kerdyllia and Krouisia (2270 km²), locally importance aquifers are located within the fractured metamorphic and igneous rocks and as well as the granular aquifers of Mavrouda. The supplies of the springs of the fractured rocks is 0,5-5,0 m³/h, while of the carbonate rocks are 5-15 m³/h respectively. The average supply of the boreholes in the fractured rocks is 18 m³/h (5-30 m³/h) and in the granular aquifer of Mavrouda is 35 m³/h (20-70 m³/h) respectively. Most part of the fractured system is characterized by poor aquifers. The consumptions of the ground waters are 13*10⁶ m³/y, mainly as potable water of 30.000 inhabitants and for the irrigation of 12.300 acres. The problems of the ground water qualities are the frequent excess of the drinking water standards for the elements as Mn, Fe and rarely for the NO₃ or F.

KEYWORDS: Fracture and granular aquifers, water balance, water uses, water quality.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι προηγούμενες υδρογεωλογικές έρευνες στην περιοχή του ορεινού συγκροτήματος Κερδυλλίων- Κρουσίων αναφέρονται κυρίως στην ποιοτική κατάσταση των υδρευτικών νερών ή περιλαμβάνουν ορισμένα μόνο τμήματα του (Βεράνης κ.ά., 2010, Veranis, 2002). Στην εργασία αυτή για πρώτη φορά γίνεται ολοκληρωμένη αναφορά στα υδρογεωλογικά και υδροχημικά χαρακτηριστικά της υδροφορίας που εντοπίζεται τόσο στα διερρηγμένα μεταμορφωμένα, πυριγενή και ανθρακικά πετρώματα καθώς και στους κοκκώδεις υδροφορείς της λεκάνης Μαυρούδας.

2. ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΧΡΗΣΕΙΣ ΓΗΣ

Η περιοχή μελέτης έχει έκταση 2270 km², το τοπογραφικό ανάγλυφό της είναι λοφώδες- ημιορεινό έως ορεινό με υψόμετρα από 200 m έως 1180 m και το μέσο υψόμετρο είναι 440 m. Διατρέχεται από καλά αναπτυγμένο υδρογραφικό δίκτυο δενδρικής μορφής. Η πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου είναι 4,94 Km⁻¹, που δηλώνει σχετικά αδιαπέρατα πετρώματα με αντίσταση στη διάβρωση (Strachler 1964). Τα υδρορέματα παρουσιάζουν συνήθως εποχιακή απορροή στους κεντρικούς κλάδους των κατά την χειμερινή περίοδο ή μετά από έντονες βροχοπτώσεις κατά τη θερινή περίοδο. Υδρορέματα με συνεχή ροή για διάστημα πέντε έως οκτώ μήνες το χρόνο παρουσιάζουν ο Μπογδάνας ρ., το Δερβένι ρ. , το Βαμβακιάς ρ., ο Ρήχιος π. και ο Άνω ρους του Γαλλικού ποταμού (Βεράνης κ.ά., 2010). Από την συνολική έκταση των 2270 km², τα 719,87 km² (31,71%) είναι καλλιεργούμενες εκτάσεις και αγραναπαύσεις, τα 1535,63 km² (67,65%) είναι δασικές – ημιδασικές εκτάσεις, όπου στις ημιδασικές περιλαμβάνονται οι βοσκότοποι, τα 14,3 km² (0,61%) καλύπτονται από οικισμούς και τα 0,213 km² (0,009%) καλύπτονται από υδάτινες επιφάνειες.

3. ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΚΑΙ ΡΗΞΙΓΕΝΗΣ ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΔΟΜΗ

3.1. ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΔΟΜΗ

Σύμφωνα με τους γεωλογικούς χάρτες του ΙΓΜΕ, το μεγαλύτερο τμήμα της περιοχής δομείται από μία ποικιλία Παλαιοζωικής έως Μεσοζωικής ηλικίας μεταμορφωμένων και πυριγενών πετρωμάτων που γεωτεκτονικά ανήκουν στην Σερβομακεδονική μάζα (Εικόνα 1).

Τα Παλαιοζωικής ηλικίας (>250 εκ. χρ.) πετρώματα διακρίνονται σε διμαρμαρυγιακούς, βιοτιτικούς γνευσίους, μοσχοβιτικούς γνευσιοσχιστόλιθους, και αμφιβολίτες. Βιοτικοί γνεύσιοι και ορίζοντες μαρμάρων του σχηματισμού Κερδυλλίων που εντοπίζονται στο ανατολικό τμήμα του υδροφόρου συστήματος.

Τα Μεσοζωικής ηλικίας (250-65 εκ. χρ.) πετρώματα συνίστανται από γρανίτες, γρανιτογνευσίους, γνευσιογρανίτες και σερπεντινίτες που απαντούν σαν παρεμβολές στους γνευσίους. Μεγάλα σώματα από γάββρους εντοπίζονται στο νότιο τμήμα και σημαντικής έκτασης υπερβασικά σώματα απαντούν ανατολικά στην περιοχή Θερμών Νιγρίτας. Στο δυτικό-νοτιοδυτικό περιθώριο του συστήματος παρατηρείται συμμετοχή των σερικιτικών χαλαζιακών σχιστόλιθων, χαλαζιτών του σχηματισμού Εξαμιλίου (Πέρμιο) και μεταρύλιθοι, μετατόφοι της ηφαιστειοϊζηματογενούς σειράς Ακρίτα-Μεταλλικού (Περμοτριάδικό). Οι φυλλίτες και φακοί ανακρυσταλλωμένων ασβεστόλιθων της ομάδας Σβούλας (Τριαδικό) περιορίζονται στο νότιο περιθώριο.

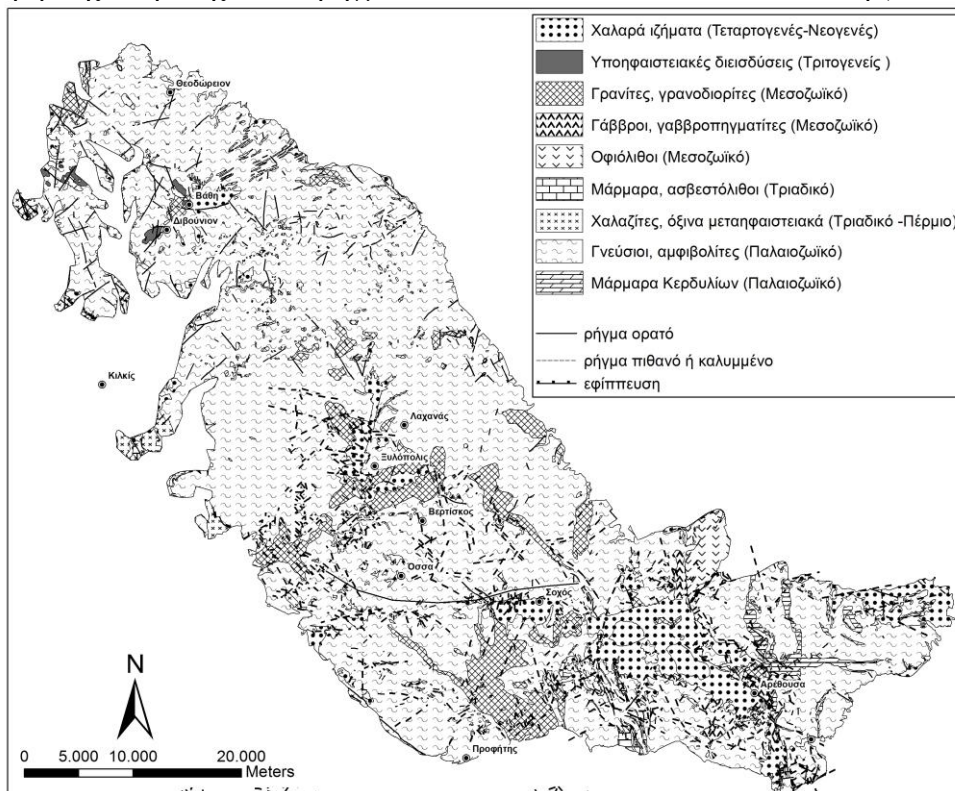
Υποηφαιστειακά πετρώματα Τριτογενούς ηλικίας (15-24 εκ. χρ.), που εντοπίζονται στο δυτικό τμήμα (Βάθη, Γάβρα, Γερακαριό, Ποντοκερασιά) καταλαμβάνουν μικρή έκταση και συνοδεύονται συνήθως από θειούχες μεταλλοφορίες (Fe, Cu). Μολάσσα (Ολιγόκαινο) εντοπίζεται στο νοτιοδυτικό τμήμα στην περιοχή Χρυσανγής.

Κατά θέσεις, τα μεταμορφωμένα και πυριγενή πετρώματα καλύπτονται από χαλαρά ιζημάτα που είναι σύγχρονες αποθέσεις (Τεταρτογενές-Πλειόκαινο). Η κύρια εμφάνιση των χαλαρών ιζημάτων εντοπίζεται στην πεδινή περιοχή λεκάνης Μαυρούδας, όπου καταλαμβάνουν έκταση 94 km² και συνίστανται από: (α) Κώνους κορημάτων, που εντοπίζονται περιμετρικά της ιζηματογενούς λεκάνης και ασύνδετα υλικά αναβαθμίδων (κροκάλες, χαλίκια, άμμους και άργιλο). (β) Αλλουβιακές, ποταμοχειμάρριες, λιμναίες αποθέσεις, που εντοπίζονται στο πεδινό τμήμα και αποτελούνται κυρίως από ιλύ, άργιλο, αργιλοάμμους, αμμώδη χαλαρά υλικά με χαλίκια, κροκάλες σε εναλλασσόμενες στρώσεις καθώς και φακοειδούς μορφής σώματα. Το πάχος των ιζημάτων στα ψηλότερα τοπογραφικά σημεία αρχίζει με μερικά μέτρα και φθάνει χαμηλότερα στο πεδινό τμήμα τα 80-100 m.

Χαλαρά ιζημάτα εντοπίζονται επίσης και σε άλλες περιοχές, κατά μήκος διευρυμένων χειμάρρων ή μικρών κοιλάδων σε μορφολογικά χαμηλές περιοχές ή σε επιφάνειες επιπέδωσης (Σοχός, Ασκός, Λαχανάς, Ξυλόπολη, Φύσκα, Βάθη, Κ. Θεοδωράκιο). Διακρίνονται σε αναβαθμίδες, αλλουβιακές αποθέσεις, πλευρικά κορήματα και αποσαθρώματα, υλικά ελουβιακού μανδύα, παλαιά και νέα πλευρικά κορήματα, κώνοι κορημάτων. Στην περιοχή Βαμβακιάς εντοπίζονται ερυθρές άργιλοι (Πλειόκαινο) κατά θέσεις αμμούχες με ψηφίδες και κροκαλοπαγή μικρής συνοχής ή συνεκτικά.

3.2. ΡΗΞΙΓΕΝΗΣ ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ

Λόγω της έντονης διατμητικής τεκτονικής των Αλπικών πτυχώσεων και της νεοτεκτονικής δραστηριότητας στα μεταμορφωμένα και πυριγενή πετρώματα έχουν αναπτυχθεί συστήματα διακλάσεων, ρωγμές, ρήγματα. Από την επεξεργασία των αεροφωτογραφιών και δορυφορικών εικόνων προκύπτει ότι τα μεταμορφωμένα πετρώματα διατέμνονται από κανονικά ρήγματα σε διευθύνσεις: ΒΔ-ΝΑ, ΒΑ-ΝΔ, Α-Δ και Β-Ν. Μεγαλύτερη συχνότητα έχουν τα ρήγματα σε ΒΔ-ΝΑ και ΒΑ-ΝΔ διεύθυνση (Εικόνα 1).



Εικόνα 1: Απλοποιημένος γεωλογικός χάρτης περιοχής Κερδυλίων - Κρουσίων

Εκτός από τα μεγάλα ρήγματα από την επεξεργασία των αεροφωτογραφιών και δορυφορικών εικόνων προέκυψαν συστήματα από γραμμώσεις (lineations) που αποτελούν εκφράσεις του τοπογραφικού ανάγλυφου και πιθανά σχετίζονται με ζώνες διάρρηξης στα υποκείμενα μεταμορφωμένα ή πυριγενή πετρώματα. Οι γραμμώσεις μπορεί να λειτουργήσουν κύρια ως μέσο αύξησης του δευτερογενούς πορώδους στα πετρώματα αυτά. Τα συστήματα διάρρηξης που αναφέρθηκαν λειτουργούν σαν αγωγοί της κατείσδυσης των κατακρημισμάτων ή διήθησης των επιφανειακών νερών στις κοίτες των υδρορεμάτων (Ahmed et.al., 2008).

4. ΥΔΡΟΛΙΘΟΛΟΓΙΚΑ ΚΑΙ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

4.1. ΥΔΡΟΦΟΡΙΑ ΣΤΑ ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΜΕΝΑ ΚΑΙ ΠΥΡΙΓΕΝΗ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ

Τα διερρηγμένα, μη ανθρακικά, πετρώματα καταλαμβάνουν έκταση 2054 km² (90,4%) και χαρακτηρίζονται ως αδιαπέρατα ή ημιπερατά. Στην κατηγορία αυτή κατατάσσονται τα κρυσταλλοσχιτώδη μεταμορφωμένα και τα πυριγενή πετρώματα. Κατά την κατακόρυφο διάσταση διακρίνονται τρεις υδροστρωματογραφικές ενότητες:

(i) Η *υπερκείμενη υδροστρωματογραφική ενότητα*, όπου η υδροφορία εντοπίζεται κατά θέσεις στην επαφή μεταξύ του διαβρωμένου, αποσαθρωμένου πετρώματος και του υποκείμενου διερρηγμένου μη αποσαθρωμένου αντίστοιχα. Τα κρυσταλλοσχιτώδη και πυριγενή πετρώματα μέχρι βάθους 2-15 m σε πολλές θέσεις είναι διαβρωμένα-αποσαθρωμένα με αυξημένη συμμετοχή αργιλικών ορυκτών και με χαμηλή υδροπερατότητα. Σε μερικές περιοχές, με ομαλές κλίσεις των πρηνών, το πάχος του διαβρωμένου μανδύα φθάνει τα 15-30 m. Το πάχος της ζώνης αποσάθρωσης σχετίζεται με την κλίση του τοπογραφικού ανάγλυφου και το είδος του πετρώματος. Η υδροπερατότητα του διαβρωμένου πετρώματος ποικίλει από θέση σε θέση, αλλά και καθ' ύψος. Από δοκιμές εισπίεσης που έγιναν σε γνευσίους στις περιοχές Καρτεραί και Μαυροράχης, αλλά και σε περιοχές με παρόμοια υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά στη ΒΑ Χαλκιδική, η υδροπερατότητα του διαβρωμένου πετρώματος είναι: $K=10^{-7}$ m/s (10^{-6} - 10^{-9} m/s), (Βεράνης, 2009).

Η αποσάθρωση, διάβρωση σε προχωρημένη φάση δημιουργεί ομογενοποίηση στην υδροπερατότητα και οι διαφορές εξαρτώνται κύρια από την ποικιλία των διερρηγμένων πετρωμάτων (Dewandel et. al., 2010). Το ενεργό πορώδες της αποσαθρωμένης ζώνης κυμαίνεται από 2-15%. Οι μικρότερες τιμές εντοπίζονται εκεί που οι υπεργενετικές διαδικασίες δημιουργούν αργιλικά ορυκτά, αποθέσεις σιδηρούχων και μαγγανιούχων οξειδίων (σχιστόλιθοι, μαρμαρυγιακοί γνευσίοι, αμφιβολίτες, σερπεντινίτες). Οι μεγαλύτερες τιμές (10-15%) εντοπίζονται αντίστοιχα στα γρανιτικά πετρώματα, όπου με τις υπεργενετικές διαδικασίες δημιουργείται κατά θέσεις αποσαθρωμένος μανδύας.

Η υδροστρωματογραφική ενότητα του αποσαθρωμένου μανδύα είναι μικρής υδροδυναμικότητας, αλλά λόγω της μεγάλης εξάπλωσης και του πάχους, έχει σημαντική αποθηκευτική ικανότητα και ενεργεί ως αποθήκη του νερού της βροχής, που το απελευθερώνει αργά, μέσω διήθησης, σε βαθύτερα επίπεδα ή εκφορτίζεται μέσω πηγών και μικροαναβλύσεων στις κοίτες των ρεμάτων συμβάλλοντας έτσι στην αύξηση της επιφανειακής απορροής (Εικόνα 2). Το περισσότερο τμήμα της υπερκείμενης υδροστρωματογραφικής ενότητας αναμένεται να είναι ακόρεστο σε νερό. Ο υδροφορέας των αποσαθρωμένων πετρωμάτων είναι ελεύθερος, ανήκει στην κατηγορία των επικρεμάμενων υδροφορέων και ακολουθεί κατά προσέγγιση την επαφή μεταξύ του υπερκείμενου αποσαθρωμένου και του υποκείμενου μη αποσαθρωμένου πετρώματος.

Επειδή το μη αποσαθρωμένο πέτρωμα τέμνεται από ασυνέχειες, ο επικρεμάμενος υδροφορέας παρουσιάζει κυμαινόμενο πάχος, ανάλογα με την διακύμανση της επιφάνειας μεταξύ διαβρωμένου και μη διαβρωμένου πετρώματος. Ο υδροφορέας αυτός διακόπτεται

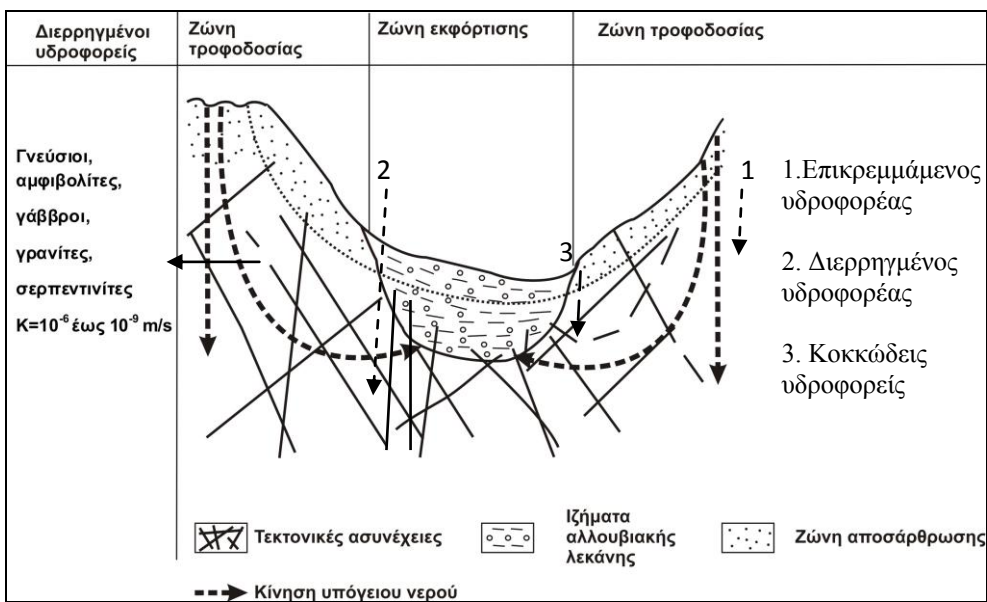
συχνά από μη υδροφόρα τμήματα και η ηλικία του νερού είναι πρόσφατη. Κατά την υγρά περίοδο ο υδροφορέας φορτίζεται και στη συνέχεια συντηρεί μερικώς την επιφανειακή ροή των υδρορευμάτων και τις πηγές.

Οι πηγές εμφανίζονται στις κοίτες των υδρορευμάτων ή σχετίζονται με απότομη αλλαγή στην κλίση του ανάγλυφου, πιθανώς από τεκτονική διάρρηξη και αποδίδονται στην εκφόρτιση του αποσαθρωμένου μανδύα. Οι άξονες των μεγάλων ρεμάτων σε πολλές περιπτώσεις συμπίπτουν με ρήγματα, όπου λόγω της διάρρηξης η υδραυλική αγωγιμότητα είναι μεγαλύτερη και έτσι ερμηνεύεται το γεγονός ότι οι κοίτες των μεγάλων ρεμάτων αποτελούν και ζώνες εκφόρτισης του διερρηγμένου υδροφορέα.

Στην περιοχή έχουν απογραφεί εξήντα επτά (67) πηγές που σε μερικές θέσεις υδρομαστεύονται. Στις περισσότερες περιπτώσεις οι παροχές των πηγών είναι μικρές (0,5-5,0 m³/h), με συνεχή ροή καθόλη την διάρκεια του χρόνου και εποχιακές διακυμάνσεις (Βεράνης κ.ά., 2010). Κατά την ξηρά περίοδο (Ιούνιος-Οκτώβριος) ή σε περιπτώσεις λειψυδρίας, ο επικρεμάμενος υδροφορέας είναι δυνατό να έχει πλήρως αποστραγγιστεί και οι παροχές να ελαττωθούν ή ακόμη και να στερέψουν πλήρως.

(ii) Η *ενδιάμεση υδροστρωματογραφική ενότητα*, όπου τα μη αποσαθρωμένα κρυσταλλοσχιτώδη και πυριγενή πετρώματα διατέμνονται από συστήματα διακλάσεων και κατά θέσεις είναι έντονα τεκτονισμένα από ρήγματα. Το περισσότερο νερό κυκλοφορεί μέσω διακλάσεων, διατμητικών ζωνών και ρηγμάτων. Οι κατακόρυφες κατακλάσεις βοηθούν στην κίνηση του νερού προς τα βαθύτερα επίπεδα και οι οριζόντιες ή με μικρή κλίση για την πλευρική κίνηση αντίστοιχα (Εικόνα 2).

Στα έντονα σχιστοποιημένα πετρώματα (φυλλίτες, χλωριτικοί, μαρμαρυγικοί σχιστόλιθοι, σερπεντινίτες) το δευτερογενές πορώδες δεν αναπτύσσεται εύκολα, οι ρωγμές φράσσουν από αργιλικά ορυκτά και γι αυτό οι συνθήκες υδροφορίας στα πετρώματα αυτά είναι κακές. Περισσότερο ευνοϊκά πετρώματα για ανάπτυξη δευτερογενούς πορώδους είναι τα λευκοκρατικά σε σχέση με τα σκουρόχρωμα και τα αδροκρυσταλλικά σε σχέση με τα μικροκρυσταλλικά πετρώματα. Έτσι, περισσότερο ευνοϊκά για υδροφορία είναι πετρώματα πλούσια σε χαλαζία, όπως οι χαλαζοστριούχοι γρανίτες, οφθαλμογενέσιοι, πηγματίτες, χαλαζίτες, χονδρο-αδροκρυσταλλικοί γάββροι και αμφιβολίτες (Singhal and Gupta, 1999).



Εικόνα 2: Απλοποιημένο σχήμα της κίνησης του υπόγειου νερού σε περιβάλλον αποσαθρωμένων και μη αποσαθρωμένων διερρηγμένων πετρωμάτων

Από την επεξεργασία των δεδομένων των αντλήσεων παρατηρείται μεγάλη ανομοιομορφία στις υδραυλικές παραμέτρους του διερρηγμένου υδροφορέα, που σε ένα βαθμό αποδίδεται σε πετρογενετικές διαφορές που επηρεάζουν το πρωτογενές πορώδες και είναι συνήθως μικρές. Η ανομοιομορφία στην υδρογεωλογική συμπεριφορά αποδίδεται κύρια στο δευτερογενές πορώδες, που σχετίζεται με τον διαφορετικό βαθμό διάρρηξης. Κατά την ανόρυξη των υδρογεωτρήσεων διαπιστώθηκε συχνά ότι ζώνες διάρρηξης εύρους μερικών εκατοστών αποδίδουν ποσότητες νερών 5-20 m³/h.

Το ενεργό πορώδες εξασφαλίζεται από τις ασυνέχειες που διατέμνουν την χαμηλής υδροπερατότητας ($K=10^{-7}$ έως 10^{-8} m/s) μητρική μάζα πετρώματος, ενώ το αγωγίμο δίκτυο των ασυνεχειών αυτών συμβάλλει μόνο στο 10% του ενεργού πορώδους, (Maréchal et. al., 2006). Με μικροτεκτονικές μετρήσεις εκτιμήθηκε ότι η συνολική υδροπερατότητα στους γνευσίους στο νότιο τμήμα της περιοχής είναι: $K=2,3*10^{-6}$ m/s έως $7,1*10^{-7}$ m/s (Δεμίρης και Μελαδιώτης, 1994).

Στην περιοχή Σεβαστού του Ν. Κιλκίς, από αντλητικά δεδομένα προσδιορίστηκε ειδική ικανότητα (S_c) 0,26 m³/h/m, συντελεστής υδατοαγωγιμότητας (T) 2,5 m²/day και υδροπερατότητας (K) $2,0*10^{-6}$ m/s για πάχος διερρηγμένης ζώνης 14 m, ενώ στο σύνολο της κορεσμένης σε νερό ζώνης πάχους 135 m είναι: $K=2,1*10^{-7}$ m/s (Βεράνης κ.ά., 2010).

(iii) Η κατώτερη υδροστρωματογραφική ενότητα που αποτελείται από πετρώματα διερρηγμένα κύρια κατά μήκος τεκτονισμένων ζωνών (Εικόνα 2). Σε μεγαλύτερα βάθη, που συνήθως είναι πάνω από 100 m, οι ασυνέχειες παρουσιάζουν μικρότερη συχνότητα, το εύρος των ελαττώνεται με αποτέλεσμα τη μείωση της υδροπερατότητας του πετρώματος (Singhal and Gupta, 1999). Η μείωση της υδροπερατότητας με το βάθος σχετίζεται και με τις ιδιαίτερες συνθήκες της ρηξιγενούς τεκτονικής της περιοχής (Lachassagne et. al., 2011). Με τη αύξηση του βάθους η υδροφορία περιορίζεται σταδιακά κατά μήκος των τεκτονισμένων μόνο ζωνών. Στις περιοχές Θερμά Νιγρίτας και Νυμφόπετρα εντοπίζονται γεωθερμικά νερά κατά μήκος των ρηγμάτων αυτών.

4.2. ΥΔΡΟΦΟΡΙΑ ΣΤΑ ΑΝΘΡΑΚΙΚΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ

Τα ανθρακικά πετρώματα καταλαμβάνουν συνολικά έκταση 30 km² (1,32%), (Εικόνα 1), σε μερικές περιπτώσεις έχουν τεκτονικά τοποθετηθεί κατά τη διάρκεια των Αλπικών πτυχώσεων στους γνευσίους, είναι αποκομμένα μεταξύ των και ως εκ τούτου δεν επικοινωνούν υδραυλικά για να σχηματίσουν μεγάλα υδροφόρα στρώματα. Λόγω του μικρού πάχους και της μικρής σχετικά έκτασης των, η ανάπτυξη του καρστ είναι περιορισμένη και το ποσοστό κατείσδυσης εκτιμάται ότι είναι 40% (198 mm/χρόνο), (Σούλιος, 2004).

Μεγαλύτερης σχετικά έκτασης (22 km²) είναι οι ορίζοντες μαρμάρου των Κερδυλλίων, πάχους 50-150 m, που απαντούν στο ανατολικό τμήμα και συγκεκριμένα Α-ΒΑ των Στεφανινών και της Αρέθουσας. Με τα μάρμαρα Κερδυλλίων σχετίζονται οι πηγές επαφής που δίνουν παροχές 5-15 m³/h και χρησιμοποιούνται για την ύδρευση των οικισμών Αρέθουσας, Στεφανινών και Δάφνης.

4.3. ΥΔΡΟΦΟΡΙΑ ΣΤΑ ΧΑΛΑΡΑ ΙΖΗΜΑΤΑ

Τα χαλαρά ιζήματα καλύπτουν συνολικά έκταση 190 km² (8,37%), (Εικόνα 1). Διακρίνεται η περιοχή της λεκάνης Μαυρούδας, όπου τα χαλαρά ιζήματα καταλαμβάνουν μεγάλη έκταση (94 km²) με πάχος 20-100 m και συνιστούν ανεξάρτητο κοκκώδες υδροφόρο σύστημα που οριοθετείται σε έκταση 65 km². Τα υδροφόρα στρώματα έχουν συνολικό μέσο πάχος 20-40 m και συνίστανται από κροκάλες, λατύπες, αμμοχάλικες, άμμους, με ποικίλο ποσοστό αργίλου που παρεμβάλλονται μεταξύ στρώσεων ερυθρών, γκρίζων αργίλων. Το

υδροφόρο σύστημα Μαυρούδας κατατάσσεται στα υπό πίεση έως μερικώς πίεση. Παρουσιάζει έντονα μεταβαλλόμενες στο χώρο υδραυλικές παραμέτρους με μέτριες έως χαμηλές τιμές και στο σύνολο του χαρακτηρίζεται από μέση υδροδυναμικότητα. Από δοκιμές άντλησης προέκυψαν τιμές υδροπερατότητας (K) 10^{-4} έως 10^{-6} m/sec και υδατοαγωγιμότητα (T) 10 m²/day έως 86 m²/day. Τα βάθη των γεωτρήσεων κυμαίνονται από 30 έως 120 m και οι παροχές αυτών είναι $20-70$ m³/h, με μέση τιμή τα 35 m³/h (n=34). Το μέσο βάθος της πιεζομετρικής επιφάνειας είναι $4,0$ m με εύρος τιμών από $+0,05$ m έως τα 18 m και το μέσο ετήσιο εύρος διακύμανσής της είναι $1,6$ m. Το μέσο ενεργό πορώδες εκτιμάται ότι είναι 10% και τα ρυθμιστικά αποθέματα είναι: $V_p=65\text{km}^2*1,6\text{m}*0,1 = 10,4*10^6$ m³/χρόνο. Από τις σταθμημετρήσεις στο υδροφόρο σύστημα Μαυρούδας δεν παρατηρείται διαχρονικά ταπείνωση της πιεζομετρικής επιφάνειας (Βεράνης κ.ά., 2010).

Μικρότερης έκτασης και πάχους ($10-40$ m) χαλαρά ιζήματα εντοπίζονται κύρια στις περιοχές Βαμβακιάς, Ασκός, Σοχού, Ξυλόπολης, Λαχανά, Βάθης και Κ. Θεοδωράκιο. Λόγω της κακής διαβάθμισής των, τα χαλαρά ιζήματα γενικά χαρακτηρίζονται από μεγάλη συμμετοχή των αργιλικών ορυκτών. Η τροφοδοσία τους γίνεται από την πλευρική διήθηση νερών των διερρηγμένων πετρωμάτων και από την άμεση κατείσδυση. Η κατείσδυση στα χαλαρά ιζήματα ποικίλει αναλόγως της κοκκομετρίας, της κλίσης του ανάγλυφου από $8-15\%$ με μέση τιμή 12% (60 mm/χρόνο), (Σούλιος, 2004).

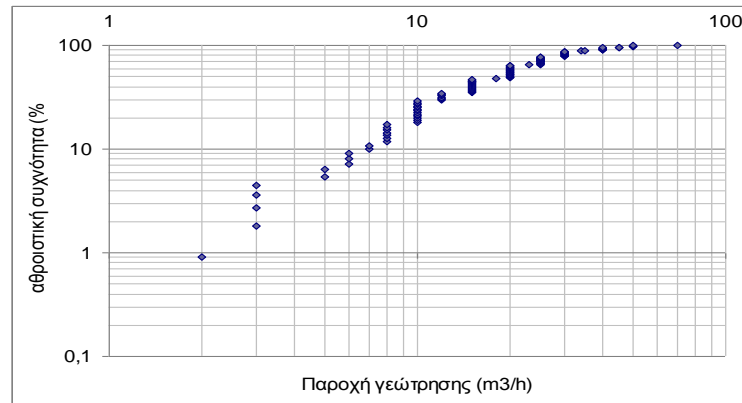
4.4. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΤΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ ΣΤΑ ΔΙΕΡΡΗΓΜΕΝΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ

Κατά την υδρογεωλογική έρευνα μελετήθηκαν εκατό είκοσι (120) υδρογεωτρήσεις που ανορύχθηκαν στα διερρηγμένα μεταμορφωμένα ή πυριγενή πετρώματα αλλά μερικές φορές περιλαμβάνουν και τα υπερκείμενα χαλαρά ιζήματα ή πολύ σπάνια φακούς ανθρακικών πετρωμάτων. Η διάμετρος των γεωτρήσεων είναι 15 mm, και η διάτρηση έγινε συνήθως με σφύρα. Το μέσο βάθος ανόρυξης είναι 113 m ($30-250$) και στο 50% των γεωτρήσεων το βάθος είναι $100-150$ m.

Παροχή γεωτρήσεων: Οι παροχές των εν ενεργεία γεωτρήσεων είναι συνήθως $5-30$ m³/h, με γεωμετρικό μέσο τα 18 m³/h (Εικόνα 3). Παρουσιάζεται μεγάλο εύρος διακύμανσης της παροχής ακόμη και σε γειτονικές θέσεις που είναι χαρακτηριστικό των γεωτρήσεων σε διερρηγμένους υδροφορείς (Singhal & Gupta, 1999). Μεγαλύτερες παροχές ($20-30$ m³/h) εντοπίζονται σε περιοχές με ομαλές κλίσεις των πρανών, όπου το πάχος του αποσαθρωμένου μανδύα είναι μεγάλο ($20-30$ m), όπου διέτρησαν και τα υπερκείμενα χαλαρά ιζήματα πάχους $20-40$ m ή όπου ο υδροφορέας εμπλουτίζεται από τη διήθηση επιφανειακής απορροής των υδρορεμάτων (Σοχός, Ασκός, Βάθη, Κεντρικό, Γάβρα, Πλαγιά).

Παροχές ($20-40$ m³/h) αποδίδουν οι γεωτρήσεις που διέτρησαν φακούς ανθρακικών πετρωμάτων (Ανοιξιά, Φιλαδέλφιο, Ασκός), αλλά εντοπίζονται σπάνια. Οι μικρότερες παροχές ($3-8$ m³/h) εντοπίζονται σε γεωτρήσεις στους μαρμαρυγιακούς γνευσιοσχιστόλιθους στο βοριοδυτικό τμήμα της περιοχής. Μικρές παροχές ($3-10$ m³/h) απέδωσαν οι γεωτρήσεις που ανορύχθηκαν στον γρανίτη Ξυλόπολης. Η επιλογή των θέσεων ανόρυξης έγινε χωρίς προηγούμενη υδρογεωλογική έρευνα και αναφέρονται αρκετές περιπτώσεις όπου δεν εντοπίστηκε υδροφορία.

Στις υδρευτικές γεωτρήσεις που αντλούνται έντονα, παρατηρείται διαχρονικά μείωση στην παροχή τους, με αποτέλεσμα σε διάστημα $5-10$ χρόνων να απαιτείται αντικατάστασή τους. Κατά την άντληση εμπλέκονται και τα μόνιμα αποθέματα και αποδίδεται αυτό στη μικρή αποθηκευτική ικανότητα του διερρηγμένου υδροφορέα. Η μέση τιμή στο ενεργό πορώδες στα διερρηγμένα πετρώματα εκτιμάται ότι είναι 2% , με εύρος τιμών $0,2-5\%$ (Maréchal et. al. 2006, Dewandel et. al. 2010).



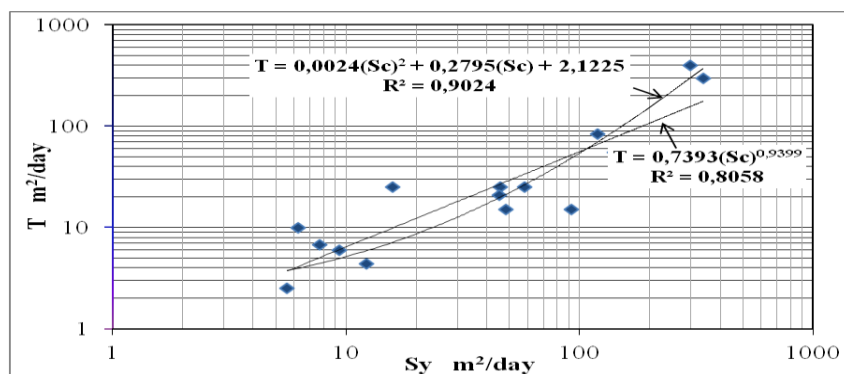
Εικόνα 3: Κατανομή της παροχής σε γεωτρήσεις του διερρηγμένου υδροφόρου συστήματος Κερδυλλίων -Κρουσίων

Ειδική ικανότητα: Η ειδική ικανότητα (Sc) υπολογίσθηκε από το πηλίκο της παροχής προς την πτώση στάθμης μετά από 24h άντληση και χωρίς να γίνουν διορθώσεις από τις παρεμβολές του αμμόφιλτρου ή των φίλτρων της γεώτρησης. Από δεδομένα δοκιμών άντλησης που αναφέρονται στις τομές των γεωτρήσεων διαπιστώνεται ότι στους διερρηγμένους υδροφορείς είναι: $Sc=0,07-6,5 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$. Η υδροφορία στους διερρηγμένους γρανίτες και μαρμαρυγικούς γενυσιοσχιστόλιθους έχει τις πιο χαμηλές αποδόσεις με $Sc=0,5-0,07 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$. Από τα αντλητικά δεδομένα σε δεκαοκτώ (18) γεωτρήσεις που ανορύχθηκαν σε γενυσίους και αμφιβολίτες του σχηματισμού Βερτίσκου κύρια στην περιοχή της ΒΑ Χαλκιδικής, αλλά και σε περιοχές των Κρουσίων (Βεράνης, 2009, Βεράνης κ.ά., 2010), προέκυψαν οι σχέσεις (4.1 & 4.2), (Εικόνα 4):

$$T=0,0024*(Sc)^2+0,2795*(Sc)+2,1225 \quad (R^2=0,9024) \quad (4.1)$$

$$\text{και } T=0,7393(Sc)^{0,94} \quad (R^2=0,8058) \quad (4.2)$$

Οι τιμές της υδατοαγωγιμότητας υπολογίσθηκαν με τη μέθοδο Flow Characteristic (Van Tonder et. al., 2001). Με βάση τη σχέση (4.1) και τις τιμές της ειδικής ικανότητας, που προκύπτουν από τις τομές των γεωτρήσεων ($n=70$) κατανεμημένες στο ορεινό συγκρότημα των Κρουσίων, έγινε ο υπολογισμός της υδατοαγωγιμότητας (T) στους διερρηγμένους υδροφορείς.



Εικόνα 4: Συσχέτιση μεταξύ της ειδικής ικανότητας γεωτρήσεων και του συντελεστή υδατοαγωγιμότητας στους διερρηγμένους υδροφορείς του σχηματισμού Βερτίσκου

Οι τιμές του συντελεστή (T) κυμαίνονται από 2 m²/day έως 108 m²/day, με αριθμητικό μέσο τα 14 m²/day (±20) και γεωμετρικό μέσο τα 8,0 m²/day. Το 65% των γεωτρήσεων ανήκει στην κατηγορία με τιμές: T=2-10 m²/day και το 80% στην κατηγορία 2-15,5 m²/day αντίστοιχα. Οι τιμές T=1-10 m²/day χαρακτηρίζουν διερρηγμένους υδροφορείς με φτωχή υδροφορία κατάλληλους μόνο για υδρογεωτρήσεις ατομικής χρήσης, οι τιμές 10-100 m²/day δηλώνουν ενδιάμεση υδρο-οικονομικότητα κατάλληλη για υδρευτικές γεωτρήσεις σε μικρούς οικισμούς ή κτηνοτροφικές μονάδες, κτλ), (Krazny, 1993).

Πιεζομετρία: Το μέσο βάθος της στάθμης/πιεζομετρικής επιφάνειας στους διερρηγμένους υδροφορείς είναι 7 m με εύρος διακύμανσης +0,1 m έως 120 m. Από τις συστηματικές μετρήσεις στάθμης που έγιναν σε είκοσι (20) γεωτρήσεις που εντοπίζονται σε διερρηγμένους γνευσίους στο δυτικό τμήμα της περιοχής, προκύπτει ότι διαμορφώνεται ανάλογα με τη θέση του στη λεκάνη απορροής, υδροφορέας ελεύθερος έως μερικώς υποπίεση και η υδραυλική κλίση ακολουθεί κατά προσέγγιση το τοπογραφικό ανάγλυφο. Οι τιμές της υδραυλικής κλίσης είναι σχετικά υψηλές: $i=0,07$ (0,2-0,01). Το εύρος της ετήσιας διακύμανσης της στάθμης/πιεζομετρικής επιφάνειας ποικίλει ανάλογα με τη θέση της γεώτρησης στην τοπογραφία της λεκάνης απορροής, το πάχος του εδαφικού μανδύα και διαβρωμένου αποσαθρωμένου πετρώματος, το βαθμό διάρρηξης και την ένταση - κατανομή των βροχοπτώσεων. Γενικά χαμηλές τιμές διακύμανσης (0,1-1,5 m) παρατηρούνται σε γεωτρήσεις που βρίσκονται στη ζώνη εκφόρτισης στα χαμηλότερα σημεία της λεκάνης απορροής ή όπου το πάχος του εδαφικού μανδύα, αποσαθρωμένου πετρώματος είναι μεγάλο. Αντίθετα απότομες αλλαγές στο βάθος της στάθμης/πιεζομετρικής επιφάνειας που φθάνουν τα 5-10 m, παρατηρούνται στη ζώνη τροφοδοσίας του υδροφορέα, εκεί που το έδαφος, αποσαθρωμένος μανδύας απουσιάζει ή έχει μικρό πάχος και όπου είναι μικρός ο βαθμός διάρρηξης του πετρώματος.

Κατά την υγρά περίοδο σταθμημετρήσεις έγιναν συνήθως στο διάστημα 15 Απριλίου-15 Μαΐου και την ξηρά περίοδο στο διάστημα 15 Σεπτεμβρίου-15 Οκτωβρίου, κατά τα έτη 2005-2008. Στο εύρος διακύμανσης προέκυψε γεωμετρικός μέσος όρος 1,40 m με ελάχιστες τιμές 0,1 και μέγιστες 4,0 m. Παρατηρείται γενικά ταπείνωση της στάθμης/πιεζομετρικής επιφάνειας που κυμαίνεται από 0,1-0,6 m/χρόνο, με μέση τιμή 0,34 m/χρόνο για δεκατρείς (13) γεωτρήσεις. Σε τέσσερες (4) γεωτρήσεις η στάθμη είναι σχετικά αμετάβλητη με μείωση μόνο 0,01-0,05 m/χρόνο και σε (3) τρεις γεωτρήσεις παρατηρείται άνοδος (0,22-0,98 m/χρόνο). Η υποχώρηση της στάθμης/ πιεζομετρικής επιφάνειας αποδίδεται στις υπεραντλήσεις ή στη μείωση της κατείσδυσης και η άνοδος σχετίζεται με μείωση ή και διακοπή των αντλήσεων. Από τις σταθμημετρήσεις στις είκοσι (20) γεωτρήσεις, που εντοπίζονται τους γνευσίους στο δυτικό τμήμα της περιοχής, υπολογίστηκε πρόδρομα ο συντελεστής κατείσδυσης κατά την υγρά περίοδο. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η μέση ετήσια διακύμανση της στάθμης/πιεζομετρικής επιφάνειας μεταξύ Οκτωβρίου και Μαΐου είναι $\Delta s=1,37$ m, τα μέσα αντίστοιχα κατακρημνίσματα για το διάστημα αυτό είναι $P=350$ mm, το μέσο ενεργό πορώδες (S_y) στους διερρηγμένους γνευσίους, γρανίτες εκτιμάται ότι είναι 2%, από τη σχέση:

$$\alpha = \frac{\Delta s}{P} * S_y = \frac{1,37}{0,350} * 0,02 = 0,0783 \quad (4.3)$$

(Marechal et. al. 2006, Moon et. al., 2004), προκύπτει μέση τιμή του συντελεστού κατείσδυσης $\alpha=8\%$, που είναι 40 mm/χρόνο. Σημειώνεται ότι με τη μέθοδο των χλωροϊόντων σε γνευσίους της περιοχής ΒΑ Χαλκιδικής προέκυψε συντελεστής κατείσδυσης 8% (6-10%) (Βεράνης, 2009). Παρόλα αυτά, η επαναπλήρωση των διερρηγμένων υδροφορέων από τα κατακρημνίσματα, προτείνεται να διερευνηθεί περαιτέρω με τις παραπάνω αλλά και με άλλες μεθόδους (Healy and Scanlon, 2010).

4.5. ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΥΝΟΟΥΝ ΤΗΝ ΥΔΡΟΦΟΡΙΑ ΣΤΑ ΔΙΕΡΡΗΓΜΕΝΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ

Οι υφιστάμενες γεωτρήσεις ανορύχθηκαν με βάση κυρίως τα οικονομικά κριτήρια (υποδομή, προσπέλαση, αποστάσεις από οικισμούς, όρια κτήματος). Στην χωροθέτηση όμως περιοχών που θεωρούνται ως πλέον πιθανές για εντοπισμό αξιόλογης υδροφορίας σε διερρηγμένα πετρώματα, λαμβάνονται υπόψη συγκεκριμένα γεωμορφολογικά, γεωλογικά, υδρολογικά, υδρογεωλογικά και γεωφυσικά κριτήρια (Sander, 1997, Mondal, 2011, Singhal and Gupta, 1999).

Η κάλυψη γενικά των διερρηγμένων πετρωμάτων από χαλαρά περατά ιζήματα ικανού πάχους, σε στενές κοιλάδες με ομαλή κλίση και μικρή απόσταση από υδρόρεμα με επιφανειακή απορροή αυξάνουν την τροφοδοσία των διερρηγμένων υδροφορέων. Ευνοϊκοί παράγοντες είναι το μεγάλο εύρος, μήκος, η αυξημένη πυκνότητα και η υδραυλική ενδοεπικοινωνία των ασυνεχειών καθώς και οι ανοιχτές ασυνέχειες που δεν έχουν κλείσει από απόθεση άλλων υλικών (αργιλικά, ασβεστίτη). Θετικός παράγοντας είναι επίσης η εφελκυστική τεκτονική επειδή διευκολύνει την κυκλοφορία του υπόγειου νερού έναντι της συμπίεστικής αντίστοιχα. Τα επίπεδα σχιστότητας ή διαρρήξεις με μικρή γωνία κλίσης προτιμώνται από τις κατακόρυφες επειδή προσφέρουν μεγαλύτερη πιθανότητα να συναντηθούν κατά την διάτρηση. Οι διαδικασίες της διάβρωσης αποτελούν τον κύριο παράγοντα στην αύξηση της υδροπερατότητας των διερρηγμένων πετρωμάτων (Lachassagne et. al. 2011), ειδικά στις λιγότερο τεκτονισμένες περιοχές. Τα μεγάλα πάχη εδαφικού μανδύα και αποσαθρωμένου πετρώματος, τα λευκοκρατικά και χονδρο-αδροκρυσταλλικά πετρώματα, η μεγάλη έκταση της λεκάνης απορροής ανάντη της γεώτρησης, η μεγάλη πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου, η βροχόπτωση και η βλάστηση θεωρούνται ευνοϊκοί παράγοντες. Οι παράμετροι που αναφέρθηκαν βαθμονομούνται ανάλογα και τελικά προσδιορίζονται με μικρό κόστος σε θεματικούς ή συνθετικούς ψηφιακούς χάρτες οι πλέον ευνοϊκές περιοχές για την υδροφορία (Mondal, 2011).

Για τη θέση ανόρυξης της γεώτρησης λαμβάνονται υπόψη και τα αποτελέσματα της γεωφυσικής διασκόπησης εδάφους (VLF, Resistivity, Georadar) στις επιλεγμένες περιοχές. Στις μεγάλες ρηξιγενείς δομές η θέση κατασκευής είναι πλησίον, αλλά όχι εντός της ζώνης διάρρηξης, όπου λόγω των ορυκτών εξαλλοίωσης είναι δυνατό να μειωθεί υδροπερατότητα και να επιβαρυνθεί η ποιότητα του νερού. Σε μερικές περιπτώσεις είναι δυνατό να αυξηθεί η παροχή με τεχνητή αύξηση της υδροπερατότητας με υδραυλική θραύση ή εκρηκτικά. Το βάθος διάτρησης είναι επίσης σημαντικός παράγοντας, καθώς σε βαθύτερα επίπεδα (>100 m) οι ασυνέχειες είναι αραιότερες, έχουν μικρότερο εύρος, αλλά αυτό εξαρτάται και από την νεοτεκτονική δραστηριότητα της περιοχής. Έτσι, υπάρχουν περιπτώσεις όπου ακόμη και σε βάθη 170-230 m είχαμε ικανοποιητικές παροχές. Από τις υδρογεωτρήσεις που ανορύχθηκαν μέχρι σήμερα στην περιοχή, εκτιμάται ότι ένα βάθος διάτρησης 150-230 m είναι αναγκαίο και αρκετό. Παρόλο που η ετερογένεια και ανισοτροπία των υδραυλικών παραμέτρων στα διερρηγμένα πετρώματα δημιουργούν δυσκολίες στην πρόβλεψη για εντοπισμό αξιόλογης υδροφορίας (Ahmed et. al., 2008), η εφαρμογή των παραπάνω κριτηρίων αναμένεται να βελτιώσει σημαντικά το ποσοστό επιτυχίας των νέων γεωτρήσεων στην περιοχή.

5. ΥΔΑΤΙΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΚΑΙ ΧΡΗΣΕΙΣ ΝΕΡΩΝ

Εισροές: Από την επεξεργασία δεδομένων των μετεωρολογικών σταθμών της περιοχής που έγινε σε προηγούμενες μελέτες, προκύπτει ότι τα μέσα ετήσια κατακρημνίσματα κατά την περίοδο 1980-2001 είναι 496 mm. Η μέση ετήσια πραγματική εξατμισοδιαπνοή υπολογίζεται ότι είναι 383 mm (77,3%) και η ωφέλιμη απορροή είναι 113 mm (22,7%), (Βεράνης κ.ά., 2010). Η μέση κατείσδυση, με βάση τα δεδομένα που αναφέρθηκαν

προηγούμενα και από την κατανομή των πετρωμάτων στον ψηφιακό γεωλογικό χάρτη υπολογίζεται ότι είναι 44 mm/χρόνο (8,8%). Η επιφανειακή απορροή υπολογίζεται από την εξίσωση του υδρολογικού ισοζυγίου και είναι 69 mm/χρόνο. Με βάση τα παραπάνω, οι ποσότητες νερών που κατεισδύουν ανέρχονται σε $99 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{χρόνο}$ και αυτές που απορρέουν ανέρχονται σε $157 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{χρόνο}$. Από τη μελέτη του υδατικού ισοζυγίου προκύπτει ότι υφίστανται διαθέσιμες ποσότητες επιφανειακών νερών που αν αποθηκευθούν σε μικρά φράγματα ή υδατοδεξαμενές μπορούν να επιλύσουν τις σημερινές αλλά και τις μελλοντικές ανάγκες για την άρδευση, βιοτεχνία και βιομηχανία.

Εκροές: Οι εκροές διακρίνονται στις ποσότητες νερών που αντλούνται και στην φυσική εκφόρτιση. Οι καταναλώσεις υδρευτικού νερού για μόνιμο πληθυσμό 30.000 κατοίκων που προέρχεται από πηγές και γεωτρήσεις ανέρχονται σε $4 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{χρόνο}$.

Οι αρδευθείσες εκτάσεις κατά το 2005-08 υπολογίζονται σε 16.300 στρ., από τα οποία τα 4000 στρ. αρδεύονται από υδατοδεξαμενές που εντοπίζονται στις περιοχές Αρετή, Μαυρούδα, Κ. Θεοδωράκιο ενώ τα υπόλοιπα 12.300 στρ. από αντλήσεις υπόγειων νερών. Χωρικά οι αντλήσεις υπόγειων νερών για την άρδευση 9100 στρ. εντοπίζονται στο κοκκώδες υδροφόρο σύστημα Μαυρούδας, ενώ η άρδευση 3.200 στρ. γίνεται από γεωτρήσεις των διερχομένων υδροφορέων.

Στο κοκκώδες υδροφόρο σύστημα Μαυρούδας, οι κύριες υδροβόρες καλλιέργειες είναι το καλαμπόκι (7000 στρ.) και ακολουθούν η μηδική, τα ζαχαρότευτλα, τα κηπευτικά, τα δένδρα, ο ηλίανθος και ο καπνός. Υπολογίστηκε ότι οι καταναλώσεις σε αρδευτικό νερό ανέρχονται σε $750 \text{ m}^3/\text{στρ.}$ ή $7,0 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{χρόνο}$. Από την ποσότητα αυτή το 15% ($1,0 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{χρόνο}$) επιστρέφει στον υδροφόρο ορίζοντα, άρα η καθαρή κατανάλωση αρδευτικού νερού είναι $6,0 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{χρόνο}$ (Βεράνης κ.ά., 2010).

Στους διερχομένους υδροφορείς οι περισσότερες αρδευτικές γεωτρήσεις εντοπίζονται στις περιοχές Σοχού, Ασκού και οι υδροβόρες καλλιέργειες είναι: ηλίανθος, δένδρα, μηδική, κηπευτικά. Λαμβάνοντας υπόψη την στρεμματική κατανομή των διαφόρων καλλιεργειών στα διερχομένα πετρώματα και τα βιβλιογραφικά δεδομένα, εκτιμάται ότι απαιτείται μέση ποσότητα νερών $530 \text{ m}^3/\text{στρ.}$ ή $1,7 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{χρόνο}$ (ENM & Ειδικοί Σύμβουλοι, 2008). Από αυτές ποσοστό 10-15% επιστρέφει στο υδροφόρο σύστημα. Οι συνολικές ποσότητες νερών που αντλούνται από τους κοκκώδεις και διερχομένους υδροφορείς για την άρδευση ανέρχονται σε $7,7 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{χρόνο}$. Οι άλλες καταναλώσεις υπόγειων νερών είναι για την κτηνοτροφία ($1,1 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{χρόνο}$) και για τη βιοτεχνία, βιομηχανία ($0,2 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{χρόνο}$), (ENM & Ειδικοί Σύμβουλοι, 2008). Το σύνολο των καταναλώσεων νερών από αντλήσεις και πηγές στο ορεινό συγκρότημα Κερδυλλίων –Κρουσίων ανέρχεται σε $13 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{χρόνο}$.

6. ΥΔΡΟΧΗΜΕΙΑ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕΡΩΝ

Δείγματα νερών συλλέχθηκαν κατά το χρονικό διάστημα 2005-2008 σε εκατό είκοσι δύο (122) γεωτρήσεις, σε είκοσι (20) πηγές που εντοπίζονται στα διερχομένα και ανθρακικά πετρώματα καθώς και σε είκοσι μία (21) γεωτρήσεις από το κοκκώδες υδροφόρο σύστημα Μαυρούδας. Τα δείγματα αναλύθηκαν για τα στοιχεία: Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , Cl^- , NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , PO_4^{2-} , SiO_2 , F, B, Fe, Mn, As, Cr, Pb, Zn, Cu, Cd, Co, Ni, Sb, Mo, Se, Sr. Τα αποτελέσματα των προσδιορισμών είναι καταχωρημένα σε βάση δεδομένων και οι υδροχημικοί χάρτες κατανομής των ιχνοστοιχείων παρουσιάζονται σε προηγούμενες εργασίες του ΙΓΜΕ (Βεράνης κ.ά., 2010).

Διερχομένοι υδροφορείς: Η μέση τιμή του pH είναι 7,54 (6,0-8,5), ενώ νερά με pH 6,0 έως 6,5 εντοπίζονται σπάνια, ιδιαίτερα σε περιοχές όπου επικρατούν γρανιτικά πετρώματα ή οι χαλαζίτες. Οι αγωγιμότητες κυμαίνονται από 225 έως 2200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ με γεωμετρικό μέσο 670 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Τα άλατα εν διαλύσει (TDS) είναι 130 έως 1560 mg/l με γεωμετρική μέση τιμή

450 mg/l. Οι υψηλές τιμές της αγωγιμότητας (1500-2200 $\mu\text{S}/\text{cm}$) που εντοπίζονται σε μερικές γεωτρήσεις στους γνευσίους, σχετίζονται με αυξημένες τιμές στις θεικές και νιτρικές ρίζες. Η ολική σκληρότητα έχει μέση τιμή 284 mg/l και κυμαίνεται από 180 έως 817 mg/l (σε ισοδύναμο CaCO_3). Τα νερά κατατάσσονται γενικά στα ενδιάμεσα σκληρά έως πολύ σκληρά.

Οι τιμές του οξυγόνου εν διαλύσει (DO) κυμαίνονται από 1,32 έως 9,5 mg/l με θερμοκρασίες του νερού που κυμαίνονται γενικά από 8,0 έως 20,0 $^{\circ}\text{C}$. Οι τιμές του DO είναι γενικά υψηλές και χαρακτηρίζουν τους ελεύθερους έως μερικώς υπό πίεση υδροφορείς που βρίσκονται σχετικά κοντά στη ζώνη τροφοδοσίας. Οι χαμηλές τιμές στο DO αποδίδονται και στη δέσμευσή του από τα σιδηρο-οξειδία (Singhal and Gupta, 1999).

Οι τιμές του νατρίου είναι γενικά χαμηλές, κυμαίνονται από 4 έως 140 mg/l με μέση τιμή 26 mg/l. Οι θεικές ρίζες κυμαίνονται από 7,8 έως 380 mg/l, με μέση τιμή 74 mg/l SO_4 . Οι μεγαλύτερες τιμές (250-380 mg/l SO_4) εντοπίζονται σπάνια και σχετίζονται με αποθέσεις γύψου στις κατακλάσεις ή διάσπαρτου σιδηροπυρίτη (FeS_2) στους γνευσίους. Οι τιμές του ασβεστίου κυμαίνονται από 4 έως 159 mg/l με μέση τιμή 67 mg/l, του μαγνησίου είναι από 0,5 έως 122 mg/l με μέση τιμή 29 mg/l. Οι μεγαλύτερες περιεκτικότητες σε μαγνήσιο εντοπίζονται σε περιοχές με υπερβασικά-βασικά πετρώματα, όπως στις πηγές περιοχής Θερωμών. Τα χλωροϊόντα είναι σε χαμηλές συγκεντρώσεις με μέση τιμή 20 mg/l και εύρους τιμών από 3,5 έως 177 mg/l.

Οι τιμές των νιτρικών (NO_3) κυμαίνονται από 0,5 έως 180 mg/l, με γεωμετρικό μέσο τα 4,0 mg/l και σε ποσοστό 8% των δειγμάτων τα νιτρικά υπερβαίνουν την τιμή των 50 mg/l, που έχει θεσπισθεί για το πόσιμο νερό (οδηγία 98/83/EC). Τιμές νιτρικών μέχρι 10 mg/l θεωρούνται φυσιολογικές, που σημαίνει ότι στους διερρηγμένους υδροφορείς περιοχής Κερδυλλίων-Κρουσίων υφίσταται τοπικά ρύπανση που αποδίδεται στα κτηνοτροφικά, οικιστικά απόβλητα και στη χρήση λιπασμάτων.

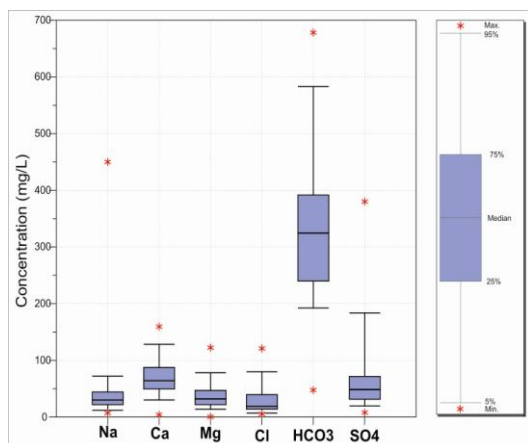
Οι συγκεντρώσεις του σιδήρου και του μαγγανίου σε αρκετές γεωτρήσεις, πηγές είναι υψηλές, που κυμαίνονται από 10-3500 $\mu\text{g}/\text{l}$ για το σίδηρο και 10-700 $\mu\text{g}/\text{l}$ για το μαγγάνιο αντίστοιχα. Το 20% των δειγμάτων υπερβαίνουν για το πόσιμο νερό το όριο των 200 $\mu\text{g}/\text{l}$ για το Fe και το 35% των δειγμάτων το όριο των 50 $\mu\text{g}/\text{l}$ για το Mn αντίστοιχα. Οι αιτίες της γηγενούς αυτής ρύπανσης αποδίδονται στην υδρόλυση πετρογενετικών κυρίως ορυκτών (βιοτίτης, αμφίβολοι) ή σε οξείδωση θειούχων ορυκτών (FeS_2) που απαντούν σε διάσπαρτους κρυστάλλους στους γνευσίους.

Οι μέσες τιμές του φθορίου είναι 0,445 mg/l, αλλά σε μερικές γεωτρήσεις είναι αυξημένες (1,8-4,6 mg/l), οπότε υπερβαίνουν το όριο για το πόσιμο νερό (1,5 mg/l) και χωρικά σχετίζονται με γρανιτικά πετρώματα που εντοπίζονται στις περιοχές Μυριόφυτου, Νυμφόπετρας ή με γνευσίους στις περιοχές Κολχικού και Σεβαστού.

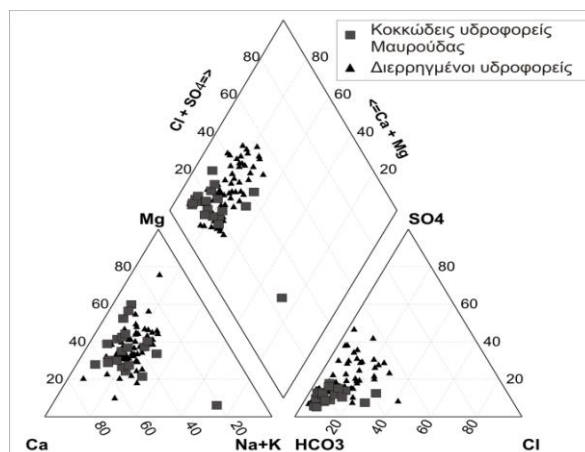
Τα υπόγεια νερά στους γρανιτογενείς περιοχές Νυμφόπετρας περιέχουν σχετικά αυξημένες συγκεντρώσεις σε ουράνιο (25-193 $\mu\text{g}/\text{l}$), ραδόνιο (1600-4860 pCi/l (Veranis 2002)). Οι τιμές του αρσενικού είναι γενικά χαμηλές (<10 $\mu\text{g}/\text{l}$). Εξαίρεση αποτελεί μια γεωτρήση στην περιοχή Σεβαστού, όπου το αρσενικό είναι 50 $\mu\text{g}/\text{l}$ As.

Κοκκώδες υδροφόρο σύστημα Μαυρούδας: Σε δείγματα νερών από γεωτρήσεις, το pH είναι 7,61 (7,15 - 8,87), οι αγωγιμότητες είναι 795 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (295-1330). Η μέση τιμή στο οξυγόνο εν διαλύσει (DO) είναι 3,5 mg/l με εύρος τιμών από < 1,0 έως 6,5 mg/l, με θερμοκρασίες νερού από 14 έως 17 $^{\circ}\text{C}$. Η ολική σκληρότητα έχει μέση τιμή 339 mg/l (σε ισοδύναμο CaCO_3) με εύρος τιμών από 239 έως 507 mg/l. Οι μέσες τιμές και διακυμάνσεις των κύριων ιόντων είναι ως εξής: οξυ-ανθρακικά 375 mg/l (114-606), νιτρικές ρίζες 17 mg/l (0,4 -57), χλωροϊόντα 30 mg/l (11-121), θεικές ρίζες 44 mg/l (13-75), κάλιο 3,0 mg/l (1-6), νάτριο 32 mg/l (12-104), ασβέστιο 74 mg/l (11-132), μαγνήσιο 37 mg/l (2-66), σίδηρος 37 $\mu\text{g}/\text{l}$ (2-66). Τα υπόλοιπα ιχνοστοιχεία (B, Cr, Pb, Zn, Cu, Cd, Co, Ni, Sb, Mo, Se,) στους διερρηγμένους αλλά και στους κοκκώδεις υδροφορείς είναι γενικά σε χαμηλές

συγκεντρώσεις (Βεράνης κ.ά., 2010). Σύμφωνα με το διάγραμμα Box –Whisker (Εικόνα 5) η σειρά των κύριων ιόντων τόσο στους διερρηγμένους όσο και στους κοκκώδεις υδροφορείς είναι: $Ca > Mg > Na$ και $HCO_3 > SO_4 > Cl$. Από τα γνωστά διαγράμματα Piper (Εικόνα 6) προκύπτει ότι τόσο στους διερρηγμένους όσο και στους κοκκώδεις υδροφορείς επικρατούν οι τύποι $Ca \pm Mg - HCO_3$, που σημαίνει μετεωρική προέλευση νερών. Σε ποσοστό 30% των δειγμάτων από τους διερρηγμένους υδροφορείς εμφανίζονται οι τύποι νερών $Ca - Mg - Na - HCO_3 \pm SO_4 \pm Cl$, που αποδίδονται στην υδρόλυση των πλαγιοκλάστων, αστρίων, γύψου και σε αντιδράσεις ιοντοανταλλαγής που γίνονται σε μεγαλύτερα βάθη. Κατά την υδρόλυση απελευθερώνονται ιόντα Ca , Na , αλλά στη συνέχεια το Ca καθιζάνει σαν ασβεστίτης οπότε γίνεται εμπλουτισμός σε Na (Singhal and Gupta, 1999).



Εικόνα 5: Διάγραμμα Box –Whisker



Εικόνα 6: Διαγράμματα Piper

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το ορεινό συγκρότημα Κερδυλλίων –Κρουσίων (2270 km²) συνίσταται από μεταμορφωμένα και πυριγενή πετρώματα (90,4%), με μικρή συμμετοχή (1,3%) των ανθρακικών πετρωμάτων, ενώ σε ποσοστό 8,3% καλύπτεται από χαλαρές αποθέσεις πάχους 20-100 m. Οι διερρηγμένοι υδροφορείς εντοπίζονται στην επαφή μεταξύ διαβρωμένου και μη διαβρωμένου πετρώματος καθώς και σε βαθύτερα επίπεδα στα διερρηγμένα πετρώματα. Οι παροχές των πηγών είναι συνήθως 0,5- 5,0 m³/h, ενώ στα μάρμαρα των Κερδυλλίων είναι 5-15 m³/h. Οι μέσες παροχές των γεωτρήσεων είναι 18 m³/h (5-30 m³/h). Η υδροφορία στα διερρηγμένα πετρώματα είναι χαμηλής έως μέτριας υδρο-οικονομικότητας, αλλά σημαντικής για την επίλυση των αναγκών νερού της τοπικής κοινωνίας. Στην περιοχή Μαυρούδας οι χαλαρές αποθέσεις φιλοξενούν κοκκώδες υδροφόρο σύστημα μέσης υδροδυναμικότητας, με παροχές γεωτρήσεων 35 m³/h (20-70 m³/h). Οι καταναλώσεις υπόγειων νερών ανέρχονται συνολικά σε 13*10⁶ m³/χρόνο. Τα υπόγεια νερά είναι κατάλληλα για άρδευση, αλλά το συνηθέστερο πρόβλημα για εντοπισμό υδρευτικού νερού, αποτελούν οι σχετικά υψηλές συγκεντρώσεις στα στοιχεία μαγγάνιο, σίδηρο και σπανιότερα σε νιτρικές ρίζες ή φθόριο. Επικρατούν γενικά οι τύποι νερών $Ca \pm Mg - HCO_3$, αλλά στους διερρηγμένους υδροφορείς παρουσιάζονται και οι τύποι νερών $Ca - Mg - Na - HCO_3 \pm SO_4 \pm Cl$.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ahmed, S., Ramaswamy, J. and Abdin, S., 2008. *Groundwater Dynamics in Hard Rock Aquifers*. Springer, 251 pp.

- Βεράνης, Ν., 2009. *Υδρογεωλογική Μελέτη περιοχής Μεταλλείων Μαύρων Πετρών και Μαδέμ Λάκκου, Ν. Χαλκιδικής*. Αδημ. μελ. ΙΓΜΕ, Θεσσαλονίκη, σελ. 193.
- Βεράνης, Ν., Καλούση, Ε., Λαζαρίδου, Μ., Πρατανόπουλος, Α. & Χατζηκύρκου, Α., 2010. *Υδρογεωλογική Μελέτη Υδροφόρων Συστημάτων Κεντρικής Μακεδονίας*. Έργο Γ ΚΠΣ (2003-2009) << Καταγραφή και Αποτίμηση των Υδρογεωλογικών Χαρακτήρων των Υπόγειων Νερών και των Υδροφόρων Συστημάτων της Χώρας>>. Αδημ. Μελέτη ΙΓΜΕ, Θεσσαλονίκη. 15 Τεύχη, Χάρτες.
- Δεμίρης, Κ. και Μελαδιώτης, Γ., 1994. *Έρευνα Υδάτων Λεκάνης Μυγδονίας*. Θεσσαλονίκη. Αδημ. Μελέτη. Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Εργαστήριο Γεωτεχνικής Μηχανικής, ΑΠΘ. Σελ. 70, χάρτες.
- Dewandel, B., Perrin, J., Ahmed, S., Aulong, S., Hrkal, Z., Lachassagne, P., Samad, M. and Massuel, S., 2010. *Development of a Tool for managing groundwater resources in semi-arid hard rock regions. Application to a rural watershed in south India*. Hydrological Processes 24, 19 (2010), pp. 2784–2797
- ΕΝΜ & Ειδικοί Σύμβουλοι, 2008. *Ανάπτυξη Συστημάτων και Εργαλείων Διαχείρισης Υδατικών Πόρων Υδατικών Διαμερισμάτων Δυτ. Μακεδονίας, Κεντ. Μακεδονίας, Αν. Μακεδονίας και Θράκης*. Σχέδια Διαχείρισης Υδατικών Πόρων των Υδατικών Διαμερισμάτων (ΣΑΕ061/3–20002 ΣΕ06130000). Μελέτη Υπουργείου Ανάπτυξης.
- Healy, R. and Scanlon, B., 2010. *Estimating Groundwater Recharge*. Cambridge Univ. Press, 256 pp.
- Krazny, J., 1993. *Classification of Transmissivity magnitude and variation*. Ground water, Vol. 31, pp. 230-236.
- Maréchal, C., Dewandel, B., Ahmed, S., Galeazzi, L., Zaidi, F. (2006). *Combined estimation of specific yield and natural recharge in a semi-arid groundwater basin with irrigated agriculture*. J. Hydrology, Vol. 329, pp. 281– 293.
- Lachassagne, P., Wyns, R., Dewandel, D., 2011. *The fracture permeability of Hard Rock Aquifers is due neither to tectonics, nor to unloading, but to weathering processes*. Terra Nova, 23, pp. 145–161.
- Mondal, S., 2011. *Remote Sensing and GIS Based Ground Water Potential Mapping of Kangshabati Irrigation Command Area, West Bengal*. Journal of Geography and Natural Disaster. Vol.1, Issue 1, pp.1-8.
- Moon, S., Woo, N., Lee, K., 2004. *Statistical analysis of hydrographs and water-table fluctuation to estimate groundwater recharge*. J. Hydrology, Vol. 292, pp. 198–209.
- Sander, P., 1977. *Water well siting in Hard-Rock Areas: Identifying Promising Targets using A Probabilistic Approach*. Hydrogeology Journal, Vol.3, no.3, pp. 32-43.
- Strahler, N., 1964. *Geology: Part II, Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks*, 4-39 to 4-70 in Handbook of Applied Hydrology (ed. V.T. Chow), McGraw-Hill, New York.
- Singhal, S. and Gupta, R., 1999. *Applied Hydrogeology of fractured rocks*. Kluwer Academic Publishers, 400 pp.
- Σούλιος, Γ., 2004. *Γενική Υδρογεωλογία*. STUDIO PRESS, Θεσσαλονίκη. 374 σελ.
- Van Tonder, G., Botha J., Chiang W., Kunstmann H. and Xu, Y. (2001). *Estimation of the sustainable yields of boreholes in fractured rock formations*. Journal of Hydrology, Vol. 241, pp. 70–90.
- Veranis, N., 2002. *An integrated groundwater treatment and management policy in regions affected by high Fluorine, Boron, Uranium, Radon and Arsenic, Northern Greece*. LIFE98 ENV/GR/00212: Final report. Thessaloniki Prefecture.

**ΕΠΗΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΑ ΠΟΣΟΤΙΚΑ ΚΑΙ ΠΟΙΟΤΙΚΑ
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΑΠΟ ΤΗ
ΜΑΚΡΟΧΡΟΝΙΑ ΜΗ ΟΡΘΟΛΟΓΙΚΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΟΥΣ.
ΤΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΤΟΥ ΘΕΣΣΑΛΙΚΟΥ ΚΑΜΠΟΥ**

Αντώνης Μανάκος

I.G.M.E., Φράγκων 1, 54626 Θεσσαλονίκη

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Κατά την χρονική περίοδο 2005-2008 το ΙΓΜΕ υλοποίησε υδρογεωλογική έρευνα με τίτλο "ΥΔΑΤΙΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ", η οποία χρηματοδοτήθηκε από το Γ' ΚΠΣ. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η πιεζομετρική και υδροχημική κατάσταση που επικρατεί στις πεδιάδες της Δυτικής και Ανατολικής Θεσσαλίας κατά τα έτη 2006 και 2007, γίνεται σύγκριση με την αντίστοιχη του έτους 1974 και επιχειρείται ο υπολογισμός των αποθεμάτων του υπόγειου νερού που αντλήθηκαν από τα γεωλογικά αποθέματα των προαναφερόμενων υδροφόρων συστημάτων χωρίς να αναπληρωθούν. Η μη ορθολογική διαχείριση των υδατικών πόρων από το 1974 έως σήμερα είχε ως αποτέλεσμα την συστηματική πτώση στάθμης που αποτυπώνεται τόσο στη σημερινή πιεζομετρική εικόνα της περιοχής όσο και στην ποιοτική υποβάθμιση των υπόγειων αποθεμάτων νερού.

**IMPACTS ON THE QUANTITY AND QUALITY
CHARACTERISTICS FROM IRRATIONAL LONG TERM WATER
RESOURCES MANAGEMENT.
A CASE STUDY OF THESSALY PLAIN**

Antonis Manakos

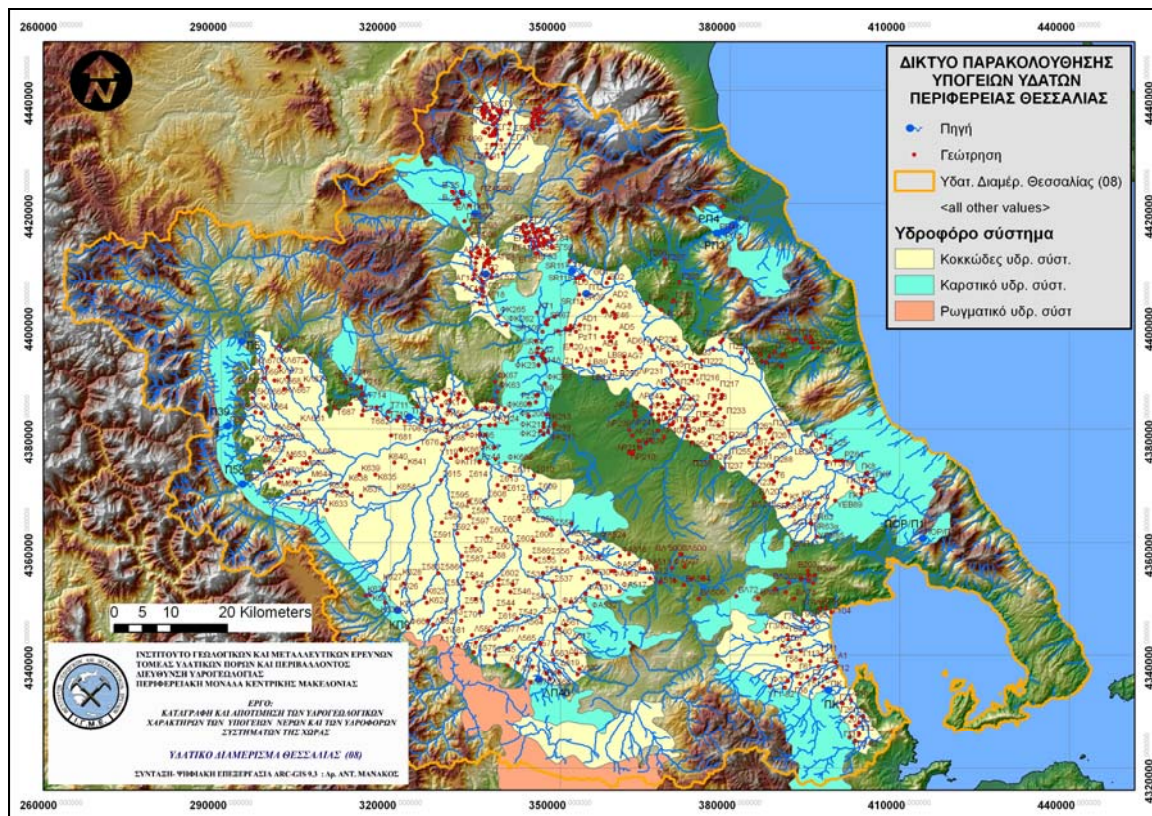
I.G.M.E., 1 Fragon str. 54626 Thessaloniki

ABSTRACT

During the period 2005-2008 IGME implemented hydrogeological research, titled "Water potential of Thessaly," which was funded by the third CSF. This paper presents the piezometric and hydrochemical situation in the plains of eastern and western Thessaly during the years 2006 and 2007 are compared with the corresponding year 1974 and aims to estimate the reserves of underground water drawn from the geological reserves of the above aquifer systems without being replenished. The non-rational management of water resources since 1974 to date has resulted in the systematic drawdown that is reflected both in the current piezometric picture of the area and quality degradation of underground water reserves.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο Υδατικό Διαμέρισμα της Θεσσαλίας το μεγαλύτερο ποσοστό των υδατικών πόρων αποδίδεται στην άρδευση. Οι ποσότητες νερού που αντλήθηκαν, από τις αρχές της δεκαετίας του 80 έως σήμερα, για την κάλυψη κυρίως των αρδευτικών αναγκών είχε ως αποτέλεσμα την πτώση της υπόγειας στάθμης σε όλους τους τύπους των υπόγειων υδροφοριών που αναπτύσσονται στη Θεσσαλία. Αυτό αποτυπώνεται με την στέρηση αβαθών φρεάτιων οριζόντων, με την συνεχή πτώση των βαθύτερων υδροφόρων στρωμάτων αλλά και με την υφαλμύριση των παράκτιων υδροφορέων. Οι υδροφορίες, σε μεγάλα τμήματα του προσχωματικού πεδίου της Δυτικής και Ανατολικής Θεσσαλικής πεδιάδας βρίσκονται υπό καθεστώς έντονης υπερεκμετάλλευσης όπως προκύπτει από την επεξεργασία μετρήσεων στάθμης των πιεζομέτρων (Μαρίνος κ.αλ., 1995 & 1997).



Σχήμα 1. Δίκτυο παρακολούθησης των ποσοτικών και ποιοτικών παραμέτρων των υπόγειων νερών στην Περιφέρεια Θεσσαλίας

Στη πεδιάδα της Δυτικής Θεσσαλίας αναπτύσσονται οι πλέον πλούσιες υδροφορίες του υδατικού διαμερίσματος. Αυτό οφείλεται στην τροφοδοσία των υπόγειων υδροφορέων από τη διήθηση επιφανειακού νερού των ποταμών που εκβάλλουν σ' αυτή, δια μέσου των κώνων των αδρομερών προσχώσεων που έχουν σχηματίσει.

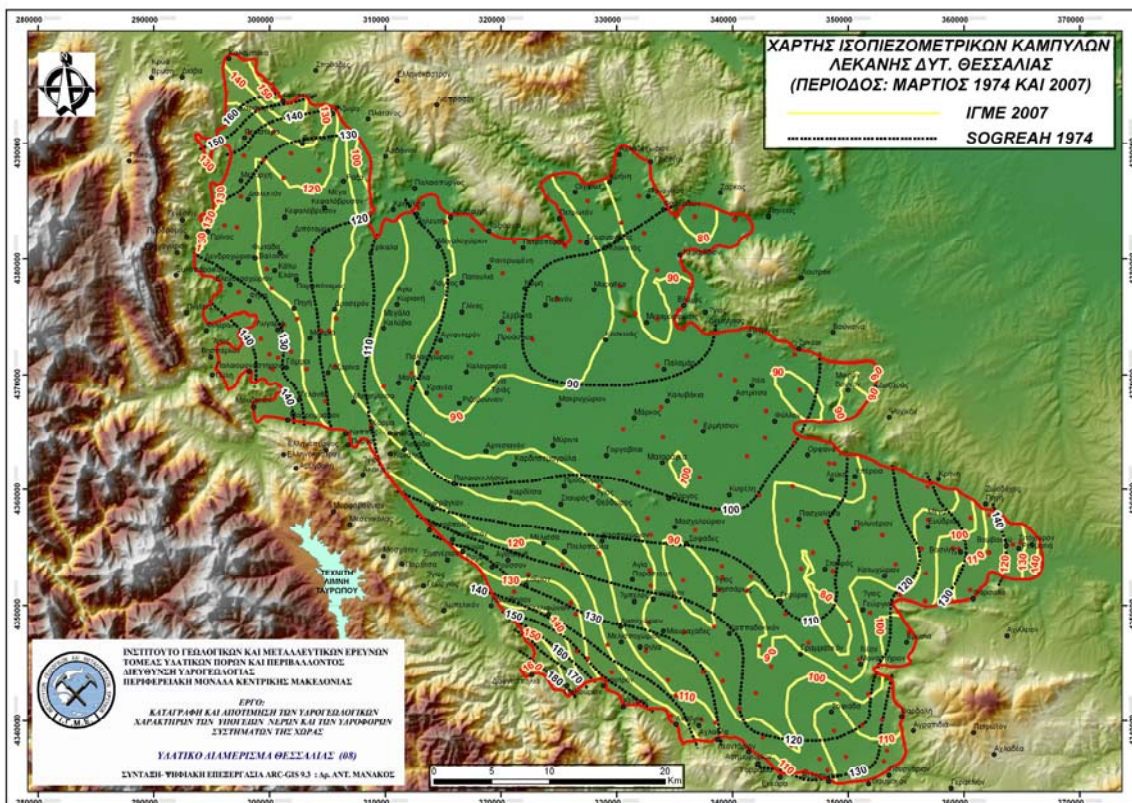
Στην πεδινή περιοχή της Ανατολικής Θεσσαλίας αξιόλογη υδροφορία αναπτύσσεται εκτός από την περιοχή του Τυρνάβου και στις περιοχές Αρμενίου-Στεφανοβικείου-Ριζόμυλου και Βελεστίνου, όπου και τοποθετείται μεγάλος αριθμός γεωτρήσεων. Στο Σχήμα 1 εμφανίζεται το δίκτυο παρακολούθησης των ποσοτικών και ποιοτικών παραμέτρων των υπόγειων νερών στα υδροφόρα συστήματα της Περιφέρειας Θεσσαλίας. Το δίκτυο αυτό, αποτελούμενο από 764 υδροσημεία, δημιουργήθηκε από το ΙΓΜΕ στα πλαίσια υλοποίησης του ερευνητικού προγράμματος "ΥΔΑΤΙΚΟ

ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ", το οποίο χρηματοδοτήθηκε από το Γ' ΚΠΣ (Μανάκος, 2010).

2. ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΠΙΕΖΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΜΟΡΦΗΣ

2.1 ΠΡΟΣΧΩΜΑΤΙΚΟΣ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑΣ ΔΥΤΙΚΗΣ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

Για την μελέτη της πιεζομετρίας της προσχωματικής λεκάνης της Δυτικής Θεσσαλίας επιλέχθηκαν 189 γεωτρήσεις και πιεζόμετρα και καταβλήθηκε προσπάθεια η κατανομή τους να είναι, στο μέτρο του δυνατού, ομοιόμορφη και να καλύπτουν όλη την έκταση του υδροφορέα. Στο Σχήμα 2 εμφανίζεται η γενική εικόνα της αθροιστικής πιεζομετρίας όλων των επιμέρους υδροφόρων στρωμάτων που επικρατεί στη προσχωματική λεκάνη της Δυτικής Θεσσαλίας κατά τον μήνα Μάρτιο των ετών 1974 (Sogreah, 1974) και 2007 (Μανάκος, 2010).



Σχήμα 2. Πιεζομετρικός χάρτης προσχωματικής λεκάνης Δυτικής Θεσσαλίας περιόδου Μαρτίου 1974 και 2007

Από την μελέτη των πιεζομετρικών χαρτών προκύπτουν οι εξής βασικές διαπιστώσεις. Οι υψηλότερες στάθμες και στις δύο περιόδους εμφανίζονται στην περιοχή της Καλαμπάκας που ανέρχονται σε +155μυθ έως 160μυθ, (για λόγους σύγκρισης οι αντίστοιχες στάθμες για το έτος 1974 ήταν +180 μυθ) ενώ η μεγαλύτερη ταπείνωση των πιεζομετρικών γραμμών παρατηρείται στον Τομέα Φαρκαδόνα (ζώνη Ζάρκου) και ανέρχεται σε +65-70 μυθ (για το έτος 1974 ήταν +80-85 μυθ). Γενικά η υδραυλική κλίση ακολουθεί την αντίστοιχη τοπογραφική με κυμαινόμενες διαφορές, οι οποίες οδηγούν σε φαινόμενα αναβλύσεως ύδατος ή υπεραντλήσεων. Η χρονική διακύμανση εξαρτάται από τις αντλήσεις και τις συνθήκες τροφοδοσίας. Η διήθηση πραγματοποιείται

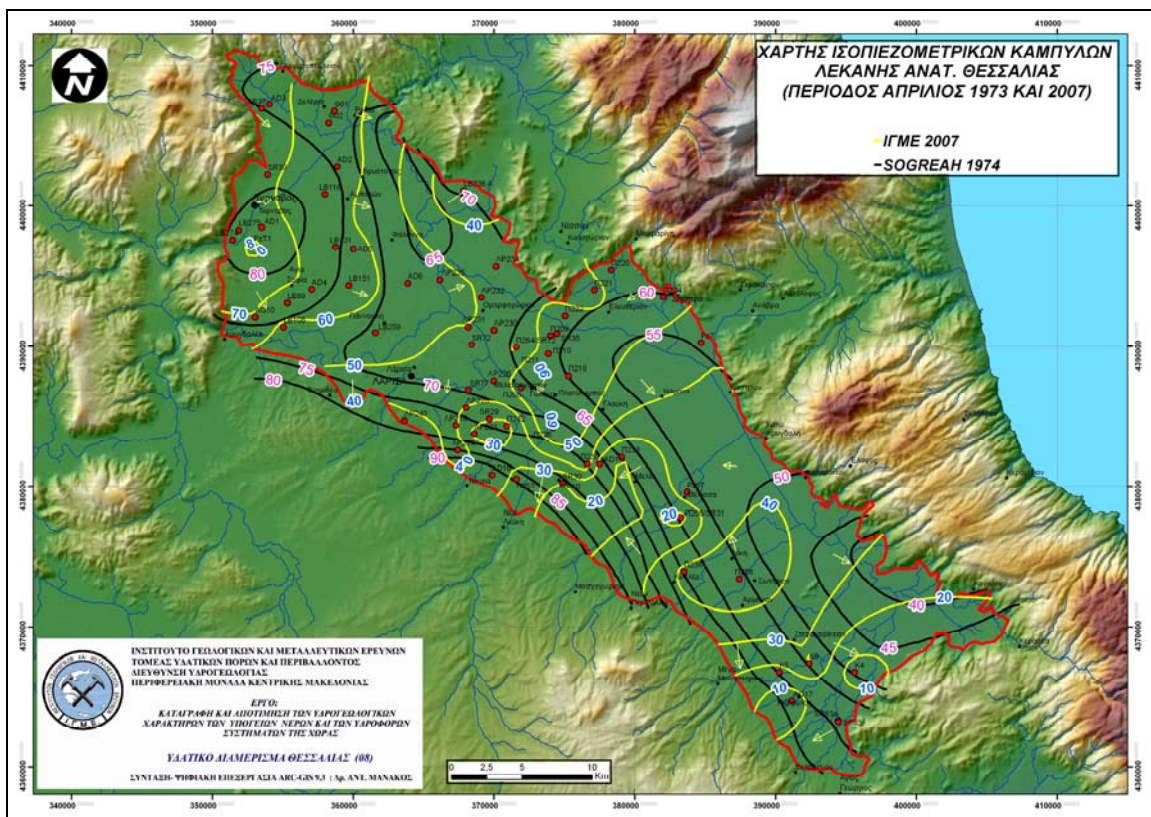
κυρίως στα βορειοδυτικά-δυτικά-νότια και νοτιοανατολικά περιφερειακά τμήματα του προσχωματικού υδροφορέα και πλησίον των μεγάλων ποταμών. Στη συνέχεια η υπόγεια ροή συνεχίζει προς τα κεντρικά τμήματα σε συνθήκες πίεσης και τμήμα της υπόγειας ροής διέρχεται, μέσω των στενών του Ζάρκου, στο Δ.Δ Φαρκαδώνα κατευθυνόμενη προς το καρστικό σύστημα Δαμασίου-Τίτανου (Σχήμα 2)

Με τα νεότερα δεδομένα στάθμης (2005-2008) παρέχονται ενδείξεις για μέση ταπείνωση της πιεζομετρίας σε σχέση με την περίοδο 1974 κατά την διάρκεια όλου του έτους, η οποία κυμαίνεται από 10 έως 20μ, ενώ σε κάποιες περιπτώσεις η πτώση στάθμης φτάνει έως στο επίπεδο των 30μ σε σχέση με την περίοδο 1974 (Μανάκος, 2010). Επίσης παρατηρείται πολύ αυξημένο εύρος διακύμανσης της στάθμης των γεωτρήσεων εντός του έτους.

Τέλος, το κύριο χαρακτηριστικό γνώρισμα της πιεζομετρικής εικόνας των υδάτων της λεκάνης, για το Μάρτιο του 2007, είναι η εμφάνιση τοπικών κώνων πτώσης στάθμης που κατανέμονται σχεδόν σε όλη την έκταση του υδροφορέα, αλλά επικεντρώνεται κυρίως στις περιοχές μακριά από τις δυτικές περιφερειακές ζώνες διήθησης και εμπλουτισμού των υδροφόρων στρωμάτων. Το στοιχείο αυτό είναι ένδειξη των συνθηκών υπεράντλησης που πραγματοποιείται στις περιοχές αυτές.

2.1 ΠΡΟΣΧΩΜΑΤΙΚΟΣ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑΣ ΑΝΑΤΟΛΙΚΗΣ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

Για την μελέτη της πιεζομετρίας της προσχωματικής λεκάνης της Ανατ. Θεσσαλίας για το έτος 2007 επιλέχθηκαν 92 γεωτρήσεις και πιεζόμετρα και καταβλήθηκε προσπάθεια η κατανομή τους να είναι, στο μέτρο του δυνατού, ομοιόμορφη και να καλύπτει όλη την έκταση του υδροφορέα.



Σχήμα 3. Πιεζομετρικός χάρτης προσχωματικής λεκάνης Ανατολικής Θεσσαλίας περιόδου Μαρτίου 1974 και 2007

Η πιεζομετρική εικόνα που περιγράφεται αναφέρεται στο μήνα Μάρτιο του έτους 2007 (Σχήμα 3). Γενικά το σχήμα των πιεζομετρικών καμπυλών έχει ακτινωτή ροή με κέντρο κυρίως τον ποταμό Τιταρήσιο, αναδεικνύοντας τον διαχρονικά σημαντικό του ρόλο στη διαίτα των υδροφόρων στρωμάτων της λεκάνης της Ανατ. Θεσσαλίας, και δευτερευόντως τα κράσπεδα του καρστικού υδροφορέα Δαμασίου-Τίτανου (Μανάκος, 2010). Αντίθετα ο Πηνειός φαίνεται να στραγγίζει τον υδροφόρο, αφού οι πιεζομετρικές καμπύλες ακολουθούν τη διαδρομή του ποταμού από την είσοδο του στη λεκάνη, δηλ. στην περιοχή Αμυγδαλιάς, έως την έξοδό του δηλ. στην περιοχή Ροδιάς (Μανάκος, 2010). Από τη σύγκριση της πιεζομετρικής εικόνας του έτους 2007 με την αντίστοιχη του 1974 διακρίνει κανείς ομοιότητες σε ότι αφορά την ακτινωτή ροή των ισοπιεζομετρικών καμπυλών μέχρι το ύψος του π. Πηνειού (περιοχή Ν, Α και ΒΑ της Λάρισας), με τη διαφορά ότι υπάρχει: α) μια αραίωση των ισοπιεζομετρικών καμπυλών του έτους 2007 σε σχέση με την αντίστοιχη του 1974 και β) μια σημαντική χωρική μετατόπιση των ισοπιεζομετρικών καμπυλών ίδιου πιεζομετρικού φορτίου. Για παράδειγμα, η διαδρομή που ακολουθεί η καμπύλη των 60 μέτρων για το έτος 1974, από τις περιοχές Α-ΝΑ του π. Πηνειού (Δήμητρα, Ελευθέριο, Γλαύκη, Αρμένιο, Στεφανοβίκειο) μετατοπίζεται προς περιοχές Δ της Λάρισας (Αμπελώνας, Φαλάνη, Βρυότοπος, Ροδιά) σε σχέση με την ισοπαραμετρική καμπύλη του έτους 2007. Αυτό οφείλεται στην πτώση στάθμης του προσχωματικού υδροφορέα, ως αποτέλεσμα των συνθηκών υπεράντλησης που έλαβε χώρα στις περιοχές αυτές δηλ. της μη ορθολογικής διαχείρισης των υπόγειων αποθεμάτων (Μανάκος, 2010). Από τη σύγκριση των πιεζομετρικών καμπυλών των ετών 1974 και 2007 στην περιοχή από τον Τίρναβο έως τον π. Πηνειό παρατηρείται πτώση στάθμης που δεν υπερβαίνει τα 10μ. Στο τμήμα της λεκάνης που οριοθετείται ανατολικά-νοτιοανατολικά του π. Πηνειού διαμορφώνεται μια εντελώς διαφορετική πιεζομετρική εικόνα από αυτή του 1974. Το κύριο χαρακτηριστικό της γνώρισμα είναι η εμφάνιση τοπικών κώνων πτώσης στάθμης που εντοπίζονται στις περιοχές της Νίκαιας-Χάλκης-Μελισσας-Μελίας και του Στεφανοβίκειου-Ριζόμυλου, με πτώσεις στάθμης που φτάνουν έως 50μ. και 30μ. αντίστοιχα (Μανάκος, 2010).

Στις περιοχές αυτές εντοπίζεται υδρογεωλογικό ενδιαφέρον, διότι εντός των αργιλικών αποθέσεων, συναντώνται υδροφόρα στρώματα που αποτελούνται από άμμους και χαλίκια. Για το λόγο αυτό αποτέλεσαν κατά το παρελθόν πεδία ευρείας ανάπτυξης υπόγειων υδάτων, μέσω πλήθους κρατικών και ιδιωτικών γεωτρήσεων. Μεταξύ των δύο προαναφερόμενων πεδίων, δηλ. στην περιοχή που ορίζεται από τους οικισμούς Κιλελέρ-Αρμένιο-Σωτήριο-Νίκη μεσολαβεί ανύψωση των ισοπιεζομετρικών καμπυλών και η ροή των υπόγειων νερών λαμβάνει χώρα προς τις εκατέρωθεν όμορες περιοχές. Στο κεντρικό τμήμα της λεκάνης (Πλατύκαμπος-Μελισσοχώρι-Ελευθέριο), η ανυπαρξία πλούσιων υπόγειων υδροφοριών οδηγεί στη μικρή εκμετάλλευσή τους με αποτέλεσμα οι πτώσεις στάθμης να είναι μικρές (10μ περίπου) και οι ισοπιεζομετρικές καμπύλες να παρουσιάζουν μικρές διαφορές από τις αντίστοιχες του 1974.

Στο νότιο και νοτιοανατολικό τμήμα της λεκάνης, η γενική εικόνα ροής των υπόγειων υδάτων είναι η ακόλουθη. Από την περιοχή ανατολικά του π. Πηνειού τα υπόγεια νερά κατευθύνονται προς ΝΑ διεύθυνση και στο ύψος του Στεφανοβίκειου και Ριζόμυλου κατευθύνονται προς τα νοτιο-νοτιοδυτικά δηλ. προς την περιοχή της βιομηχανικής ζώνης του Βόλου (περιοχή Βελεστίνου-Αγίου Γεωργίου) (Μανάκος, 2010). Στην περιοχή αυτή παρατηρείται αλλαγή της κατεύθυνσης των υπόγειων υδροφοριών σε σχέση με το 1974, όπου η ροή κατευθύνεται προς στην περιοχή της Κάρλας (δηλ.προς ΝΑ) και στραγγίζει στον καρστικό υδροφορέα του Μαυροβουνίου. Στις περιοχές αυτές, διαχρονικά παρατηρείται συστηματική ταπείνωση της στάθμης, και τα αποθέματα νερού βρίσκονται σε καθεστώς υπερεκμετάλλευσης.

3. ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΑΠΟΘΕΜΑΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΤΙΣ ΠΡΟΣΧΩΜΑΤΙΚΕΣ ΛΕΚΑΝΕΣ ΤΗΣ ΔΥΤ. ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ ΚΑΙ ΑΝΑΤ. ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΔΟ ΜΑΡΤΙΟΥ 1974 ΚΑΙ 2007

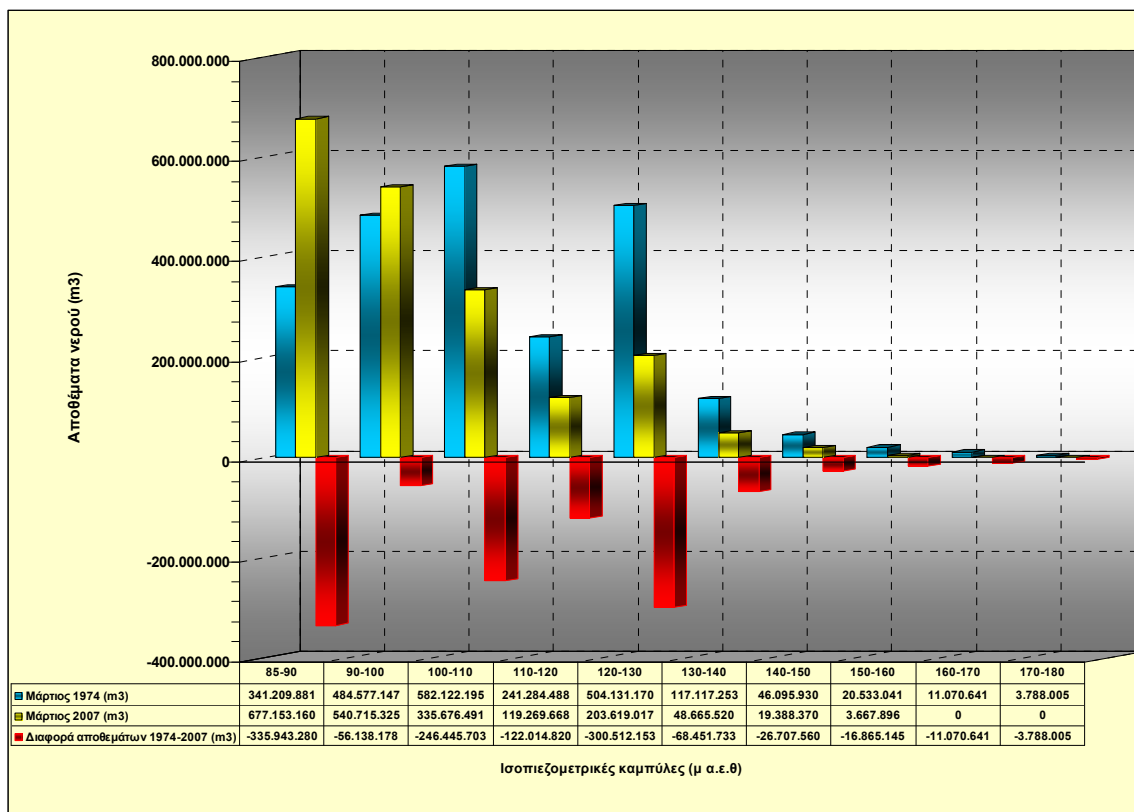
Όπως προαναφέρθηκε, από το 1974 έως το 2007 το μεγαλύτερο τμήμα των υδροφορέων της Θεσσαλίας, εκτός από λίγες περιοχές, βρίσκεται σαφώς κάτω από καθεστώς υπερεκμετάλλευσης, αφού υπάρχει συστηματική ταπείνωση της υπόγειας στάθμης από χρόνο σε χρόνο. Εκείνο που διαφέρει τοπικά είναι η ένταση της υπερεκμετάλλευσης και ο χρόνος κατά τον οποίο οι αντλούμενες ποσότητες άρχισαν να υπερτερούν τον φυσικό εμπλουτισμό των υδροφόρων στρωμάτων με αποτέλεσμα την απότομη πτώση στάθμης των υπόγειων υδροφοριών χωρίς περαιτέρω επαναπλήρωση.

Στην παράγραφο αυτή επιχειρείται η εκτίμηση του συνόλου των ποσοτήτων νερού που αφαιρέθηκε αλλά δεν αναπληρώθηκε, πέραν των ανανεωμένων αποθεμάτων, από τις πεδιάδες της Δυτ. και Ανατ. Θεσσαλίας, προκαλώντας την πτώση στάθμης κατά το χρονικό διάστημα 1974-2007. Οι ποσότητες αυτές δεν είναι βέβαια γραμμικώς κατανομημένες στη διάρκεια των 35 ετών αλλά υπάρχουν τοπικές διαφοροποιήσεις ως προς την ένταση και το χρόνο της υπερεκμετάλλευσης. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν οι πιεζομετρικοί χάρτες της προηγούμενης παραγράφου, οι οποίοι περιγράφουν την πιεζομετρική εικόνα των λεκανών για το μήνα Μάρτιο για τα έτη 1974 (Sogreah, 1974) και 2007 (Μανάκος, 2010), γίνεται εκτίμηση των αποθεμάτων νερού που φιλοξενούνται στις κλάσεις των ισοπιεζομετρικών καμπυλών με ισοδιάσταση 10μ. και από τη σύγκριση των αποθεμάτων μεταξύ 1974 και 2007 προκύπτουν οι ποσότητες νερού που αφαιρέθηκαν και δεν αναπληρώθηκαν κατά την διάρκεια των 35 ετών.

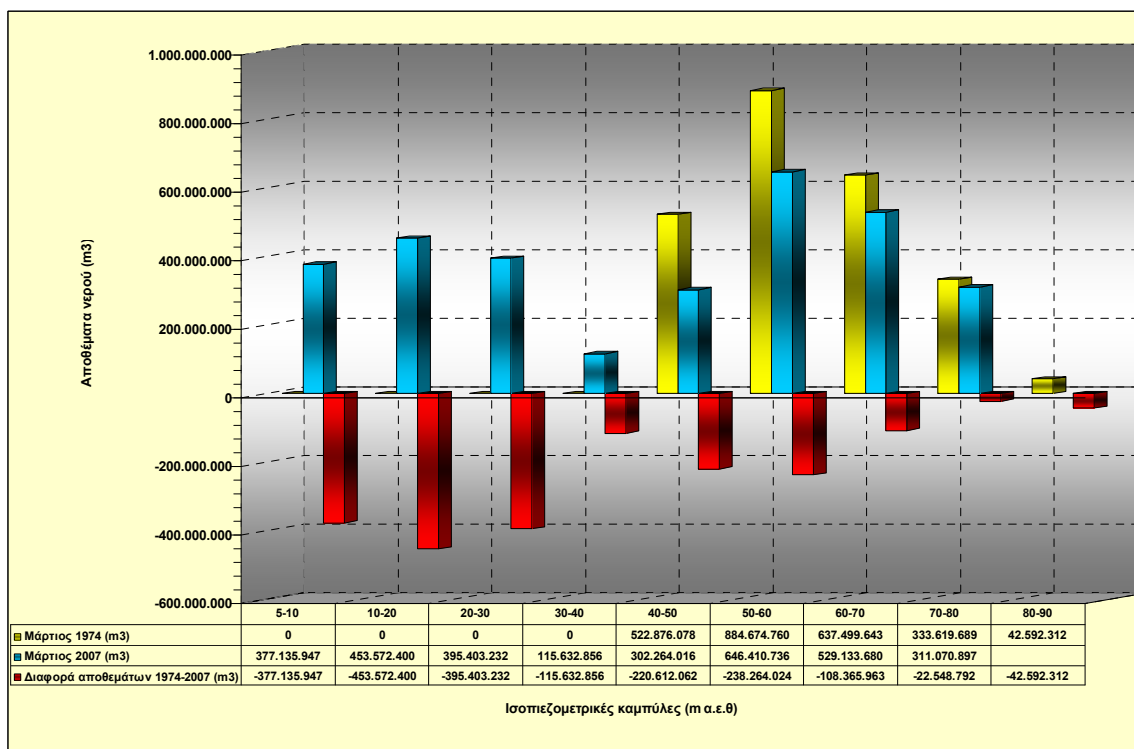
Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι η εξής. Με τη βοήθεια του υπολογιστικού πακέτου (Surfer v.8), που χρησιμοποιήθηκε για την σύνταξη των πιεζομετρικών χαρτών, υπολογίστηκε, σε κλάσεις με ισοδιάσταση 10μ., ο όγκος (V) του υδροφόρου ανάμεσα στην ανώτερη και κατώτερη στάθμη του υδροφόρου. Οι ποσότητες νερού, που φιλοξενούνται στον υδροφόρο ορίζοντα κατά τον μήνα Μάρτιο των ετών 1974 και 2007 προκύπτουν από το γινόμενο του όγκου (V) του υδροφόρου με τις τιμές του ενεργού πορώδους (S_V) ή του συντελεστή εναποθήκευσης (S) του υδροφόρου ορίζοντα. Διευκρινίζεται ότι στον παραπάνω υπολογισμό λήφθηκε υπόψη και η χωρική κατανομή των προαναφερόμενων υδραυλικών παραμέτρων, η οποία προέκυψε από σημαντικό αριθμό αντλητικών δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν σε γεωτρήσεις, οι οποίες σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν με την επίβλεψη της SOGREAH κατά την διάρκεια υλοποίησης του έργου "Μελέτη Ανάπτυξης Υπογείων Υδάτων Θεσσαλίας Υπ. Γεωργίας" (Sogreah, 1974).

Η μεταβολή των αποθεμάτων, ως διαφορά μεταξύ των ποσοτήτων νερού που υπολογίστηκαν για το έτος 1974 και το 2007, ανταποκρίνεται στο σύνολο των ποσοτήτων νερού που αφαιρέθηκε από τις πεδιάδες της Δυτ. και Ανατ. Θεσσαλίας αλλά δεν αναπληρώθηκε. Οι ποσότητες αυτές για την προσχωματική λεκάνη της Δυτ. Θεσσαλίας ανέρχονται σε **1.187.937.218 m³** ενώ για την προσχωματική λεκάνη της Ανατ. Θεσσαλίας ανέρχονται σε **1.974.127.587 m³**.

Στα Σχήματα 4 και 5 παρουσιάζονται τα αποθέματα νερού που φιλοξενούνται, για τα έτη 1974 και 2007, στις προσχωματικές λεκάνες της Δυτ. και Ανατ. Θεσσαλίας, τα οποία υπολογίστηκαν από τους αντίστοιχους πιεζομετρικούς χάρτες, σε κλάσεις με ισοδιάσταση 10μ των ισοπιεζομετρικών καμπυλών καθώς και οι μεταξύ τους διαφορές. Οι τελευταίες αποδίδουν τις ποσότητες νερού που αντλήθηκαν από τα γεωλογικά αποθέματα των λεκανών και δεν αναπληρώθηκαν κατά την διάρκεια των 35 ετών.



Σχήμα 4. Αποθέματα και διαφορά αποθεμάτων υπόγειου νερού στη προσχωματική λεκάνη της Δυτ. Θεσσαλίας κατά την περίοδο Μαρτίου 1974 και 2007



Σχήμα 5. Αποθέματα και διαφορά αποθεμάτων υπόγειου νερού στη προσχωματική λεκάνη της Ανατ. Θεσσαλίας κατά την περίοδο Μαρτίου 1974 και 2007

4. ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ

Όπως προαναφέρθηκε, με την έναρξη του ερευνητικού προγράμματος του ΙΓΜΕ στο δίκτυο των 764 σημείων μόνιμης παρακολούθησης των ποιοτικών παραμέτρων των υπόγειων νερών στα υδροφόρα συστήματα της Περιφέρειας Θεσσαλίας, με μηνιαίο βήμα 2 έως 4 μηνών μετρήθηκαν επιτόπου η ηλεκτρική αγωγιμότητα, η οξύτητα (pH) και η θερμοκρασία αέρος και νερού ενώ παράλληλα έγινε συλλογή δειγμάτων για εργαστηριακούς προσδιορισμούς (βασική χημική ανάλυση και Ιχνοστοιχεία) που πραγματοποιήθηκαν στα πιστοποιημένα με ISO Χημεία του ΙΓΜΕ στην Περιφερειακή Μονάδα Ανατ. Μακεδονίας–Θράκης και στην Αθήνα Για την μελέτη της ποιότητας των υπόγειων νερών στις λεκάνες της Δυτ. και Ανατ. Θεσσαλίας συλλέχθηκαν συνολικά 941 δείγματα νερού (Μανάκος, 2010).

Η ποιότητα των εργαστηριακών αναλύσεων ελέγχθηκε με βάση τον υπολογισμό του σφάλματος ιοντικής ισορροπίας (Lloyd et al., 1985; Appelo et al., 1993), από τον οποίο προέκυψε ότι το 98% των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν ήταν αξιόπιστες.

Η υπεράντληση των υπόγειων υδάτων και η μεγάλη ταπείνωση της στάθμης εκτός από τις επιπτώσεις που σχετίζονται με την εκδήλωση καθιζήσεων στην επιφάνεια του εδάφους, τη δημιουργία προβλημάτων στην επάρκεια σε υπόγειο νερό ορισμένων περιοχών που προορίζονται ή μπορούν να αποτελέσουν ζώνες υδροληψίας οικισμών έχει αρνητικές επιπτώσεις και στην ποιότητα των υπόγειων υδάτων.

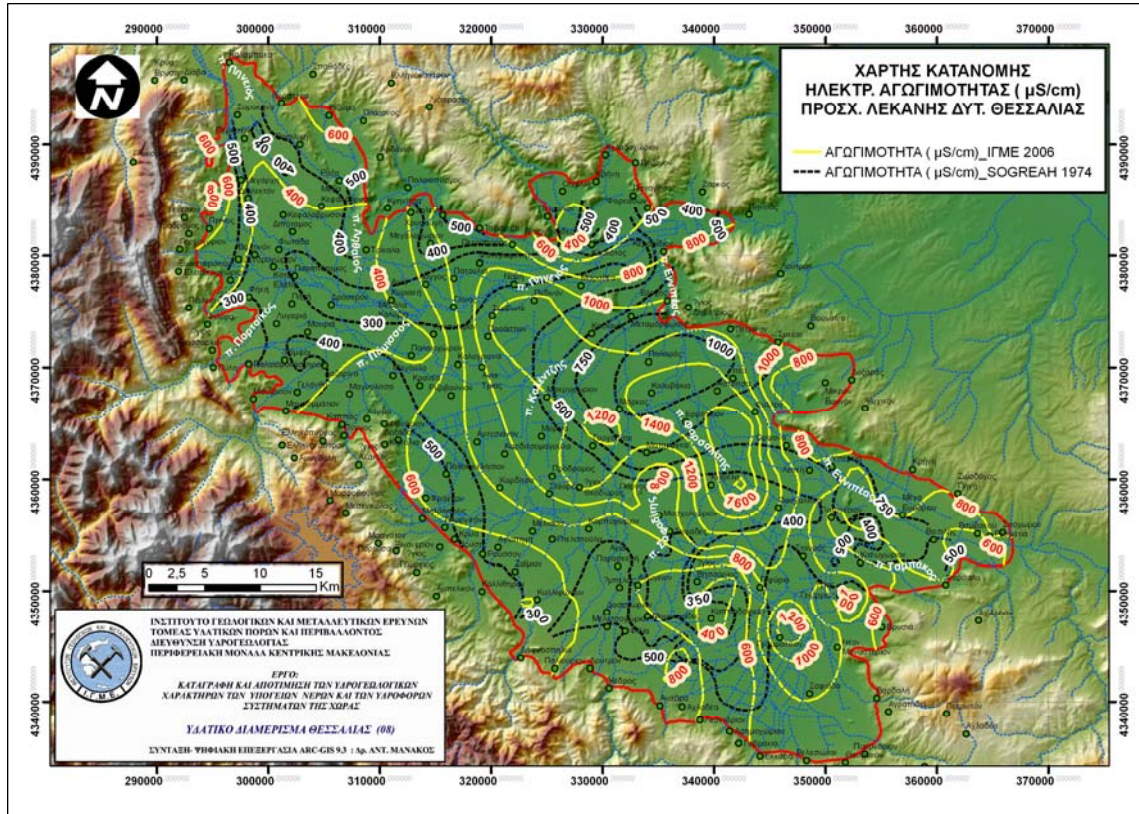
Η ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι η μοναδική υδροχημική παράμετρος για την οποία μπορούν να εξαχθούν συγκριτικά συμπεράσματα αναφορικά με τις ποιοτικές επιπτώσεις ως αποτέλεσμα της στρεβλή διαχείριση των υδατικών πόρων από το 1972-1974 ως το 2007.

4.1 ΠΡΟΣΧΩΜΑΤΙΚΟΣ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑΣ ΔΥΤΙΚΗΣ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

Στον χάρτη του Σχήματος 6 παρουσιάζεται η κατανομή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας των υπόγειων υδάτων στην λεκάνη της Δυτ. Θεσσαλίας, για την περίοδο των ετών 1972-1974 (Sogreah, 1974). Από τη μελέτη αυτού του χάρτη προκύπτει ότι οι τιμές της κυμαίνονται από 300 μ S/cm έως 1.000 μ S/cm.

Οι μικρότερες τιμές 300-400 μ S/cm απαντώνται στο δυτικό, κεντρικό και νοτιοανατολικό τμήμα της λεκάνης με τάση αύξησης προς τα περιθώρια όπου η ηλεκτρική αγωγιμότητα λαμβάνει τιμές μεταξύ 400 έως 750 μ S/cm ενώ οι μέγιστες τιμές (1.000 μ S/cm) εντοπίζονται σε ακτίνα 4 χλμ περιμετρικά του Παλαμά. Στον ίδιο χάρτη του Σχήματος 6 παρουσιάζεται η κατανομή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας των υπόγειων υδάτων για το έτος 2006 (Μανάκος, 2010).

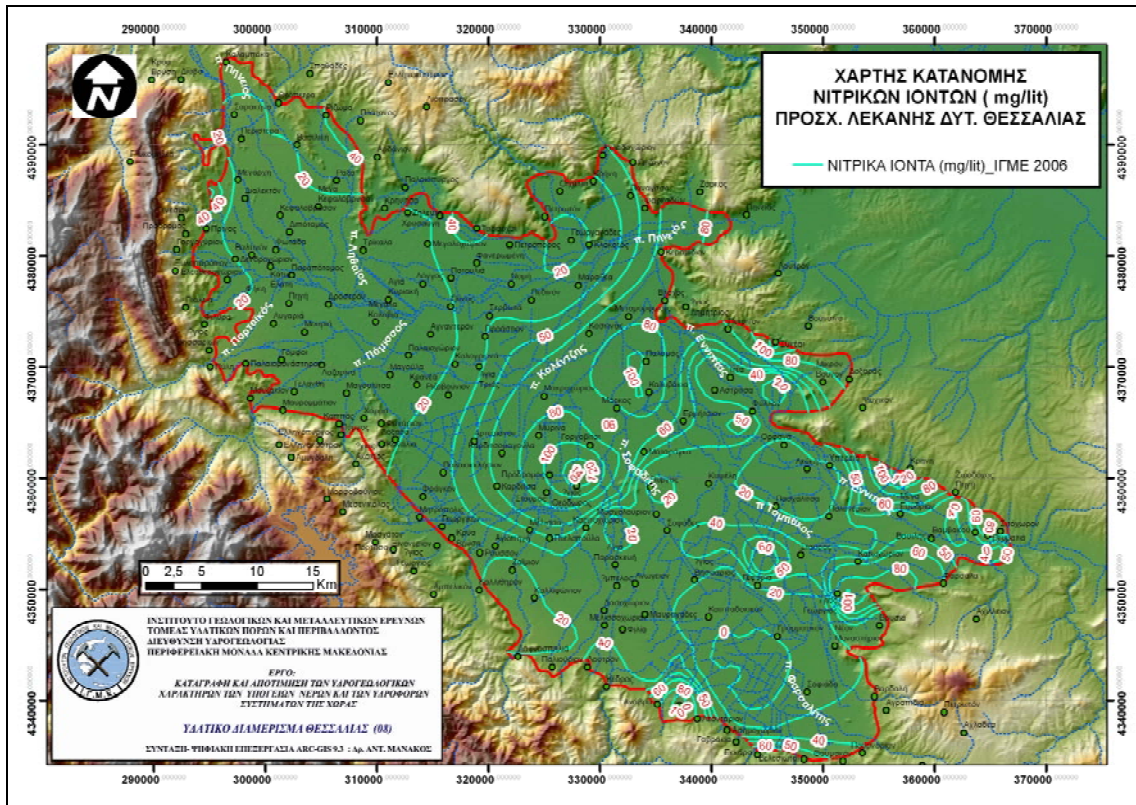
Το εύρος τιμών της αγωγιμότητας κυμαίνεται μεταξύ 400 και 1.800 μ S/cm. Οι μικρότερες τιμές 400-600 μ S/cm απαντώνται στο δυτικό, βόρειο και νοτιοδυτικό τμήμα της λεκάνης ενώ οι μέγιστες (1.000-1800 μ S/cm) εντοπίζονται στο ανατολικό και νοτιοανατολικό τμήμα όπου παρατηρείται σημαντική χωρική αύξηση και μετατόπιση των ισοπαραμετρικών καμπυλών της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, σε σχέση με την περίοδο 1972-1974, προς νοτιοανατολική κατεύθυνση. Στις περιοχές αυτές διαχρονικά παρουσιάζεται μια συνεχής αλλά όχι έντονη πτώση της πιεζομετρικής επιφάνειας. Οι υδρογεωλογικές συνθήκες που επικρατούν αντιστοιχούν σε πεδία που παρουσιάζουν αξιόλογο υδατικό δυναμικό με εύκολη σχετικά επανατροφοδοσία αλλά χαρακτηρίζονται από μεγάλη αύξηση των αντλήσεων, γεγονός που δημιουργεί τις συνθήκες υπερεκμετάλλευσης.



Σχήμα 6. Κατανομή ηλεκτρ. Αγωγιμότητας ($\mu\text{S}/\text{cm}$) στην προσχωματική λεκάνη της Δυτικής Θεσσαλίας κατά τα έτη 1974 και 2006

Το σημαντικότερο ωστόσο πρόβλημα ποιοτικής υποβάθμισης των υπόγειων υδατικών πόρων της λεκάνης Δυτ. Θεσσαλίας σχετίζεται με την αυξημένη συγκέντρωση των νιτρικών ιόντων, που συχνά αποτελεί δείκτη ρύπανσης ανθρωπογενούς προέλευσης οφειλόμενη στη αλόγιστη χρήση γεωργικών λιπασμάτων. Από το χάρτη του Σχήματος 7 προκύπτει ότι οι τιμές των νιτρικών κυμαίνονται από 0 έως $140\text{mg}/\text{lit}$. Οι μικρότερες τιμές $20\text{-}40\text{mg}/\text{lit}$ απαντώνται στο βορειοδυτικό, ανατολικό και νοτιοανατολικό τμήμα της λεκάνης με τάση αύξησης προς τα περιθώρια, όπου τα νιτρικά τοπικά λαμβάνουν τιμές που υπερβαίνουν το ανώτατο επιτρεπτό όριο των $50\text{mg}/\text{lit}$. Οι υψηλότερες όμως τιμές των νιτρικών ιόντων, με αισθητή υπέρβαση του ανώτατου επιτρεπτού ορίου των $50\text{mg}/\text{lit}$, απαντώνται στο κεντρικό και στο βορειοανατολικό τμήμα του υδροφορέα. Συγκεκριμένα σε μια επιμήκη ζώνη που αρχίζει σχεδόν από τα νοτιοδυτικά όρια του υδροφορέα (Κ.Δ Πτελοπούλας και Μέλισσας) και καταλήγει στα βορειοανατολικά όρια (Κ.Δ Μικρού Βουνού, Πέτρινου και Φαρκαδόνα) εμφανίζονται τιμές των νιτρικών που κυμαίνονται μεταξύ $50\text{-}140\text{mg}/\text{lit}$, με τη μέγιστη τιμή ($140\text{mg}/\text{lit}$) να εντοπίζεται στους οικισμούς των Αγίων Θεοδώρων και Προδρόμου.

Διευκρινίζεται ότι επαναληπτικές δειγματοληψίες απέδειξαν, ότι το φαινόμενο της νιτρορύπανσης, στις προαναφερόμενες περιοχές, είναι **μόνιμο** με αυξομειώσεις μόνο στις ανώτερες τιμές του ρύπου εξαρτώμενες από τις εποχές που πραγματοποιείται η δειγματοληψία νερού (Μανάκος, 2010). Για τους παραπάνω λόγους, επειδή το φαινόμενο αυτό είναι δυναμικό είναι απαραίτητη η διαρκής παρακολούθησής του.



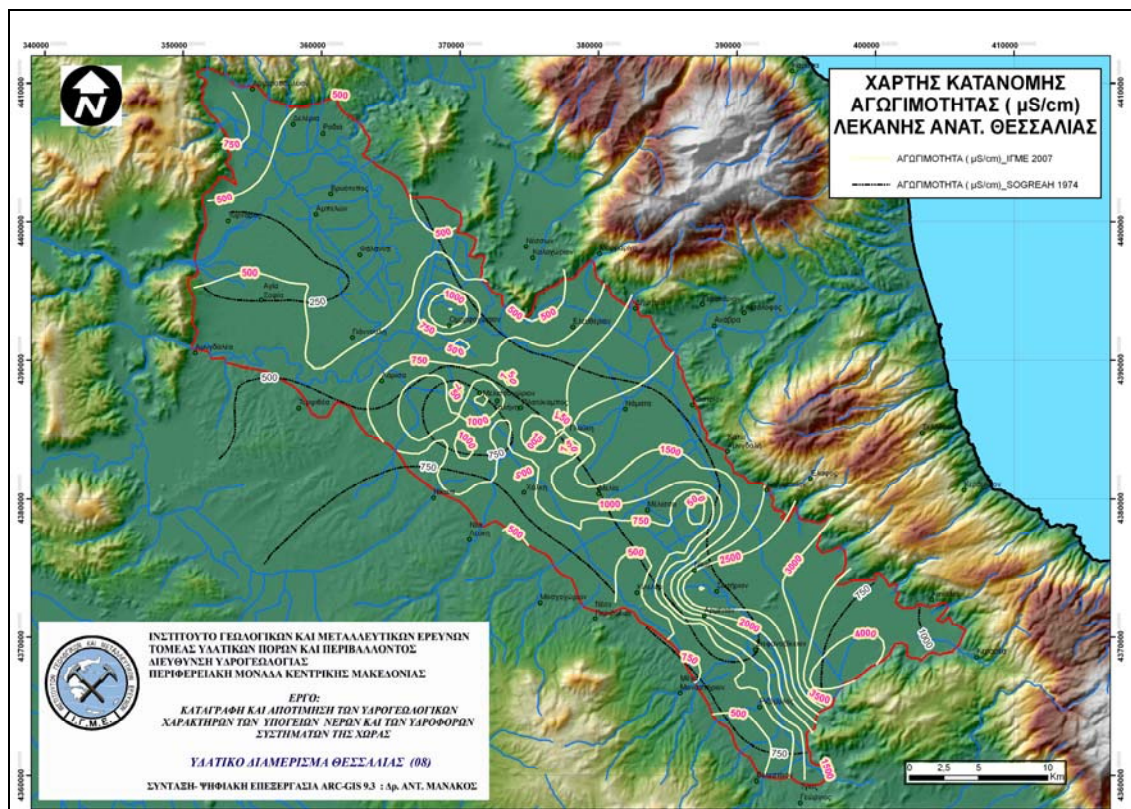
Σχήμα 7. Κατανομή νιτρικών (mg/lit) στην προσχωματική λεκάνη Δυτ. Θεσσαλίας κατά το έτος 2006

4.2 ΠΡΟΣΧΩΜΑΤΙΚΟΣ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑΣ ΑΝΑΤΟΛΙΚΗΣ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

Οι τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας κατά τα έτη 1972-74, όπως προκύπτει από την εικόνα του Σχήματος 8, παρουσιάζουν αύξηση από τα βορειοδυτικά προς τα νοτιοανατολικά και ακολουθεί την ίδια ακριβώς διεύθυνση όπως η ροή του υπόγειου νερού (Sogreah, 1974). Οι χαμηλότερες τιμές (250 $\mu\text{S}/\text{cm}$) εμφανίζονται νότια του Τυρνάβου δηλ. στην περιοχή κύριου εμπλουτισμού των αδρομερών προσχώσεων από τα επιφανειακά νερά του ποταμού Τιταρήσιου, ενώ οι υψηλότερες (1.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) εντοπίζονται στα νοτιοανατολικά περιθώρια της λεκάνης δηλ. στην περιοχή του οικισμού Κανάλια, νότια της νεοσυσταθείσας λίμνης της Κάρλας.

Μια εντελώς διαφορετική εικόνα παρουσιάζει η κατανομή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας κατά το έτος 2007 (Μανάκος, 2010). Στην ευρύτερη περιοχή του Τυρνάβου η ηλεκτρική αγωγιμότητα εμφανίζει τιμές 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ δηλ. διπλάσιες από τις αντίστοιχες της περιόδου 1974. Στο κεντρικό τμήμα της λεκάνης δηλ. στις περιοχές Πλατύκαμπου-Μελισσοχωρίου παρουσιάζει τιμές που φτάνει τα 1.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ενώ στο νοτιοδυτικό της τμήμα δηλ. στις περιοχές Νίκης-Σωτηρίου η αγωγιμότητα εμφανίζει τις μέγιστες τιμές που αναλύθηκαν (4.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Τέλος από το κεντρικό τμήμα της πεδιάδας και προς τα νοτιοανατολικά όριά της οι τιμές της αγωγιμότητας από 1.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ αυξάνονται και λαμβάνουν τιμές που φτάνουν τα 4.000, βορειοανατολικά του Ριζόμυλου. Στις περιοχές αυτές από το 1974 έως το 2007 παρατηρείται μια ισχυρή συστηματική κάμψη της πιεζομετρικής επιφάνειας, όπου η επέκταση των αντλήσεων συνδυάζεται με τη δυσκολία επαναπλήρωσης των αφαιρούμενων ποσοτήτων υπόγειου νερού εξαιτίας της σημαντικής απόστασης από τις ζώνες τροφοδοσίας (Μανάκος, 2010).

Από τη σύγκριση των πιεζομετρικών χαρτών με των αντίστοιχων της κατανομής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας προκύπτει το συμπέρασμα, ότι οι υψηλές τιμές της αγωγιμότητας εντοπίζονται στις περιοχές με τις χαμηλότερες τιμές της πιεζομετρικής επιφάνειας, γεγονός που καταδεικνύει την ποιοτική υποβάθμιση των υπόγειων νερών ως αποτέλεσμα της υπεράντλησης δηλ. της άναρχης και μη ορθολογικής διαχείρισης των υδροαποθεμάτων στις λεκάνες του Θεσσαλικού κάμπου.



Σχήμα 8. Κατανομή ηλεκτρ. Αγωγιμότητας ($\mu\text{S}/\text{cm}$) στην προσχωματική λεκάνη της Ανατ. Θεσσαλίας κατά τα έτη 1972-74 και 2007

Κατά το έτος 2007, στο βορειοδυτικό και νοτιοανατολικό τμήμα της λεκάνης, οι ρυπάνσεις από νιτρικά ιόντα (NO_3), με μόνη εξαίρεση μια σημειακή επιβάρυνση ανατολικά της Αγ. Σοφίας, δεν υπερβαίνουν το όριο των $50 \text{ mg}/\text{l}$, ενώ στο κεντρικό τμήμα, περιοχές Πλατύκαμπου, Μελισσοχωρίου, Νίκης, Σωτηρίου είναι πολύ συχνές και υπερβαίνουν το όριο των $50 \text{ mg}/\text{l}$, λαμβάνοντας τιμές έως $144,92 \text{ mg}/\text{lit}$.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η μη ορθολογική διαχείριση των υδατικών πόρων στις πεδιάδες της Δυτικής και Ανατολικής Θεσσαλίας από το 1974 έως σήμερα είχε ως αποτέλεσμα την συστηματική πτώση στάθμης που αποτυπώνεται τόσο στη σημερινή πιεζομετρική εικόνα της περιοχής όσο και στην ποιοτική υποβάθμιση των υπόγειων αποθεμάτων νερού.

Το κύριο χαρακτηριστικό γνώρισμα της πιεζομετρικής κατάστασης των υδάτων και στις δύο λεκάνες για το έτος 2007 είναι η εμφάνιση τοπικών κώνων πτώσης στάθμης που κατανέμονται σχεδόν σε όλη την έκταση του υδροφορέα, αλλά επικεντρώνεται κυρίως στις περιοχές μακριά από τις περιφερειακές ζώνες διήθησης και εμπλουτισμού των υδροφόρων στρωμάτων. Το στοιχείο αυτό, το οποίο ταυτόχρονα αποτελεί και τη

βασική διαφορά σε σχέση με το 1974, είναι ένδειξη των συνθηκών υπεράντλησης που πραγματοποιείται στις περιοχές αυτές.

Η μεταβολή των αποθεμάτων, ως διαφορά μεταξύ των ποσοτήτων νερού που υπολογίστηκαν για το έτος 2007 και το 1974, ανταποκρίνεται στο σύνολο των ποσοτήτων νερού που αντλήθηκε από τις πεδιάδες της Δυτ. και Ανατ. Θεσσαλίας αλλά δεν αναπληρώθηκε. Οι ποσότητες αυτές, οι οποίες ευθύνονται για την μεγάλη πτώση στάθμης που καταγράφηκε σε μεγάλα τμήματα και των δύο λεκανών, για μεν την προσχωματική λεκάνη της Δυτ. Θεσσαλίας ανέρχονται σε **1.187.937.218 m³** ενώ για την προσχωματική λεκάνη της Ανατ. Θεσσαλίας ανέρχονται σε **1.974.127.587 m³**.

Η υπεράντληση των υπόγειων υδάτων και η μεγάλη ταπείνωση της στάθμης έχει αρνητικές επιπτώσεις στην ποιότητα των υπόγειων υδάτων με την σημαντική αύξηση της συγκέντρωσης ορισμένων υδροχημικών παραμέτρων των υπόγειων υδάτων.

Οι τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας των υπόγειων υδάτων στην λεκάνη της Δυτ. Θεσσαλίας, για το έτος 1974 κυμαίνονται από 300μS/cm έως 1.000μS/cm., ενώ το εύρος τιμών για το έτος 2006 κυμαίνεται μεταξύ 400 και 1.800 μS/cm., σημειώνοντας μια αύξηση τόσο στην κατώτερη όσο και στην ανώτερη τιμή της. Το σημαντικότερο ωστόσο πρόβλημα ποιοτικής υποβάθμισης των υπόγειων υδατικών πόρων της λεκάνης Δυτ. Θεσσαλίας σχετίζεται με την αυξημένη συγκέντρωση των νιτρικών ιόντων. Για την λεκάνη της Δυτ. Θεσσαλίας το εύρος τιμών των νιτρικών κυμαίνεται μεταξύ 0 και 140mg/lit με τις μέγιστες τιμές να εμφανίζονται στο κεντρικό τμήμα της λεκάνης.

Οι τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας των υπόγειων υδάτων στην λεκάνη της Ανατ. Θεσσαλίας, για το έτος 1974 κυμαίνονται από 250μS/cm έως 1.000μS/cm., ενώ το εύρος τιμών για το έτος 2007 κυμαίνεται μεταξύ 500 και 4.500 μS/cm., σημειώνοντας μια σημαντική αύξηση τόσο στην κατώτερη όσο και στην ανώτερη τιμή της.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Appelo, C., and Postma, D., 1993. Geochemistry, groundwater and pollution, A. A. Balkema, Rotterdam.
- Lloyd, J., and Heathcote, J., 1985. Natural inorganic chemistry in relation to groundwater. Clarendon Press, Oxford.
- Μανάκος, Α., 2010. Υδρογεωλογική μελέτη. Υδατικό Δυναμικό Θεσσαλίας (08). Γ' ΚΠΣ., Θεσσαλονίκη. ΙΓΜΕ, σελ.547.
- Μαρίνος, Π., Θάνος, Μ., Περγλέρος, Β., και Καββαδάς, Μ., 1995. Υδατικό δυναμικό Θεσσαλικής πεδιάδας επιπτώσεις από την υπερεκμετάλλευσή του. 3^ο Υδρογεωλογικό συνέδριο, Ηράκλειο Κρήτης, σελ. 468-480.
- Μαρίνος, Π., Περγλέρος, Β., και Καββαδάς, Μ., 1997. Προσχωματικές και καρστικές υδροφορίες του θεσσαλικού κάμπου. Νεότερα στοιχεία για το καθεστώς της υπερεκμετάλλευσής τους. 4^ο Υδρογεωλογικό Συνέδριο, Θεσσαλονίκη. σελ. 243-258.
- Sogreah, 1974. Μελέτη αναπτύξεως υπογείων υδάτων πεδιάδος Θεσσαλίας Υπ. Γεωργίας.

**ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ-ΥΔΡΟΧΗΜΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΤΟΥΣ
ΟΡΕΙΝΟΥΣ ΟΓΚΟΥΣ ΟΛΥΜΠΟΥ-ΟΣΣΑΣ**
Αντώνης Μανάκος, Νίκος Βεράνης

I.G.M.E., Φράγκων 1, 54626 Θεσσαλονίκη

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται οι υδρογεωλογικές και υδροχημικές συνθήκες που επικρατούν στα δύο μεγάλα καρστικά συστήματα των ορεινών όγκων Ολύμπου-Όσσας. Πρόκειται για το καρστικό σύστημα Λιτοχώρου, το οποίο είναι ένα μεικτό σύστημα που αποτελείται από το καρστ του Ολύμπου και τον κοκκώδη υδροφορέα, που εντοπίζεται στην περιμετρική ζώνη στα βόρεια και ανατολικά περιθώριά του και τροφοδοτείται από το κάρστ. Η εκφόρτισή του γίνεται με πολλές πηγές που σχετίζονται με ρηξιγενείς δομές ή είναι πηγές επαφής και εντοπίζονται σε διάφορα υψόμετρα. Το καρστικό σύστημα Κάτω Ολύμπου-Όσσας αναπτύσσεται στο βορειοανατολικό τμήμα της Θεσσαλίας και καταλαμβάνει μεγάλο μέρος του Κάτω Ολύμπου και της βόρειας και κεντρικής Όσσας. Στην ανθρακική ενότητα αναπτύσσονται πλούσιες υπόγειες υδροφορίες, οι οποίες εκφορτίζονται κύρια από πηγές που αναβλύζουν στην κοιλάδα των Τεμπών.

**HYDROGEOLOGICAL- HYDROCHEMICAL CONDITIONS OF
OLYMPUS-OSSA MOUNTAIN**
Antonis Manakos, Nikos Veranis

1 Fragon, I.G.M.E., 54626 Thessaloniki

ABSTRACT

The hydrogeological and hydrochemical conditions in the major karst systems of mountains Olympus-Ossa are presented in this paper. The Lithoro karst system, which is a mixed system consisting of the Mount Olympus karst and the alluvial aquifer which located in the north and east margins of the peripheral zone and is recharged by associated karst. The discharge of the karst system is effected through several active springs at various altitudes. Many springs are related to fault structures and others are characterized as contact springs. The Kato Olympus-Ossa karst system is located in the northeastern part of Thessaly and occupies much of Kato Olympus and northern and central Ossa area. It discharged through main karst springs which are disseminated in the whole area of the Tempe valley.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στους ορεινούς όγκους Ολύμπου και Όσσας αναπτύσσονται δύο αξιόλογα, σε ότι αφορά την υδροδυναμικότητά τους, υδροφόρα συστήματα (Σχήμα 1). Πρόκειται για το καρστικό σύστημα Λιτοχώρου (914), το οποίο αναπτύσσεται στο νότιο τμήμα του Υδατικού Διαμερίσματος 09 (Υ.Δ 09) και ανήκει κατά κύριο λόγο στο νομό Πιερίας και ένα μικρό τμήμα στο νομό Λάρισας και το καρστικό σύστημα Κάτω Ολύμπου-Όσσας (812), το οποίο εντοπίζεται στο βόρειο τμήμα του Υ.Δ 08 και ανήκει στο νομό Λάρισας. Η κοιλάδα του ρέματος Ζηλιάνα, η οποία αποτελεί το μεταξύ τους φυσιογραφικό όριο, χωρίζει τον ορεινό όγκο στον Άνω και Κάτω Όλυμπο. Κατά την χρονική περίοδο 2005-2008 το ΙΓΜΕ πραγματοποίησε υδρογεωλογική έρευνα και στα δυο καρστικά συστήματα, η οποία χρηματοδοτήθηκε από το Γ' ΚΠΣ (Βεράνης, 2010, Μανάκος, 2010). Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται οι υδρογεωλογικές και υδροχημικές συνθήκες που επικρατούν στα δύο μεγάλα καρστικά συστήματα των ορεινών όγκων Ολύμπου-Όσσας.

2. ΟΡΕΙΝΟΣ ΟΓΚΟΣ ΟΛΥΜΠΟΥ

2.1 ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΚΑΙ ΤΕΚΤΟΝΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

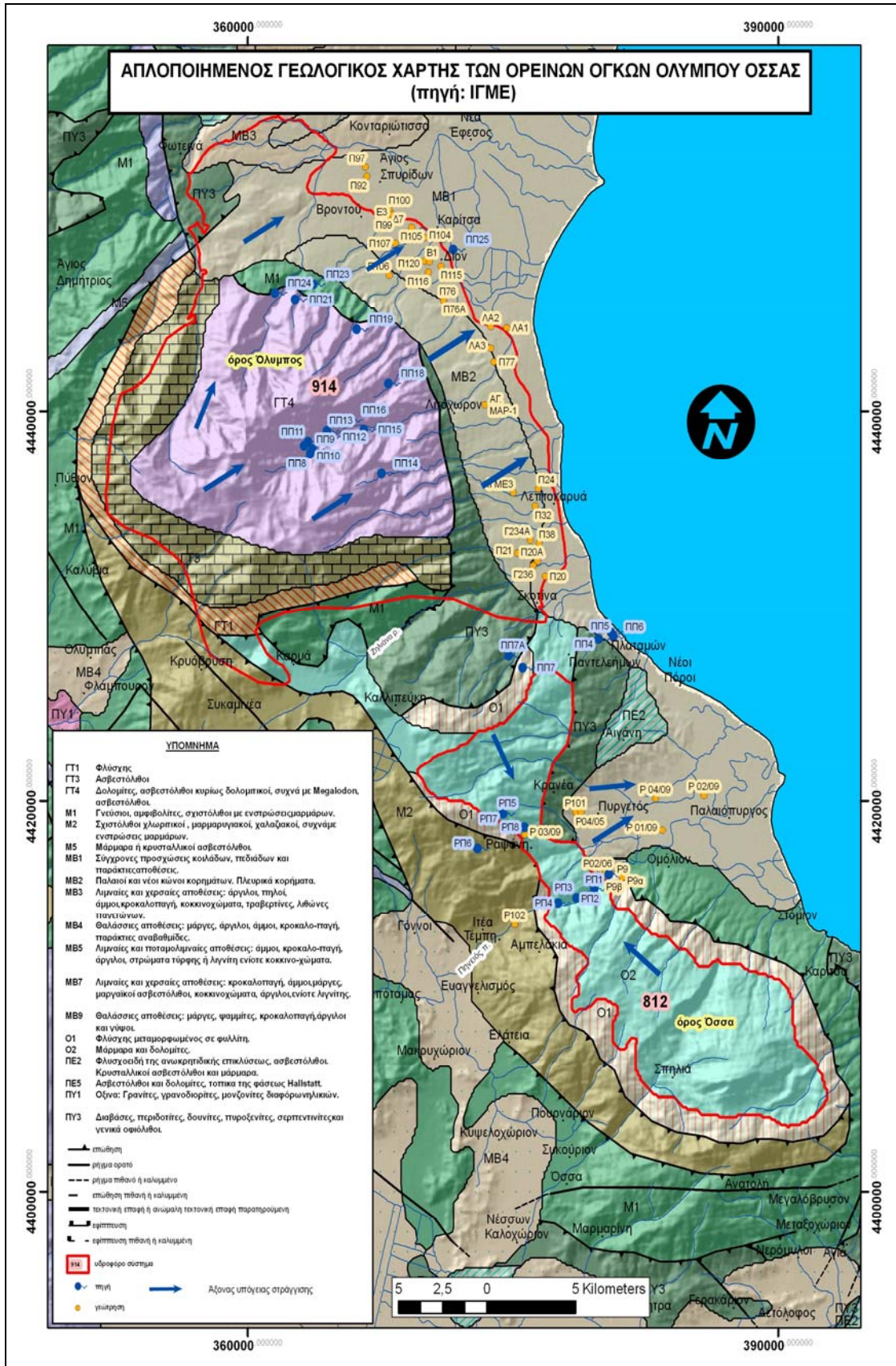
Το καρστικό σύστημα Λιτοχώρου (914) είναι ένα μεικτό σύστημα που αποτελείται από το καρστ του Ολύμπου και τον κοκκώδη υδροφορέα, που αναπτύσσεται στην περιμετρική ζώνη στα βόρεια και ανατολικά περιθώριά του αλλά τροφοδοτείται από το κάρστ (Σχήμα 1). Γεωτεκτονικά το σύστημα ανήκει στην ενότητα του Ολύμπου και δομείται από μία αυτόχθονη (Godfriaux, 1968), συνεχούς ιζηματογένεσης, ανθρακική σειρά (ΓΤ3, ΓΤ4) του Μεσοζωικού (Τριαδικό-Ανώτ. Ηώκαινο), η οποία στα ανώτερα της τμήματα συνίσταται από σχηματισμούς του φλύσχη (ΓΤ1). Η ενότητα αυτή στα δυτικά, νότια και ανατολικά, περιβάλλεται από μεταμορφωμένα κρυσταλλοσχιστώδη πετρώματα και μάρμαρα (M1, M2) του Παλαιοζωικού, που ανήκουν στην Πελαγονική ζώνη. Το σύστημα επεκτείνεται προς τα βόρεια και ανατολικά στα πλευρικά κορήματα που περιβάλλουν τον Όλυμπο (MB2) και στις αλλουβιακές αποθέσεις που παρεμβάλλονται υπό μορφή επιμήκους ζώνης μεταξύ των κροκαλοπαγών και της ακτής (MB1).

2.2. ΚΑΡΣΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΛΙΤΟΧΩΡΟΥ (914)

2.2.1 Υδρογεωλογικές συνθήκες

Όπως προαναφέρθηκε το καρστικό σύστημα Λιτοχώρου, με έκτασή 498 km², αποτελείται από το καρστ του Ολύμπου και τον κοκκώδη υδροφορέα, που αναπτύσσεται στην περιμετρική ζώνη στα βόρεια και ανατολικά περιθώριά του.

Στους τεκτονισμένους και κατά θέσεις καρστοποιημένους ασβεστόλιθους και δολομίτες του Ολύμπου αναπτύσσεται ο μεγάλης υδροδυναμικότητας καρστικός υδροφορέας, του οποίου η έκταση ανέρχεται σε 309 km² και ο εμπλουτισμός του πραγματοποιείται από τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα. Στο κάρστ του Ολύμπου τα συστήματα κατακλάσεων έχουν διαμορφώσει ένα ομοιογενώς κατά θέσεις κατακερματισμένο πέτρωμα από ασβεστόλιθους και μάρμαρα έντονα τεκτονισμένα και κατά θέσεις καρστοποιημένα. Ο κερματισμός των πετρωμάτων είναι εντονότερος κατά μήκος των επιπευτικών ρηγμάτων και παρατηρούνται παράλληλες ζώνες διαφορετικής περατότητας που σχετίζονται με το βαθμό διάρρηξης. Από την καρστικού τύπου διάβρωση στην επιφάνεια σχηματίζονται δολίνες και πόλγες.



Σχήμα 1. Απλοποιημένος γεωλογικός χάρτης των ορεινών όγκων Ολύμπου και Όσσα

Τα καρστικά σπήλαια και οι καρστικοί αγωγοί που σχηματίζονται στα ανθρακικά πετρώματα του Ολύμπου συμβάλλουν στην υπόγεια κίνηση του νερού προς τα ριπίδια της περιμετρικής ζώνης. Η εκφόρτιση του συστήματος πραγματοποιείται μέσω πηγών, που εμφανίζονται σε διάφορα επίπεδα και σε μερικές περιπτώσεις σχετίζονται με ρήγματα (Βεράνης, 2010). Το στοιχείο αυτό επιβεβαιώθηκε από τις υδρομετρήσεις στις πηγές και στην τάφρο του Δίου (ΠΠ25), όταν μετά από έντονες βροχοπτώσεις και λιώσιμο χιονιών παρατηρήθηκε απότομη αύξηση στην παροχή τους, που σημαίνει ότι υφίσταται ικανοποιητικό δίκτυο καρστικών αγωγών μέσω των οποίων διακινούνται τα υπόγεια νερά.

Παρατηρούνται μικροπηγές, διαλείπουσας μορφής, σε διάφορες θέσεις με παροχές από 15 έως 3,5 m³/h, αλλά και σημαντικές πηγές με παροχές που κυμαίνονται μεταξύ 30 και 150 m³/h. Οι σημαντικότερες καρστικές πηγές, οι οποίες στην πλειοψηφία τους εμφανίζουν σημειακή ανάβλυση και συνεχή ροή, εντοπίζονται στα επίπεδα: (α) 1000-1150 m, (β) 600-750 m και (γ) 350-450 m (Πίνακας 1). Εκδήλωση της τροφοδοσίας των χαλαρών σχηματισμών από το καρστ του Ολύμπου είναι οι αναβλύσεις (ΠΠ25) που παρατηρούνται στο μέτωπο Καρίτσα–Δίον σε μήκος 5 km και υδρομαστεύονται στην τάφρο. Η μέση ετήσια παροχή τους ανέρχεται σε 55*10⁶ m³/χρόνο, με σημαντικές όμως διακυμάνσεις που εξαρτώνται από τα εποχιακά κατακρημνίσματα.

Πίνακας 1. Κυριότερες καρστικές πηγές του υδροφόρου συστήματος Λιτοχώρου (914)

α/α	Τοποθεσία	Παροχή (m ³ /h)	Τύπος πηγής	Γεωλογικό περιβάλλον	Χρήση
ΠΠ24	Πολυδένδρι	40-60	Επαφής	Ασβεστόλιθοι καρστοποιημένοι	Υδρευση
ΠΠ21	Αγ. Κόρη	100-400	Επαφής	Οφειόλιθοι επωθημένοι σε ασβεστόλιθους	Υδρευση
ΠΠ23	Αγ. Τριάς	1500-4000	Επαφής	Οφειόλιθοι επωθημένοι σε ασβεστόλιθους	Υδρευση-Άρδευση
ΠΠ19	Ορλιά	40-140	Επαφής	Ασβεστόλιθοι καρστοποιημένοι, κορήματα	Υδρευση-Άρδευση
ΠΠ25	Τάφρος Δίου	2000-5500	Υπερχείλισης	Ιζήματα (κροκάλες, άμμοι, άργιλοι)	Άρδευση
ΠΠ18	Μάνα	250-65	Επαφής	Ασβεστόλιθοι καρστοποιημένοι, κορήματα	Υδρευση
ΠΠ16	Κοκκώνη	150-15	Επαφής	Ασβεστόλιθοι καρστοποιημένοι	Υδρευση
ΠΠ15	Γιάννακα	10-70	Επαφής	Ασβεστόλιθοι καρστοποιημένοι	
ΠΠ14	Τσιμπίλι	10-70	Επαφής	Ασβεστόλιθοι καρστοποιημένοι, κορήματα	Υδρευση
ΠΠ13	Ιερό σπήλαιο	50-120	Επαφής	Ασβεστόλιθοι καρστοποιημένοι, κορήματα	Υδρευση
ΠΠ12	Πυξάρι	25-130	Επαφής	Ασβεστόλιθοι καρστοποιημένοι, κορήματα	Υδρευση
ΠΠ11	Πριόνια	30-250	Επαφής	Ασβεστόλιθοι καρστοποιημένοι, κορήματα	Υδρευση
ΠΠ10	Πριόνια	20-200	Επαφής	Ασβεστόλιθοι καρστοποιημένοι	
ΠΠ9	Παλιοπρίονα	25-250	Επαφής	Ασβεστόλιθοι καρστοποιημένοι	
ΠΠ8	Παλιοπρίονα	20-150	Επαφής	Ασβεστόλιθοι καρστοποιημένοι	

Στα κροκαλοπαγή (MB2) της περιμετρικής ζώνης αναπτύσσεται ένας κοκκώδης υδροφόρος ορίζοντας σημαντικής υδροδυναμικότητας. Οι σχηματισμοί αυτοί καλύπτουν συνολικά έκταση 155 km² και έχουν πάχος που ξεπερνά τα 600m. Εντοπίζονται κύρια στην περιοχή βόρεια και ανατολικά του Ολύμπου, στα χαμηλά τοπογραφικά σημεία, όπου έχουμε ήπια κλίση των πρανών (1-6%). Πρόκειται κυρίως για χαλαρά και δευτερευόντως για συμπαγή αδρομερή υλικά (ογκόλιθοι, κροκάλες, λατύπες, άμμοι με μικρού πάχους αργιλικές ενστρώσεις ενδιάμεσως). Τα κροκαλοπαγή αυτά κατατάσσονται στους πολύ καλούς έως καλούς υδροφορείς ανάλογα με την κοκκομετρία του υλικού, το βαθμό συγκόλλησης, το είδος της συγκολλητικής ύλης καθώς και το βαθμό διαγένεσης. Ο εμπλουτισμός τους πραγματοποιείται κυρίως από την πλευρική διήθηση νερών του καρστ, από την κατείσδυση στους χαλαρούς σχηματισμούς που εκτιμάται σε ποσοστό 20% και από τη διήθηση της απορροής των υδρορεμάτων που προέρχονται από το καρστ του Ολύμπου (Βεράνης, 2010).

Από τα δεδομένα των δοκιμών άντλησης που πραγματοποιήθηκαν σε υδρογεωτρήσεις στα κροκαλοπαγή της περιμετρικής ζώνης από το ΙΓΜΕ και την ΥΕΒ προκύπτει ότι η ειδική ικανότητα κυμαίνεται από 1,8 έως 800 m³/h/m. Οι μεγαλύτερες τιμές της ειδικής ικανότητας εντοπίζονται στην περιοχή Αγ.Σπυρίδων- Βροντού – Καρίτσα –Δίον –Πλατανάκια. Ιδιαίτερα μεγάλες τιμές παρατηρούνται στις περιπτώσεις που ο υδροφορέας τροφοδοτείται από διήθηση που προέρχεται από τις πηγές ή τα επιφανειακά νερά του Ολύμπου. Ο συντελεστής υδατοαγωγιμότητας (T) κυμαίνεται από 119 έως 43890 m²/day και ο συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας (K) κυμαίνεται από 3,4 έως 2833 m/day. Από τις δοκιμές άντλησης παρατηρείται μεγάλη ανομοιομορφία στις τιμές των υδραυλικών παραμέτρων που αποδίδεται σε τοπικές διαφορές της κοκκομετρικής σύστασης του υδροφορέα και στην τροφοδοσία του συστήματος από τα νερά των υδρορεμάτων της ορεινής περιοχής. Οι πολύ υψηλές τιμές των υδραυλικών παραμέτρων (T, K) σε ορισμένες γεωτρήσεις χαρακτηρίζουν τους καρστικούς υδροφορείς (Goldscheider and Drew, 2007). Από υπαίθριες παρατηρήσεις και από στοιχεία υδρογεωτρήσεων διαπιστώθηκαν έγκοιλα, σπήλαια, καρστικοί αγωγοί στα συμπαγή ριπιδιοπαδή. Γενικά η υδροφορία στα χαλαρά ιζήματα του συστήματος Λιτοχώρου είναι πολύ υψηλής έως καλής δυναμικότητας. Μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα σημαντικού πάχους και έκτασης υδροφόρα στρώματα στην περιοχή Βροντού-Καρίτσα-Δίον, όπου οι παροχές των γεωτρήσεων εκτιμήθηκαν σε 400-100 m³/h. Στην περιοχή Λιτοχώρου οι παροχές των γεωτρήσεων είναι 50-300 m³/h και στην περιοχή Λεπτοκαρυάς είναι 25-150 m³/h αντίστοιχα.

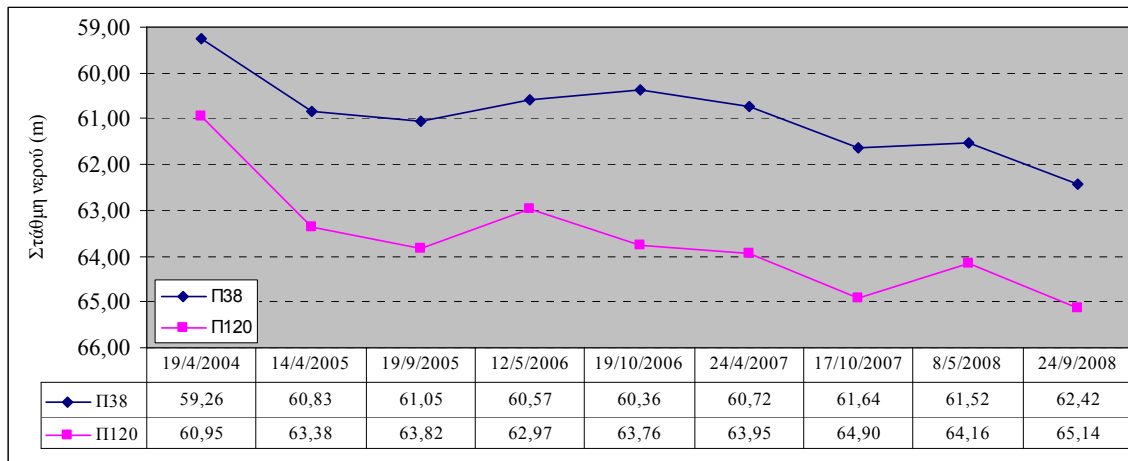
Τέλος στις αλλουβιακές αποθέσεις (MB1) της παράκτιας ζώνης, που συνίστανται από άμμους, χαλίκια, κροκάλες με αργιλικές στρώσεις ενδιάμεσως και καταλαμβάνουν έκταση 20 km², αναπτύσσεται επίσης αξιόλογη υπόγεια υδροφορία. Η περατότητά τους και κατ' επέκταση η υδρολιθολογική τους συμπεριφορά καθώς και η υδροδυναμικότητά τους διαφοροποιείται χωρικά λόγω της μεταβολής της κοκκομετρίας των υδροφόρων στρωμάτων και της απόστασης από υδρορέματα με εποχιακή απορροή.

Η παρακολούθηση της υπόγειας στάθμης στο κάρστ του Ολύμπου δεν είναι εφικτή, διότι δεν έχουν ανορυχτεί υδρογεωτρήσεις στους ανθρακικούς σχηματισμούς. Για το λόγο αυτό μόνο επαγωγικά μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα, μέσω των σταθμημετρήσεων σε γεωτρήσεις στα κροκαλοπαγή, τα οποία όπως προαναφέραμε τροφοδοτούνται από το κάρστ του Ολύμπου.

Για τη παρακολούθηση της διακύμανσης της στάθμης στην περιμετρική ζώνη των κροκαλοπαγών, πραγματοποιήθηκαν σταθμημετρήσεις με συχνότητα μετρήσεων δύο φορές το χρόνο στο χρονικό διάστημα 2004-2008.

Παρατηρούνται μόνιμες και εποχικές μεταβολές της στάθμης. Στις περιπτώσεις που οι αντλούμενες ποσότητες υπόγειων νερών υπερβαίνουν τα ρυθμιστικά αποθέματα τότε παρατηρείται ταπείνωση της στάθμης. Στο Σχήμα 2 εμφανίζεται η διακύμανση της υπόγειας στάθμης στις περιοχές της Λεπτοκαρυάς (γεώτρηση Π38) και του Δίου (γεώτρηση Π120) για το χρονικό διάστημα των ετών 2004-2008. Και στις δύο περιοχές είναι εμφανής η πτώση στάθμης ως αποτέλεσμα του αρνητικού υδρολογικού ισοζυγίου εξαιτίας των υπεραντλήσεων (Βεράνης, 2010).

Στο ίδιο συμπέρασμα καταλήγει κανείς και από τη διαχρονική (1998-2008) παρακολούθηση της στάθμης στις γεωτρήσεις του συστήματος. Συγκεκριμένα σε ετήσια βάση η πτώση αυτή είναι κατά μέσο όρο 0,28 m/χρόνο και κυμαίνεται από 0,04 έως 0,48 m/χρόνο, ανάλογα με την πίεση που δέχεται η περιοχή από τις αντλήσεις. Στις γεωτρήσεις, στις οποίες δε γίνεται άντληση (Π38, Π77), η πτώση στάθμης είναι ελάχιστη 4-9 cm/χρόνο, ενώ αντίθετα στις περιοχές που γίνεται έντονη άντληση, για αρδευτικούς και υδρευτικούς σκοπούς, η πτώση στάθμης φθάνει τα 48 cm/χρόνο.



Σχήμα 2. Διακύμανση της στάθμης νερού στις γεωτρήσεις Π38 (περιοχή Λεπτοκαρυάς) και Π120 (περιοχή Δίου)

Λαμβάνοντας υπόψη ότι η έκταση του υδροφορέα των κροκαλοπαγών είναι 155 km², το μέσο ενεργό πορώδες (n) είναι 17% και η πτώση στάθμης (Ds) είναι 0,28 m, εκτιμάται ότι οι απώλειες από τα μόνιμα αποθέματα του συστήματος Λιτοχώρου στην περιμετρική ζώνη με τα κροκαλοπαγή είναι κατά μέσο όρο 7,38*10⁶ m³/χρόνο (Βεράνης, 2010).

Για την κατάστρωση του υδρολογικού ισοζυγίου χρησιμοποιήθηκαν οι ψηφιακοί χάρτες βροχόπτωσης, εξατμισοδιαπνοής, επιφανειακής απορροής και κατείδυσης που κατασκευάστηκαν με τη χρήση του GIS. Οι ποσότητες νερού που κατείδυουν και απορρέουν ετησίως σ όλο το σύστημα Λιτοχώρου υπολογίστηκαν με τη μέθοδο των Thornthwaite-Mather και ανέρχονται σε 183,5*10⁶ m³ (43,4%). Τα μέσα ετήσια κατακρημνίσματα στα ανθρακικά πετρώματα, από τον βροχομετρικό χάρτη, υπολογίζονται σε 888 mm και η ωφέλιμη απορροή 425 mm. Η ετήσια κατείδυση στα ανθρακικά πετρώματα, από συγκριτικές μελέτες στον Ελλαδικό χώρο (Μανάκος, 1999; Dimadi, 1988; Μελαδιώτης, 1987) εκτιμάται στο 43% των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων δηλ. 381mm που αντιστοιχούν σε ποσότητα νερού ίση με 117,87*10⁶ m³. Η απορροή αποτελεί το 5% των κατακρημνισμάτων (44 mm/χρόνο) με αντίστοιχη επιφανειακή απορροή 13,7*10⁶ m³.

Στα κροκαλοπαγή (MB2) της περιμετρικής ζώνης, από τα στοιχεία που έχουμε στη διάθεσή μας, προκύπτει ότι τα ρυθμιστικά αποθέματα ανέρχονται σε 12,9*10⁶ m³/χρόνο και μαζί με τις αντλούμενες ποσότητες ανέρχονται σε 21,3*10⁶ m³/χρόνο

2.2.2. Ποιοτικά χαρακτηριστικά των υπόγειων νερών στο καρστικό σύστημα Λιτοχώρου (914)

Για την εκτίμηση της ποιοτικής κατάστασης των νερών στο καρστικό σύστημα Λιτοχώρου (914), πραγματοποιήθηκαν, στα πιστοποιημένα με ISO χημεία του ΙΓΜΕ, χημικές αναλύσεις σε 22 γεωτρήσεις και 3 υδρευτικές πηγές. Στις καρστικές πηγές η αγωγιμότητα κυμαίνεται από 165 ως 430 μS/cm, με μέση τιμή 280 μS/cm. Στις γεωτρήσεις των χαλαρών σχηματισμών η αγωγιμότητα είναι 275 έως 845 μS/cm με μέση τιμή 410 μS/cm. Τα νερά του συστήματος Λιτοχώρου χαρακτηρίζονται από χαμηλή έως μέση περιεκτικότητα σε άλατα εν διαλύσει. Στις πηγές η μέση τιμή του pH είναι 7,8 με εύρος από 7,6 έως 8,2. Στις γεωτρήσεις η μέση τιμή του pH είναι 7,76 και κυμαίνεται από 7,27 μέχρι 8,79 και είναι εντός των ορίων για το πόσιμο νερό. Η ολική

σκληρότητα στις πηγές έχει μέση τιμή 196 mg/l και κυμαίνεται από 168 έως 255 mg/l (σε ισοδύναμο CaCO₃). Στις γεωτρήσεις η σκληρότητα του νερού κυμαίνεται από 90 έως 396 με μέση τιμή 243 mg/l (σε ισοδύναμο CaCO₃) αντίστοιχα και κατατάσσονται στα ημίσκληρα έως σκληρά (Βεράνης, 2010).

Οι θερμοκρασίες του νερού στις πηγές κυμαίνονται από 8,0 έως 13,5 °C και 13 έως 18 °C στις γεωτρήσεις αντίστοιχα. Τα κύρια ιόντα (Na⁺, K⁺, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, Cl⁻, SO₄⁻, NO₃⁻, NO₂, HCO₃, NH₄⁻ κ.τ.λ.) βρίσκονται εντός των επιτρεπτών ορίων για το πόσιμο νερό. Τα βαρέα μέταλλα και τοξικά στοιχεία όπως: Fe, Mn, Pb, Zn, Cu, Cd, Cr, Ni, Co, Sb, As, B, F στα δείγματα που αναλύθηκαν βρίσκονται σε χαμηλές τιμές. Τα νιτρικά (NO₃) βρίσκονται γενικά σε χαμηλές συγκεντρώσεις και οι τιμές τους κυμαίνονται από <1 έως 33,0 mg/l με μέση τιμή 9,12 mg/l. Τιμές νιτρικών <10mg/l θεωρούνται φυσιολογικές, που σημαίνει ότι στο σύστημα Λιτοχώρου δεν υφίσταται ρύπανση από νιτρικά. Με βάση τα δεδομένα των χημικών αναλύσεων, τα νερά του συστήματος Λιτοχώρου, είναι εξαιρετικής ποιότητας και παρουσιάζουν σχετική ομοιογένεια στη χημική τους σύσταση, που αποδίδεται στο γεγονός ότι τα πετρώματα είναι ασβεστολιθικής σύστασης (Βεράνης, 2010). Στο Σχήμα 4 παρουσιάζονται, με τη μορφή ραβδοδιαγραμμάτων, οι τύποι νερού που επικρατούν στο καρστικό σύστημα Λιτοχώρου (914)

3. ΟΡΕΙΝΟΣ ΟΓΚΟΣ ΟΣΣΑΣ

3.1 ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΚΑΙ ΤΕΚΤΟΝΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

Η κοιλάδα των Τεμπών διασχίζεται από τον ποταμό Πηνειό που στραγγίζει την υδρολογική λεκάνη του και εκβάλλει στο Αιγαίο πέλαγος. Το μεγαλύτερο τμήμα της κοιλάδας δομείται από ανθρακικούς σχηματισμούς της ενότητας Όσσας, γεγονός που εξηγεί και την γενικότερη γεωμορφολογική εικόνα. Οι ασβεστόλιθοι είναι έντονα καρστοποιημένοι και κερματισμένοι. Σε ορισμένα σημεία η απότομη κλίση των τοιχωμάτων διακόπτεται και αναπτύσσονται υποτυπώδεις έως εμφανέστερες αναβαθμίδες, οι οποίες αντιστοιχούν στις διάφορες φάσεις της μορφολογικής εξέλιξης της κοιλάδας. Η περιοχή διατέμενεται από βαθιές κοιλάδες, οι οποίες στις περιοχές των ανθρακικών σχηματισμών έχουν την μορφή κανονικών φαράγγιων. Στην επιφάνεια των ανθρακικών σχηματισμών διακρίνονται έντονες καρστικές μορφές, όπως δολίνες, καταβόθρες, ξηρές κοιλάδες και φαράγγια, οι οποίες φανερώνουν την εξέλιξη της έξω-και ενδοκαρστικής διεργασίας στην περιοχή.

Η περιοχή του όρους Όσσα δομείται από πετρώματα που συγκροτούν ξεχωριστή γεωλογική μονάδα που ονομάστηκε «Ενότητα Όσσας» (Σχήμα 1). Αυτή αποτελείται από δύο ορίζοντες. Ένα κατώτερο από ανθρακικά πετρώματα (O2) ανακρυσταλλωμένα και έναν ανώτερο ορίζοντα, που ονομάστηκε «σειρά Αμπελάκια» (M1) και αποτελείται από μετα-βασικά πετρώματα, πρασινίτες γλαυκοφανιτικούς σχιστόλιθους και παρεμβολές μαρμάρων. Συνολικά η Ενότητα Όσσας, δηλαδή και οι δύο ορίζοντες μαζί, θεωρήθηκαν ότι είναι επωθημένες πάνω στην σειρά του Ολύμπου ενώ πάνω τους βρίσκεται επωθημένη η Πελαγονική ζώνη. Η μάζα της Όσσας γενικά αποτελείται από ένα αντικλινωριακό δόμο με κυριαρχούσα αξονική διεύθυνση BBA αμφίπλευρης βύθισης, με μεγαλύτερο μέτρο βύθισης προς τα ανατολικά εξαιτίας της εντονότερης παραμόρφωσης που δέχεται από το γεωδυναμικό πεδίο του Αιγαίου. Η διαρρηκτική της τεκτονική είναι έντονη και διαμορφώνονται ζώνες εντατικής διάρρηξης μεγάλου μήκους οι σημαντικότερες από τις οποίες είναι: η διαρρηκτική ζώνη Γόννων–Πηνειού–Τεμπών (BA/κής διεύθυνσης), η διαρρηκτική ζώνη Ελάτειας– Αμπελακίων–Ομόλιου (BBA/κής διεύθυνσης) κ.α. (Σταμάτης και Μιγκίρος, 2004).

3.2. ΚΑΡΣΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΚΑΤΩ ΟΛΥΜΠΟΥ-ΟΣΣΑΣ (914)

3.2.1 Υδρογεωλογικές συνθήκες

Το καρστικό σύστημα Κάτω Ολύμπου-Όσσας (812) αναπτύσσεται στο ΒΑ τμήμα της Θεσσαλίας και καταλαμβάνει μεγάλο μέρος του Κάτω Ολύμπου και της βόρειας και κεντρικής Όσσας (Σχήμα 1). Η έκτασή του ανέρχεται σε 105 Km² και το πάχος του υδροφόρου ορίζοντα ανέρχεται σε 60m. Οι υδρογεωλογικές συνθήκες της περιοχής εξαρτώνται άμεσα από την παρουσία των ανθρακικών σχηματισμών και την έντονη διαρηκτική τεκτονική που επικρατεί. Στους κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους και δολομίτες της ενότητας Όσσας αναπτύσσεται ένας αξιόλογος καρστικός υδροφόρος, σημαντικής δυναμικότητας, τα κατεισδύοντα επιφανειακά νερά, τα οποία σε γενικές γραμμές ακολουθούν την κλίση των πετρωμάτων και τις διευθύνσεις των ζωνών διάρρηξης, εμφανίζονται και πάλι στην επιφάνεια στα χαμηλότερα τοπογραφικά σημεία της κοιλάδας των Τεμπών, δημιουργώντας χαρακτηριστικές πηγές με υψηλές παροχές κοντά στην κοίτη ή και στην ίδια κοίτη του Πηνειού ποταμού.

Η τροφοδοσία του συστήματος πραγματοποιείται από τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα που δέχεται η ελεύθερη επιφάνεια των μαρμάρων και από επιφανειακά νερά υδρορρεμάτων της Όσσας κυρίως και του Κάτω Ολύμπου.

Η εκτόνωση του καρστικού υδροφορέα πραγματοποιείται στο βόρειο τμήμα της Όσσας μέσω των καρστικών πηγών που αναβλύζουν στην κοιλάδα των Τεμπών κατά μήκος της νότιας κυρίως κοίτης του Πηνειού (ΡΠ1, ΡΠ3, ΡΠ4) και της βόρειας δευτερευόντως (ΡΠ2). Όλες οι προαναφερθείσες πηγές χαρακτηρίζονται ως μεσοστρωματικές πηγές, με επίπεδο βάσης σχιστολιθικές ενστρώσεις οι οποίες συναντήθηκαν κατά την διάτρηση της ερευνητικής γεώτρησης Ρ9α του Ι.Γ.Μ.Ε (Παπαπέτρος, 2002). Οι παροχές των πηγών αυτών παρουσιάζουν έντονη εποχική διακύμανση, από σχεδόν πλήρη στέρηση έως >1000 l/s (Μανάκος, 2010). Η υπόγεια ροή παρουσιάζει διεύθυνση Ν-ΝΑ για τη περιοχή του Κάτω Ολύμπου και Β-ΒΑ διεύθυνση για τη βόρεια περιοχή της Όσσας ενώ κοινά σημεία αποστράγγισης αποτελούν οι καρστικές πηγές στην κοιλάδα των Τεμπών. Η εφαρμογή ιχνηθετικών μεθόδων, με χρήση NaCl και Uranin, επιβεβαίωσε, ότι η κύρια εκτόνωση του καρστικού υδροφορέα συντελείται μέσω των καρστικών πηγών στην κοίτη του Πηνειού και πιθανά εν μέρει στις δελταϊκές προσχώσεις του Πηνειού και στο Αιγαίο πέλαγος. Διαπιστώνονται υψηλές ταχύτητες υπόγειας ροής, οι οποίες κυμαίνονται μεταξύ 70 m/h και 145 m/h, γεγονός που φανερώνει την έντονη καρστοποίηση των ανθρακικών σχηματισμών και προφανώς τη σπηλαιώδη κατάσταση που επικρατεί. (Σταμάτης και Ζαγγανά, 2004).

Στον Πίνακα 2 εμφανίζονται υδρολογικά στοιχεία του καρστικού συστήματος για την περίοδο 2004-2008. Ο λόγος των μέγιστων προς τις ελάχιστες παροχές των πηγών δεν είναι μεγάλος (μέσος όρος 4,71) γεγονός που χαρακτηρίζει μια καλή λειτουργία του υδροφορέα, ο οποίος διακρίνεται από ένα καλά διασυνδεδεμένο καρστικό δίκτυο αγωγών και συλλεκτών (Μανάκος, 2010).

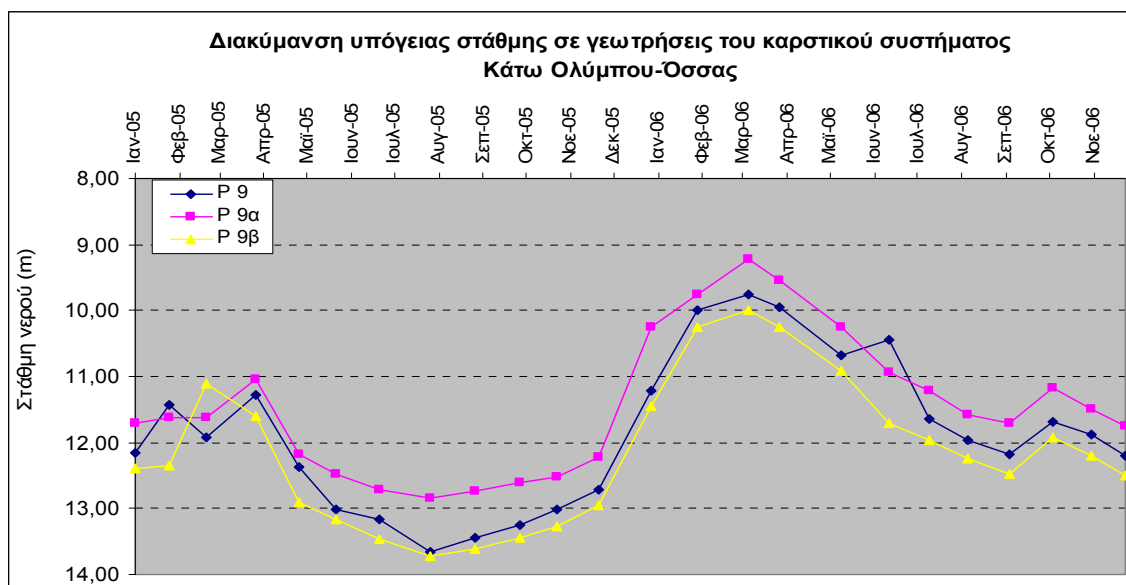
Η δίατα των πηγών επηρεάζεται σε πολύ μικρό ποσοστό από τις εκμεταλλεύσεις των λίγων γεωτρήσεων που λειτουργούν στο περιβάλλον του καρστικού υδροφορέα.

Για τη παρακολούθηση της διακύμανσης της στάθμης στο καρστικό σύστημα Κάτω Ολύμπου-Όσσας (812) πραγματοποιήθηκαν σταθμημετρήσεις σε πέντε υδρογεωτρήσεις, για το χρονικό διάστημα 2004-2008.

Πίνακας 2 : Υδρολογικά στοιχεία του καρστικού υδροφορέα Κάτω Ολύμπου-Όσσας (812) για το χρονικό διάστημα 2004-2008

Έτος	Μέσα ετήσια ανανεώσιμα αποθέματα (m ³)	Μέσες ετήσιες απολήψεις νερού (m ³)	Λόγος των μέγιστων προς τις ελάχιστες παροχές	Μέση ετήσια θερμοκρασία νερού (°C)	Μέση διακύμανση της υπόγειας στάθμης (m)
2005-2008	65,17*106	4,00*106	4,71	14,02	3,67

Από τη μηνιαία διακύμανση της υπόγειας στάθμης σε τρεις υδρογεωτρήσεις του συστήματος (Σχήμα 3), διαπιστώνεται μια ομαλή λειτουργία του υδροφορέα. Η μικρή άνοδος της στάθμης, κατά το έτος 2006, οφείλεται στις αυξημένες βροχοπτώσεις που καταγράφηκαν στο συγκεκριμένο έτος. Με βάση τις μηνιαίες μετρήσεις στάθμης διαπιστώνει κανείς, ότι για τα έτη 2005 και 2006 η μέση ετήσια διακύμανσή της ανέρχεται σε 3,28 μ. και 3,79 αντίστοιχα.

**Σχήμα 3.** Διακύμανση της υπόγειας στάθμης σε γεωτρήσεις του καρστικού συστήματος Κάτω Ολύμπου-Όσσας για τα έτη 2005-2006

3.2.3 Σχέση καρστικής υδροφορίας με Πηνειό ποταμό

Την καρστική μάζα του υδροφορέα διασχίζει ο Πηνειός ποταμός, ο οποίος μορφολογικά μόνο στα στενά των Τεμπών, τη διαχωρίζει σε δύο μικρότερα τμήματα και δημιουργεί το φυσιογραφικό όριο του Κάτω Ολύμπου στα βόρεια από το αντίστοιχο της Όσσας στα νότια.

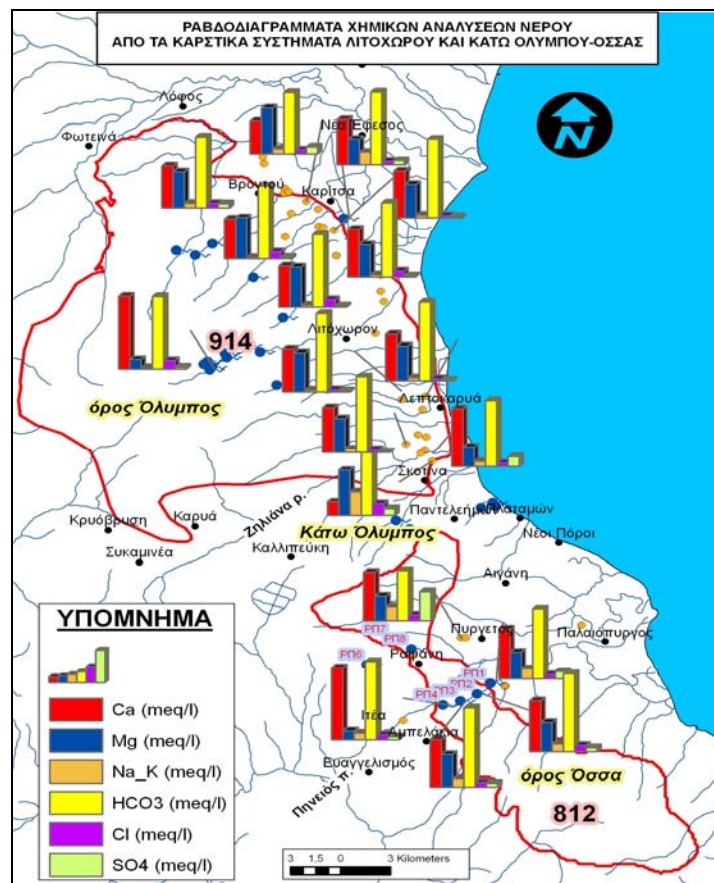
Συνθήκες άμεσης εξάρτησης της στάθμης των υδάτων του ποταμού και της υπόγειας καρστικής υδροφορίας, η οποία όπως προαναφέρθηκε εκδηλώνεται με την μορφή των πηγαίων αναβλύσεων στα στενά των Τεμπών κατά την υγρή περίοδο (Οκτώβριος-Μάιος) δεν υφίστανται (Μανάκος, 2010).

Οι πηγές αναβλύζουν σε υψηλότερες θέσεις από τη στάθμη του νερού του ποταμού, που σημαίνει ότι ο Πηνειός κατά μήκος των στενών των Τεμπών τροφοδοτείται από τα νερά των πηγών του καρστικού υδροφόρου ορίζοντα. Κατά τις

ξηρές περιόδους (Ιούνιος-Σεπτέμβριος), θεωρητικά θα μπορούσε να υπάρξει διήθηση επιφανειακών νερών του Πηνειού προς τον καρστικό υδροφόρο, μόνο στις περιπτώσεις κατά τις οποίες η στάθμη του καρστικού υδροφόρου θα υποβιβάζοταν κάτω από το επίπεδο της κοίτης του Πηνειού. Το γεγονός αυτό όμως θα συνδεόταν άμεσα με τη στέρηση των τριών μεγάλων πηγών (ΡΠ1, ΡΠ2 και ΡΠ3), στοιχείο το οποίο τόσο κατά το παρελθόν όσο και κατά την χρονική περίοδο των μετρήσεων (2004-2008) δεν παρατηρήθηκε (Μανάκος, 2010).

3.2.4. Ποιοτικά χαρακτηριστικά των υπόγειων νερών στο καρστικό σύστημα Κάτω Ολύμπου-Όσσας (812)

Για την μελέτη της ποιοτικής κατάστασης των νερών στο καρστικό σύστημα Κάτω Ολύμπου-Όσσας (812) χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από χημικές αναλύσεις που προέρχονται από πηγές και υδρογεωτρήσεις και έγιναν στο διάστημα 2005-2008. Από την μελέτη των υδροχημικών δεδομένων προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα.



Σχήμα 4. Ραβδοδιαγράμματα χημικών αναλύσεων νερού από πηγές και γεωτρήσεις των καρστικών συστημάτων Λιτοχώρου (914) και Κάτω Ολύμπου-Όσσας (812)

Στα νερά του καρστικού υδροφόρου, η αγωγιμότητα κυμαίνεται μεταξύ 300 και 450 $\mu\text{S}/\text{cm}$, ενώ το pH παρουσιάζει εύρος τιμών από 6,90 έως 8,61 με μέσο όρο που ανέρχεται σε 7,78 και είναι εντός των ορίων για το πόσιμο νερό.

Η ολική σκληρότητα κυμαίνεται από 175 έως 283 mg/l (σε ισοδύναμο CaCO_3) με μέση τιμή 218 mg/l και τα νερά κατατάσσονται στα σκληρά έως πολύ σκληρά ενώ οι θερμοκρασίες κυμαίνονται από 10,8 έως 16,4 $^{\circ}\text{C}$. Τα κύρια ιόντα Na^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} ,

Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , NH_4^+ κ.τ.λ. βρίσκονται εντός των επιτρεπτών ορίων για το πόσιμο νερό ενώ τα βαρέα μέταλλα και τοξικά στοιχεία όπως: Fe, Mn, Pb, Zn, Cu, Cd, Cr, Ni, Co, Sb, As, B, F, στα δείγματα που αναλύθηκαν βρίσκονται σε χαμηλές τιμές (Μανάκος, 2010). Τα νιτρικά (NO_3^-) βρίσκονται γενικά σε χαμηλές συγκεντρώσεις και οι τιμές τους κυμαίνονται από <1 έως 33,0 mg/l με μέση τιμή 9,12 mg/l, που σημαίνει ότι στο καρστικό σύστημα Κάτω Ολύμπου-Όσσας δεν υφίσταται ρύπανση από νιτρικά.

Με βάση τα δεδομένα των χημικών αναλύσεων, τα νερά του συστήματος είναι καλής έως ικανοποιητικής ποσιμότητας και αρδευτικής καταλληλότητας, κατηγορίας S1-C2 και S1-C3, και χαρακτηρίζονται ως οξυανθρακικά-ασβεστούχα. Τέλος ο τύπος νερού Ca-Mg- HCO_3^- είναι ο κύριος που επικρατεί στα νερά του υδροφορέα, αλλά παρουσιάζονται και νερά του τύπου Ca- HCO_3^- ή του τύπου Ca-Mg- HCO_3^- - SO_4^{2-} (Μανάκος, 2010). Στο Σχήμα 4 παρουσιάζονται, με τη μορφή ραβδοδιαγραμμάτων, οι τύποι νερού που επικρατούν στο καρστικό σύστημα Κάτω Ολύμπου-Όσσας.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται οι υδρογεωλογικές και υδροχημικές συνθήκες που επικρατούν στα δύο μεγάλα καρστικά συστήματα των ορεινών όγκων Ολύμπου-Όσσας.
- Πρόκειται για το καρστικό σύστημα Λιτοχώρου, το οποίο είναι ένα μεικτό σύστημα που αποτελείται από το καρστ του Ολύμπου και τον κοκκώδη υδροφορέα, που εντοπίζεται στην περιμετρική ζώνη στα βόρεια και ανατολικά περιθώριά του και τροφοδοτείται από το κάρστ. Η εκφόρτισή του γίνεται με πολλές πηγές που σχετίζονται με ρηξιγενείς δομές ή είναι πηγές επαφής και εντοπίζονται σε διάφορα υψόμετρα. Στα κροκαλοπαγή της περιμετρικής ζώνης αναπτύσσεται ένας κοκκώδης υδροφόρος ορίζοντας σημαντικής υδροδυναμικότητας. Οι σχηματισμοί αυτοί καλύπτουν συνολικά έκταση 155 km² και έχουν πάχος που ξεπερνά τα 600m. Στις αλλουβιακές αποθέσεις της παράκτιας ζώνης, που συνίστανται από άμμους, χαλίκια, κροκάλες με αργιλικές στρώσεις ενδιάμεσως και καταλαμβάνουν έκταση 20 km², αναπτύσσεται επίσης αξιόλογη υπόγεια υδροφορία. Με βάση τα δεδομένα των χημικών αναλύσεων, τα νερά του συστήματος Λιτοχώρου, είναι εξαιρετικής ποιότητας. Τα κύρια ιόντα (Na^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , NO_2^- , HCO_3^- , NH_4^+ κ.τ.λ.) βρίσκονται εντός των επιτρεπτών ορίων για το πόσιμο νερό. Τα βαρέα μέταλλα και τοξικά στοιχεία όπως: Fe, Mn, Pb, Zn, Cu, Cd, Cr, Ni, Co, Sb, As, B, F στα δείγματα που αναλύθηκαν βρίσκονται σε χαμηλές τιμές. Τα νιτρικά (NO_3^-) βρίσκονται γενικά σε χαμηλές συγκεντρώσεις και οι τιμές τους κυμαίνονται από <1 έως 33,0 mg/l με μέση τιμή 9,12 mg/l, που σημαίνει ότι τα υπόγεια νερά στο σύστημα Λιτοχώρου δεν υφίσταται ρύπανση από νιτρικά.
- Το καρστικό σύστημα Κάτω Ολύμπου-Όσσας αναπτύσσεται στο βορειοανατολικό τμήμα της Θεσσαλίας και καταλαμβάνει μεγάλο μέρος του Κάτω Ολύμπου και της βόρειας και κεντρικής Όσσας. Στην ανθρακική ενότητα αναπτύσσονται πλούσιες υπόγειες υδροφορίες, οι οποίες εκφορτίζονται κύρια από πηγές που αναβλύζουν στην κοιλάδα των Τεμπών (πηγές: Δάφνης, Μαργκά, Αγ. Παρασκευής και Αφροδίτης). Σημαντικές όμως εκροές υπόγειων νερών, χωρίς όμως να γνωρίζουμε την ακριβή υδραυλική τους σχέση, πρέπει να λαμβάνουν χώρα και προς το αλλουβιακό ριπίδιο των δελταϊκών αποθέσεων του Πηνειού, όπου ο καρστικός υδροφορέας έρχεται σε άμμεση υδραυλική επικοινωνία, στη βόρεια έξοδο των Τεμπών, με τις προαναφερόμενες προσχώσεις. Με βάση τις μηνιαίες μετρήσεις στάθμης διαπιστώνει κανείς, ότι για τα έτη 2005 και 2006 η μέση ετήσια

διακείμενη της ανέρχεται σε 3,28 μ. και 3,79 αντίστοιχα. Συνθήκες άμεσης εξάρτησης της στάθμης των υδάτων του ποταμού Πηνειού και της υπόγειας καρστικής υδροφορίας δεν υφίστανται. Με βάση τα δεδομένα των χημικών αναλύσεων, τα νερά του συστήματος είναι καλής έως ικανοποιητικής ποσότητας και αρδευτικής καταλληλότητας, κατηγορίας S1-C2 και S1-C3, και χαρακτηρίζονται ως οξυανθρακικά-ασβεστούχα. Ο τύπος νερού Ca-Mg-HCO₃ είναι ο κύριος που επικρατεί στα νερά του υδροφορέα, αλλά παρουσιάζονται και νερά του τύπου Ca-HCO₃ ή του τύπου Ca-Mg-HCO₃-SO₄. Τα νιτρικά (NO₃), τα βαρέα μέταλλα και τοξικά στοιχεία στα δείγματα που αναλύθηκαν βρίσκονται σε χαμηλές τιμές.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Βεράνης, Ν., 2010. Υδρογεωλογική μελέτη. Υδατικά ισοζύγια λεκανών. Παρακολούθηση της ποιότητας και μέτρα προστασίας των νερών της Κεντρικής Μακεδονίας (Υ.Δ ανατ.9, 10 και 11δυτ.). Γ' ΚΠΣ., Θεσσαλονίκη. ΙΓΜΕ.
- Dimadi A.,(1988). Comportment Hydrogeologique des marbles de la bordure du Rhodope Hydrogeologie du secteur sub-quest. du massif du Falacro Macedoine orientale- Grece.
- Godfriaux, I., 1968. Etude géologique de la region de l' Olympe (Grèce). These Doct, Sci., Paris (1965). Ann. Géol. Pays héll., t. 19, 280p.
- Goldscheider, N. and Drew, D. (2007). Methods in Karst Hydrogeology. Inter. Assoc. of Hydrogeologists. Taylor & Francis Group, London, U.K.pp.264.
- Μανάκος, Α., 2010. Υδρογεωλογική μελέτη. Υδατικό Δυναμικό Θεσσαλίας (08). Γ' ΚΠΣ., Θεσσαλονίκη. ΙΓΜΕ, σελ.547.
- Καλλέργης, Γ., 2000. Εφαρμοσμένη Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία, 2η έκδοση, Τόμος Α, Β & Γ, Τ.Ε.Ε.
- Μανάκος, Α., 1999. Υδρογεωλογική συμπεριφορά και στοχαστική προσημείωση του καρστικού Υδροφόρου συστήματος Κρασιάς Ελασσόνας. Διδ. Διατρ. ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη. σελ. 214.
- Μανάκος, Α., 2006,. Υδρογεωλογική μελέτη για την υπόδειξη θέσης ανόρυξης υδρογεώτρησης στην περιοχή Σκλήθρα του Δέλτα του ποταμού Πηνειού, Μελέτη ΚΕΔ-, Αθήνα.
- Μελαδιώτης, Γ., 1987. Γεωλογική-Υδρογεωλογική μελέτη της περιοχής των πηγών Πάϊκου-Βιρούτ και Μπουτσάβα. Αδημ. μελέτη ΑΠΘ, Τμήμα. Πολ. Μηχ., Εργαστήριο Γεωτεχνικής Μηχανικής. Θεσσαλονίκη, σελ.140, χάρτες.
- Παπαπέτρος Π., 2002, Υδρογεωλογική έρευνα ανθρακικών και οφιολιθικών μαζών Δυτικής και Ανατολικής Θεσσαλίας, Ι. Γ.Μ.Ε, Αθήνα
- Σταμάτης Γ. και Ζαγγανά Ε, 2004. Εκτεταμένες Περιλήψεις 10ου Διεθνούς Συνεδρίου, σελ 259-260.
- Σταμάτης Γ. και Μιγκίρος Γ, 2004. Εκτεταμένες Περιλήψεις 10ου Διεθνούς Συνεδρίου, σελ 257-258.

ΥΔΡΟΧΗΜΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΑΙ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕΡΩΝ ΣΤΗ ΛΕΚΑΝΗ ΤΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ ΝΗΛΕΑ, ΝΑ ΕΥΒΟΙΑ

Παναγιώτης Τσερόλας, Ελένη Ζαγγανά

Εργαστήριο Υδρογεωλογίας, Τμήμα Γεωλογίας Πανεπιστημίου Πατρών,
26500 Ρίο Πατρών

p.tserolas@gmail.com, zagana@upatras.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας μελετώνται οι υδροχημικές συνθήκες και η ποιότητα των υπόγειων νερών στη λεκάνη του ποταμού Νηλέα στη ΝΑ Εύβοια με έμφαση στη μελέτη του προσχωματικού υδροφόρου της περιοχής. Ο Νηλέας είναι ένα υδατόρευμα με μήκος περίπου 20χλμ, εποχιακής ροής και διεύθυνση ΒΒΔ-ΝΝΑ. Διασχίζει το Δήμο Αυλώνος και έχει σημαντική οικονομική και περιβαλλοντική σημασία για την ευρύτερη περιοχή. Η λεκάνη του ποταμού εκτείνεται κυρίως στους Νεογενείς σχηματισμούς της Πελαγονικής ζώνης αλλά και σε μεταμορφωμένους σχηματισμούς της Αττικοκυκλαδικής μάζας. Στα ανατολικά όρια της λεκάνης απαντούν εμφανίσεις καρστικοποιημένων Ιουρασικών ασβεστόλιθων και μεγάλος αριθμός καρστικών πηγών χαμηλής παροχής. Με βάση τα αποτελέσματα της υδροχημικής μελέτης τα νερά του ελεύθερου υδροφόρου χαρακτηρίζονται ως γαιοαλκαλικά νερά με υψηλό ποσοστό αλκαλίων, ενώ τα νερά των καρστικών πηγών ως οξυανθρακικά – γαιοαλκαλικά νερά με επίσης σημαντικό ποσοστό αλκαλίων. Με τη χρήση της παραγοντικής ανάλυσης αναδείχτηκαν περιοχές νιτρορύπανσης, περιοχές τροφοδοσίας του υδροφόρου από το καρστικό σύστημα της Οχτωνιάς, καθώς και περιοχές περιορισμένης διείσδυσης της θάλασσας στο παράκτιο τμήμα της περιοχής μελέτης.

HYDROCHEMICAL CONDITIONS AND GROUNDWATER QUALITY CONDITIONS IN NILEAS RIVER BASIN, SE EVIA

P. Tserolas, E. Zagana

Hydrogeology Lab., Geology Department, University of Patras, 26504 Rio Patras

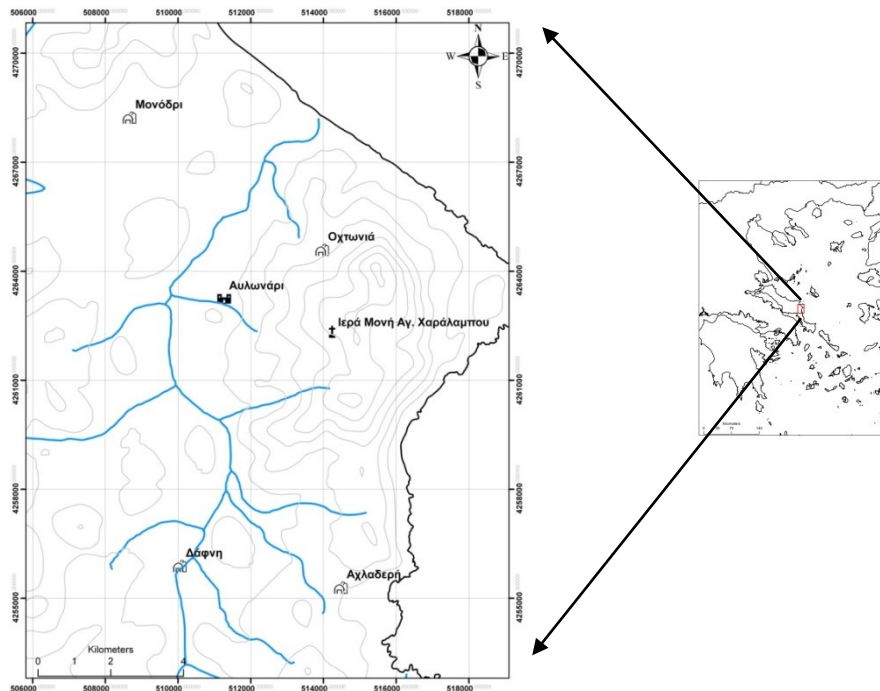
ABSTRACT

The study area is located in SE Evia. Nileas is a seasonal stream with NNW-SSE direction through Avlonas municipality with significant economic and environmental value to the surrounding area. It lies on the Neogene formations of the Pelagonic Zone and has a length of approx. 20 km. On the eastern margins of the Nileas basin outcrop the Jurassic Limestones of Oxtonia, with a maximum altitude of 820 m, intense karstification and numerous low discharge springs (<1lt/s). Concerning their hydrochemical character the groundwater of the aquifer are characterized as geo-alkaline waters with high amounts of alkaline, while the karst spring waters as bicarbonate- geo-alkaline waters. Hydrochemical analysis results are used to perform factor analysis in order to investigate correlations between Nileas and the spring water as a first evaluation of the two systems' correspondence, as well as to investigate further phenomena like water contamination.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η περιοχή μελέτης βρίσκεται στη Ν-ΝΑ Εύβοια (εικόνα 1) και συνιστάται από την λεκάνη απορροής του ποταμού Νηλέα καθώς και το μέτωπο εκφόρτισης του καρστικού συστήματος της Οχτωνιάς στο ανατολικό περιθώριο της λεκάνης. Ο Νηλέας είναι ένα υδατόρευμα εποχιακής ροής με μήκος κύριας κοίτης 20 km και γενική διεύθυνση ΒΒΑ-ΝΝΔ. Το συνολικό μήκος του υδρογραφικού δικτύου είναι 128km ενώ το εμβαδόν της λεκάνης είναι $\sim 9 \text{ km}^2$. Το δίκτυο παρουσιάζει υδρογραφική πυκνότητα 13.4, συχνότητα 11.4 και μαιανδρική στο σύνολό του γεωμετρία (Τσερόλας, 2009).



Εικόνα 1. Περιοχή μελέτης

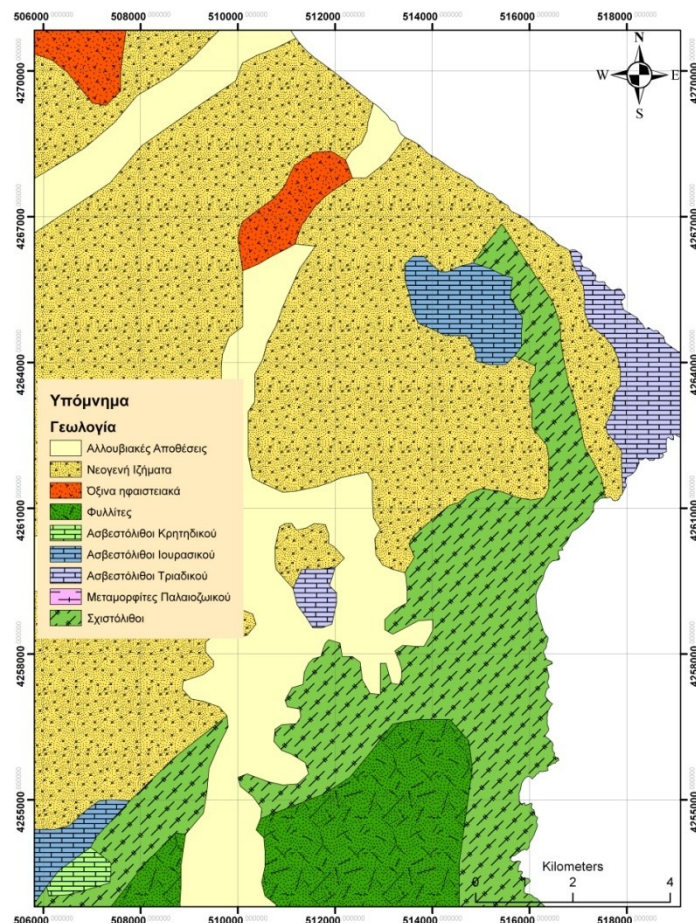
Το ανάγλυφο της λεκάνης του ποταμού είναι ήπιο με κλίσεις 0-20%, ενώ η διεύθυνση του υδρογραφικού δικτύου συμπίπτει με την διεύθυνση περιορισμένων κανονικών ρηγμάτων, κυρίως στο ΒΑ όριο της περιοχής. Ο προσχωματικός υδροφόρος της περιοχής υδρομαστεύεται από σημαντικό αριθμό κυρίως πηγαδιών και λιγότερο γεωτρήσεων και χρησιμοποιείται για την άρδευση των καλλιεργειών της περιοχής.

1.2 ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ

Η λεκάνη του ποταμού Νηλέα εκτείνεται σε δυο γεωτεκτικές ζώνες: Το ΝΑ όριο της Πελαγονικής ζώνης και το ΒΔ όριο της Αττικοκυκλαδικής μάζας (εικόνα 2). Στην Πελαγονική ζώνη διακρίνουμε ευρύτερα δυο τμήματα: α) Το κατώτερο τμήμα, που συγκροτείται από μια ακολουθία μετα-ιζηματογενών και μετα-ηφαιστειακών πετρωμάτων του Πέρμιου, ανθρακικά ιζήματα Τριαδικού-Ιουρασικού με υπόβαθρο παρα- και όρθογενέσιους, δομικού πάχους 8km. β) Το ανώτερο Τμήμα (πρώην Υποπελαγονική ζώνη), το οποίο αποτελείται από οφιόλιθους, ηφαιστειακά και ιζηματογενή πετρώματα, πάνω στα οποία έχουν αποθεθεί ασβεστόλιθοι του Κρητιδικού ενώ κατά το Παλαιόκαινο-αρχές Ηωκαίνου ξεκινάει η απόθεση φλύσχη.

Η επώθηση της πελαγονικής στην περιοχή του Αλιβερίου, δυτικά της περιοχής μελέτης, διαχωρίζει την Αττικο-Κυκλαδική Ζώνη σε δυο τμήματα: Την κατώτερη

ενότητα του Αλμυροποτάμου (Ν. Εύβοια), η οποία αποτελείται από την κυριαρχία μεταμορφωμένων Μεσοζωικών ανθρακικών και κλαστικών ιζημάτων και την ανώτερη ενότητα, η οποία αποτελεί το νεοελληνικό Τεκτονικό Κάλυμμα. Οι δυο αυτές υποενότητες χαρακτηρίζονται από μεταμορφωμένα πετρώματα, με χαρακτηριστικά τα μάρμαρα και σιπολίτες Στύρων όπως και τους σχιστόλιθους της Όχης.



Εικόνα 2. Γεωλογικός χάρτης

Στην περιοχή μελέτης το υπόβαθρο δομούν τα ανθρακικά πετρώματα του Τριαδικού (Μουντράκης, 1985).

Οι σχιστόλιθοι και φυλλίτες της περιοχής προέρχονται από ιζηματογενή πετρώματα που έχουν μεταμορφωθεί στην πρασινοσχιστολιθική φάση (Κατσικάτσος, 1966) και μεταμορφωμένα τμήματα φλύσχη από την επώθηση του Νεοελληνικού τεκτονικού καλύμματος πάνω στην ενότητα αυτή.

Οι ασβεστόλιθοι Ιουρασικού απατώνται στα ανατολικά όρια της λεκάνης Αλιβερίου-Κύμης και εμφανίζονται τοπικά στην περιοχή Οχτωνιά. Είναι τεφρόμαυροι, μεσοστρωματώδεις, μικροκρυσταλλικοί, ενώ είναι έντονα καρστικοποιημένοι. Οι ασβεστόλιθοι του Τριαδικού είναι άστρωτοι κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι, που έχουν προέλθει από ιζηματογένεση αβαθούς θάλασσας. Αποτελούν το κατώτερο τμήμα των ανθρακικών πετρωμάτων, με πάχος που φτάνει και τα 100 m και συνιστούν το υπόβαθρο του βόρειου τμήματος της περιοχής μελέτης.

Τα Νεογενή ιζήματα καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο μέρος σε έκταση της περιοχής μελέτης. Είναι το ανώτερο τμήμα των ιζηματογενών σχηματισμών της

ευρύτερης λεκάνης Αλιβερίου-Κύμης. Αποτελούνται κυρίως από κροκαλοπαγή ποταμο-λιμναίας φάσης, ενώ στο βόρειο τμήμα της λεκάνης και πλησίον της Κύμης επικρατούν ιζήματα μαργαϊκής σύστασης. Στα ιζήματα αυτά πλησίον των μεταμορφωμένων ενοτήτων της Αττικο-Κυκλαδικής μάζας στο νότιο τμήμα της περιοχής κυριαρχούν τα κλαστικά υλικά με παρουσία λεπτόκοκκου αργιλικού συνδετικού υλικού.

Οι αλλουβιακές αποθέσεις αποτελούνται από χαλαρά αργιλοαμμώδη υλικά, ασύνδετα υλικά από άμμους και κροκαλο-λατύπες στις κοίτες των χειμάρρων. Τα ηφαιστειακά πετρώματα στο ΒΔ τμήμα της είναι τόφοι ηφαιστειακού δακίτη, αιολικά ιζήματα από μεταφορά ηφαιστειακού υλικού από το ηφαίστειο του Οξυλίθου Β – ΒΔ της περιοχής μελέτης.

1.3 ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ

Στην περιοχή μελέτης αναπτύσσονται ένα κύριο υδροφόρο στρώμα σημαντικής δυναμικότητας, ο ελεύθερος υδροφόρος των αλλουβιακών αποθέσεων, ο μικρότερης δυναμικότητας υδροφόρος των Νεογενών σχηματισμών, ενώ στο ανατολικό περιθώριο της λεκάνης αναπτύσσεται υδροφόρο στρώμα στο καρστικό σύστημα της Οχτωνιάς. Το μέτωπο εκφόρτισης του καρστικού συστήματος αποτελείται από πολλές πηγές μικρής παροχής.

Ο ελεύθερος υδροφόρος που αναπτύσσεται στις αλλουβιακές αποθέσεις παρουσιάζει μια γενική διεύθυνση παράλληλη με αυτήν της κοίτης του ποταμού, με τοπικές διαφοροποιήσεις μικρής κλίμακας κατάντη του μετώπου των πηγών αλλά και στην περιοχή της εμφάνισης του ηφαιστειακού τόφου. Παρουσιάζεται ενιαία υδραυλική κλίση κατα μήκος του υδροφόρου με ελαφρά χαμηλότερες τιμές στο νότιο τμήμα και στην εμφάνιση των μεταμορφωμένων πετρωμάτων (Τσερόλας, 2009).

Γενικά ο ελεύθερος υδροφόρος τροφοδοτείται από την δράση των υδατορευμάτων, ενώ διαφοροποίηση υπάρχει μόνο στο κεντρικό τμήμα και κατάντη των πηγών όπου ο υδροφόρος τροφοδοτεί με τη σειρά του μικρά υδατορεύματα (Τσερόλας, 2009).

1.3.1 Το μέτωπο των πηγών Οχτωνιάς

Το μέτωπο των καρστικών πηγών της Οχτωνιάς αποτελείται από πολλές (>15) πηγές, οι οποίες εμφανίζονται στην επαφή των ασβεστολιθικών πετρωμάτων με τα Νεογενή ιζήματα. Οι πηγές είναι στην πλειοψηφία τους πολύ μικρής παροχής (0,3-1 lt/sec) και σπανίως μεγαλύτερης παροχής (~2-2,5 lt/sec) (Λαμπροπούλου 2012, Τσερόλας, 2009).



Εικόνα 3. Πηγή Βοϊβόνδα, Οχτωνιά

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Στην περιοχή πραγματοποιήθηκε λεπτομερής απογραφή του συνόλου των υδροσημείων (πηγών, πηγαδιών και γεωτρήσεων). Κατασκευάστηκε κάρναβος από 30 πηγάδια βάσει του οποίου πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις της μεταβολής της στάθμης του ελεύθερου υδροφόρου. Επιπλέον πραγματοποιήθηκε δειγματοληψία νερού και συνολικά συλλέχθηκαν 16 δείγματα νερού (12 δείγματα από πηγάδια και 4 δείγματα από πηγές). Για κάθε δείγμα συλλέχθηκε μια φιάλη 1 L και μία φιάλη 100 ml, αφού πρώτα το νερό διηθήθηκε επί τόπου μέσω ηθμού με φίλτρο διαμέτρου πόρων 0,45 μm (Millipore) και οξινίστηκε με 0,5 ml πυκνού HNO₃. Ταυτόχρονα μετρήθηκαν επιτόπου η θερμοκρασία (T°C), η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) και το pH με φορητή συσκευή (YSI 63), ενώ το CO₂ και η αλκαλικότητα προσδιορίστηκαν με τη μέθοδο της τιτλοδότησης (Hach).

Όλες οι υπόλοιπες χημικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Υδρογεωλογίας του Τμήματος Γεωλογίας του Πανεπιστημίου Πατρών, αμέσως μετά τη συλλογή των δειγμάτων. Τα ιόντα αμμωνίου (NH₄⁺), όπως και τα νιτρικά (NO₃⁻), νιτρώδη (NO₂⁻), φωσφορικά (PO₄³⁻) και θειικά ιόντα (SO₄²⁻) προσδιορίστηκαν με φασματοφωτόμετρο (Hach, DR 4000). Οι συγκεντρώσεις των χλωριόντων (Cl⁻) προσδιορίστηκαν με τη μέθοδο της τιτλοδότησης (Hach). Το οξινισμένο και διηθημένο δείγμα χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση των κατιόντων και των ιχνοστοιχείων. Τα κύρια ιόντα Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, και Na⁺ προσδιορίστηκαν με τη μέθοδο της ατομικής απορρόφησης σε φασματοφωτόμετρο GBC Avanta, ενώ οι συγκεντρώσεις των ιχνοστοιχείων προσδιορίστηκαν με τη μέθοδο της φασματομετρίας μάζας σε επαγωγικά συζευγμένο πλάσμα (Elan 6100, Perkin Elmer).

Στη συνέχεια έγινε παρουσίαση των αποτελεσμάτων των χημικών αναλύσεων σε υδροχημικά διαγράμματα Piper και κατασκευαστήκαν χάρτες κατανομής όλων των στοιχείων. Τέλος πραγματοποιήθηκε στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων και συγκεκριμένα παραγοντική ανάλυση R- τύπου, προκειμένου να προσδιοριστούν λεπτομερέστερα οι διεργασίες που διαμορφώνουν τη χημική σύσταση και την ποιότητα του υπόγειου νερού.

2.1 ΠΑΡΑΓΟΝΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Η παραγοντική ανάλυση αποτελεί ένα μαθηματικό εργαλείο για τις γεω-επιστήμες και συμβάλλει στην διάκριση συσχετιζόμενων μεταβλητών σε ένα ευρύ πίνακα δεδομένων, ενώ μπορεί να συνθέσει νέους συνδυασμούς μεταξύ των μεταβλητών και τελικώς, μικρότερο αριθμό μεταβλητών για μετέπειτα ανάλυση και ερμηνεία φυσικών και μη διεργασιών (Παπαθεοδώρου, 1996). Το βασικό μαθηματικό μοντέλο της παραγοντικής ανάλυσης είναι:

$$\mathbf{Z}_n = \mathbf{a}_1\mathbf{F}_1 + \mathbf{a}_2\mathbf{F}_2 + \dots + \mathbf{a}_{n-1}\mathbf{F}_{n-1} + \mathbf{a}_n\mathbf{E}_n, \text{ όπου:}$$

\mathbf{Z} = οι αρχικές μεταβλητές X υπό ‘‘τυποιημένη μορφή’’, παρουσιάζοντας δηλαδή μέση τιμή 0 και διακύμανση = 1.

\mathbf{F} = οι παράγοντες (factors), υποθετικές μεταβλητές ή αλλιώς παραγοντικές τιμές (scores)

\mathbf{a} = τιμές για τον υπολογισμό των αρχικών μεταβλητών ή παραγοντικές φορτίσεις (loadings)

\mathbf{E} = παράγοντας λάθους

Το μαθηματικό μοντέλο της παραγοντικής ανάλυσης συνίσταται από n εξισώσεις της παραπάνω μορφής, όσες και ο αριθμός των αρχικών μεταβλητών.

Η παραγοντική ανάλυση R-τύπου που χρησιμοποιείται για την ανίχνευση εσωτερικών σχέσεων μεταξύ των μεταβλητών και που πραγματοποιήθηκε για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας μετατρέπει τις m μεταβλητές σε n παράγοντες, όπου $n < m$, με τους παράγοντες να αποτελούν γραμμικούς συνδυασμούς των μεταβλητών m χωρίς απώλεια πληροφορίας. Τα βήματα της παραγοντικής ανάλυσης, που πραγματοποιήθηκαν σε περιβάλλον του λογισμικού SPSS είναι τα παρακάτω:

α) Συγκρότηση πίνακα δεδομένων (data matrix)

β) Υπολογισμός πίνακα συσχετίσεων, είτε μέσω του υπολογισμού διακυμάνσεων/συνδιακυμάνσεων, είτε μέσω του υπολογισμού συντελεστών συσχέτισης όπου προκύπτει ένας τετραγωνικός πίνακας $R = I/N * X' * X$, όπου X' ένας νέος πίνακας με στήλες τις γραμμές και γραμμές τις στήλες του αρχικού πίνακα X .

Υπολογισμός **ιδιοτιμών** και **ιδιοδιανυσμάτων** από τον πίνακα των συντελεστών συσχέτισης R .

γ) Ομαλοποίηση ιδιοδιανυσμάτων (normalized eigenvectors), όπου επιλέγεται μια σταθερά k έτσι ώστε το γινόμενο της με το ιδιοδιάνυσμα να έχει μήκος ίσο με την μονάδα. Τα μοναδιαία διανύσματα καλούνται ομαλοποιημένα. Στο σημείο αυτό γίνεται ο υπολογισμός των **παραγοντικών φορτίσεων** με στόχο το μετασχηματισμό των ιδιοδιανυσμάτων σε μια νέα μορφή όπου το μήκος τους να είναι ανάλογο της αντίστοιχης ιδιοτιμής. Αυτό αποτελεί το γινόμενο των στοιχείων του ιδιοδιανύσματος με την τετραγωνική ρίζα της αντίστοιχης του ιδιοτιμής. Η **αποκοπή** των επουσιωδών παραγόντων αποτελεί το κρίσιμο βήμα για την αναπαράσταση της πληροφορίας σε ένα περιορισμένο αριθμό παραγόντων. Το πλήθος των παραγόντων που αποκόπτονται δεν ακολουθεί κάποιο σταθερό κανόνα και είναι στην κρίση του ερευνητή, για το οποίο όμως έχουν προταθεί μια σειρά από κριτήρια και μέθοδοι: **α)** Επιλογή των πρώτων δυο ή τριών παραγόντων για γραφική αναπαράσταση. **β)** Επιλογή παραγόντων με βάση την ολική διακύμανση που εκφράζουν σε % (π.χ. όσοι παράγοντες συνιστούν τιμές >80% της πληροφορίας). **γ)** Επιλογή όσων παραγόντων έχουν ιδιοτιμές >1. **δ)** Επιλογή με βάση την αλλαγή κλίσης στο διάγραμμα Catell (Scree Plot). Υπάρχουν και σειρά άλλων υποκειμενικών κριτηρίων, όπως η το ποσοστό πληροφορίας για κάποια συγκεκριμένη μεταβλητή κλπ. Η **περιστροφή** των παραγόντων (factor rotation) είναι μια μαθηματική διεργασία που στόχο έχει την περιστροφή των αξόνων των παραγόντων σε θέσεις τέτοιες ώστε οι υψηλές φορτίσεις να τείνουν προς την μονάδα και οι χαμηλές να τείνουν προς το μηδέν, ώστε να εκφραστούν καλύτερα τα αρχικά δεδομένα και να αποδοθεί σαφώς η εσωτερική δομή του πίνακα.

δ) Υπολογισμός παραγοντικών τιμών (scores). Για κάθε θέση παρατήρησης ο κάθε παράγοντας λαμβάνει μια τιμή, η οποία προκύπτει ως αλγεβρικό άθροισμα των γινομένων μεταξύ των συγκεντρώσεων των μεταβλητών και των φορτίσεων του παράγοντα. Η κατανομή των παραγοντικών τιμών μπορεί να εκφραστεί χωρικά, αποτυπώνοντας την εξάπλωση του κάθε παράγοντα.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στους πίνακες 1 και 2 παρουσιάζονται οι μέσες, μέγιστες και ελάχιστες τιμές των αποτελεσμάτων των χημικών αναλύσεων για τα δείγματα του προσχωματικού υδροφόρου (πηγάδια) και των καρστικών πηγών αντίστοιχα. Στις εικόνες 4 και 5 απεικονίζονται τα υδροχημικά διαγράμματα Piper για τα δείγματα του ελευθέρου υδροφόρου και των πηγών αντίστοιχα. Όπως προκύπτει τόσο από τους πίνακες, όσο και από τα διαγράμματα, κυρίαρχα κατιόντα είναι το ασβέστιο και το νάτριο τόσο για τα

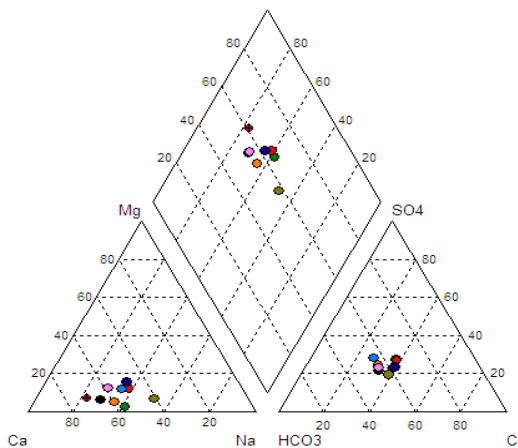
νερά του αλλουβιακού υδροφόρου, όσο και των πηγών. Στα ανιόντα παρουσιάζεται μια διαφοροποίηση μεταξύ των νερών του υδροφόρου και των πηγών. Τα όξινα ανθρακικά, θειικά, αλλά και το χλώριο εμφανίζονται να κυριαρχούν στα νερά του υδροφόρου, ενώ τα όξινα ανθρακικά ανιόντα στα νερά των πηγών. Έτσι τα νερά των πηγών χαρακτηρίζονται ως οξυανθρακικά - γαιοαλκαλικά με σημαντικό ποσοστό αλκαλίων (εικόνα 5), υποδεικνύοντας την ασβεστολιθική προέλευση τους. Η αυξημένη συγκέντρωση των νατρίου και χλωρίου θα μπορούσε να αποδοθεί στην επίδραση από θαλάσσια αερολύματα από τη γειτονική θαλάσσια περιοχή.

Πίνακας 1 – 2. Μέσες, μέγιστες και ελάχιστες τιμές των συγκεντρώσεων για πηγάδια (1) και πηγές (2)

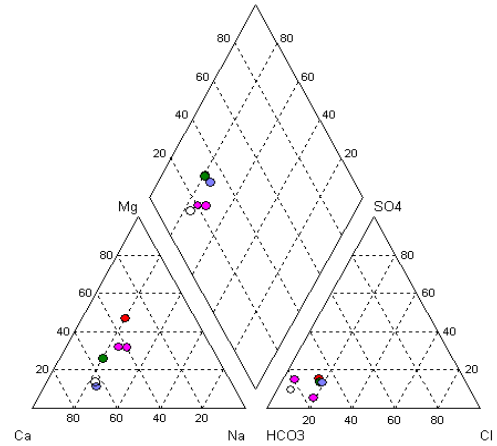
	Avg	Max	Min
pH	6,92	7,9	5,5
Cond.	922	1250	593
Eh	230	353	111
T	23,9	24,1	23,6
Ca	99,2	136	86
Mg	10,75	19,02	4,87
Na	75,1	128,7	41,14
K	2,75	5,74	0,82
Cl	96,3	148	30
HCO₃	247,1	464,1	162,9
SO₄	101,1	170	74
NO₃	48,25	130	16
NO₂	0,01	0,018	0,002
NH₄	0,107	0,546	0,001
As	1,232	1,924	0,942
B	35,236	82,042	15,904
Ba	62,83	91,182	50,980
Cd	0,036	0,081	0,011
Co	0,281	0,346	0,208
Cr	7,208	9,065	5,665
Cu	3,366	7,762	1,076
Li	2,173	3,972	1,079
Mn	9,97014	53,4328	0,961
Mo	0,234	0,424	0,12
Pb	0,198	1,111	0,017
Ni	5,501	6,751	4,370

	Avg	Max	Min
pH	7,41	7,54	7,1
Cond.	683	766	586
Eh	117,8	123	112
T	16,4	24,1	13
Ca	63	72	55,6
Mg	13,1	20,7	7,1
Na	27,36	32,23	22,86
K	3,99	9,85	0,58
Cl	35,35	55	12,5
HCO₃	241,2	292,8	201
SO₄	40,1	59,5	26,8
NO₃	13,45	50	0,9
NO₂	0,008	0,023	0,001
NH₄	0,025	0,043	0,001
As	0,648	0,73	0,54
B	49,509	51,12	48,43
Ba	39,404	40,18	38,87
Cd	0,014	0,02	0,01
Co	0,229	0,29	0,18
Cr	3,904	4	3,79
Cu	1,303	1,39	1,243
Li	1,175	1,31	1
Mn	0,458	0,51	0,39
Mo	0,242	0,31	0,2
Pb	0,01	0,11	0,09
Ni	4,357	4,49	4,17

Το νερό του ελεύθερου υδροφόρου χαρακτηρίζεται ως γαιοαλκαλικό με υψηλό ποσοστό αλκαλίων (εικόνα 4). Οι αυξημένες συγκεντρώσεις των ιόντων νατρίου, καλίου και χλωρίου στο νότιο τμήμα οφείλεται στην διάλυση των ορυκτών των χλωριτικών και αργιλικών σχιστόλιθων της περιοχής.



Εικόνα 4. Διάγραμμα Piper για τον ελεύθερο υδροφόρο

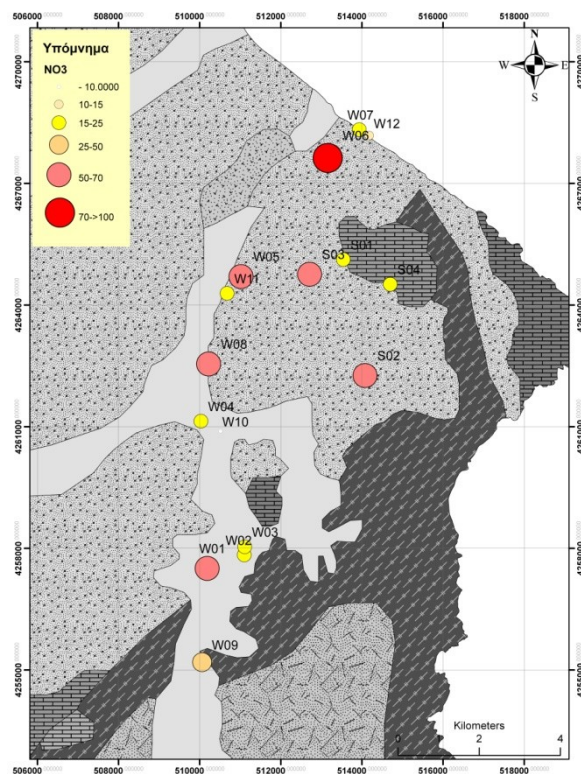
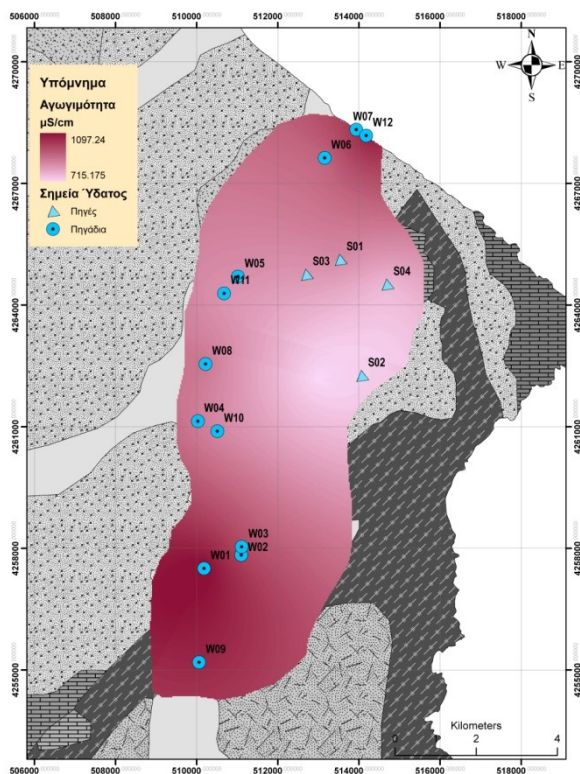


Εικόνα 5. Διάγραμμα Piper καρστικών πηγών

Οι ενώσεις του αζώτου (NO_2^- και NH_4^+) κυμαίνονται γενικά σε χαμηλά επίπεδα, ωστόσο τοπικά παρατηρούνται αυξημένες συγκεντρώσεις σε νιτρικά ιόντα (NO_3^-), (πίνακας 1, εικόνα 7) με τιμές που φτάνουν τα 130 mg/l στον υδροφόρο και 50 mg/l στις πηγές, τιμές που ξεπερνούν το όριο ποσιμότητας της Ευρωπαϊκής Ένωσης (50 mg/l). Οι υψηλές τιμές των νιτρικών ιόντων οφείλονται σε ανθρωπογενή παρέμβαση (εκτεταμένη χρήση λιπασμάτων). Η οικιστική ανάπτυξη και ανθρώπινη δραστηριότητα στη λεκάνη του ποταμού μπορεί να αποτελέσει εν δυνάμει κίνδυνο για την ποιότητα του νερού του ελεύθερου υδροφόρου με σημαντικές οικονομικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Οι συγκεντρώσεις των ιχνοστοιχείων είναι γενικά χαμηλές κάτω από τα όρια ποσιμότητας της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Στις εικόνες 6 και 7 παρουσιάζεται η χωρική κατανομή της αγωγιμότητας και των νιτρικών ιόντων. Όπως φαίνεται η ηλεκτρική αγωγιμότητα αυξάνεται τόσο προς την παράκτια ζώνη, εξαιτίας της αύξησης του νατρίου και χλωρίου από διείσδυση του θαλασσινού νερού, όσο και προς το νότιο τμήμα της εμφάνισης των μεταμορφωμένων πετρωμάτων, εξαιτίας της αύξησης του νατρίου και χλωρίου από τη διάλυση των ορυκτών των χλωριτικών και αργιλικών σχιστόλιθων.



Εικόνα 6. Χωρική κατανομή αγωγιμότητας Εικόνα 7. Χωρική κατανομή νιτρικών ιόντων

3.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΑΡΑΓΟΝΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Η επεξεργασία των δειγμάτων και η παραγοντική ανάλυση οδήγησε στην αποκοπή τεσσάρων παραγόντων με αθροιστικό σύνολο της πληροφορίας 79%. Η αποκοπή έγινε με γνώμονα την τιμή της ιδιοτιμής (>1) και με βάση το διάγραμμα Catell. Οι παράγοντες που προέκυψαν (πίνακας 3) εκφράζονται χωρικά στις εικόνες 8, 9, 10 και 11.

Ο πρώτος παράγοντας εκφράζει την αρνητική συσχέτιση του pH με μια σειρά στοιχείων και ιχνοστοιχείων, όπως τα αμμωνιακά ιόντα, το λίθιο, το βάριο κ.α.. Η χωρική του κατανομή δείχνει υψηλές τιμές για τις καρστικές πηγές με φθίνουσα πορεία προς την λεκάνη του ποταμού, ενώ τοπικής σημασίας υψηλές τιμές παρατηρούνται σε παράκτια πηγάδια και σε πηγάδια πλησίον οικισμών. Ο παράγοντας υποδηλώνει ρύπανση όσο αφορά τα αμμωνιακά ιόντα. Η ρύπανση των πηγών οφείλεται κυρίως στην ανθρώπινη δραστηριότητα αλλά και στην τρωτότητα του καρστικού συστήματος.

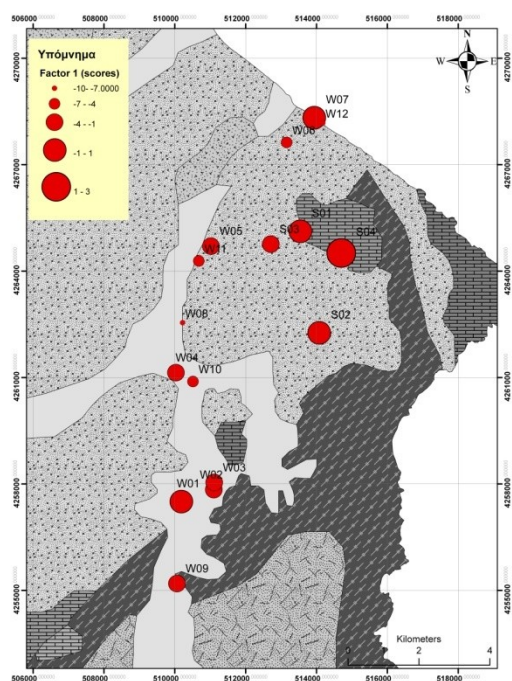
Ο δεύτερος παράγοντας εκφράζει την θετική συσχέτιση ανάμεσα στην αγωγιμότητα, την θερμοκρασία και στοιχεία όπως το ασβέστιο, το νάτριο, το χλώριο και τα θειικά ιόντα. Η χωρική του κατανομή δείχνει μια ομοιογένεια με την χωρική κατανομή της αγωγιμότητας, με αυξημένες τιμές στην παράκτια ζώνη αλλά και στο νότιο τμήμα της λεκάνης του Νηλέα, που βρίσκεται στους μεταμορφωμένους σχηματισμούς της Αττικοκυκλαδικής μάζας. Ο παράγοντας αυτός εκφράζει τόσο την περιορισμένη υφαλμύριση του ελεύθερου υδροφόρου στην παράκτια περιοχή, όσο και τη διαφορετική σύσταση του νερού στο νότιο τμήμα της λεκάνης λόγω της διάλυσης των ορυκτών των μεταμορφωμένων πετρωμάτων.

Πίνακας 3. Αποτελέσματα παραγοντικής ανάλυσης (factors)

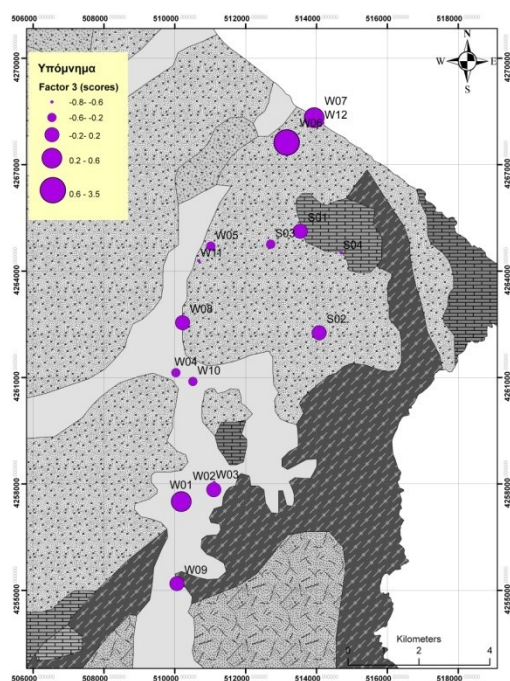
Παράγοντες				
	1	2	3	4
pH	-,822			
Cond.		,796		
Eh				
T		,721		
Ca		,679		
Mg				
Na		,836		
K				
Cl		,605		
HCO3			,724	
SO4		,639	,669	
NO3			,758	
NO2				
NH4	,835			
As	,668			
B				
Ba	,814			
Cd				,943
Co	,694			
Cr	,637	,671		
Cu				,777
Li	,800			
Mn				
Mo				,626
Pb			,877	
Ni	,692			

Ο τρίτος παράγοντας εκφράζει την συσχέτιση των όξινων ανθρακικών ιόντων με στοιχεία όπως τα θειικά και νιτρικά ιόντα αλλά και ιχνοστοιχεία όπως ο μόλυβδος. Η χωρική του κατανομή δείχνει μια πιθανή σχέση εμπλουτισμού του ελεύθερου υδροφόρου κατάντη των εκροών των καρστικών πηγών από το νερό του καρστικού συστήματος. Εκφράζει μια πιθανή ανάμιξη νερών από τα νερά των καρστικών πηγών με αυξημένες συγκεντρώσεις των όξινων ανθρακικών με νερά του υδροφόρου, τα οποία παρουσιάζουν αυξημένες συγκεντρώσεις θεικών, αλλά και νιτρικών αλάτων.

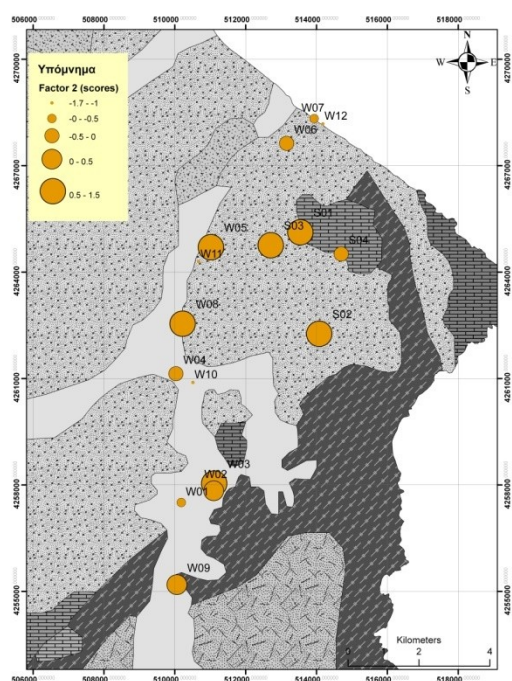
Ο τέταρτος παράγοντας εκφράζει την συσχέτιση μεταξύ ιχνοστοιχείων όπως το κοβάλτιο, το χαλκό και το μολυβδαίνιο. Η χωρική του κατανομή δείχνει την κυρίως έκφρασή του στο νότιο τμήμα της λεκάνης, με την πιο έντονη οικιστική και ανθρωπογενή δραστηριότητα. Παρά το γεγονός ότι οι συγκεντρώσεις των ιχνοστοιχείων είναι γενικά χαμηλές, ο παράγοντας αυτός υποδηλώνει ήπια ρύπανση στο νότιο τμήμα της περιοχής.



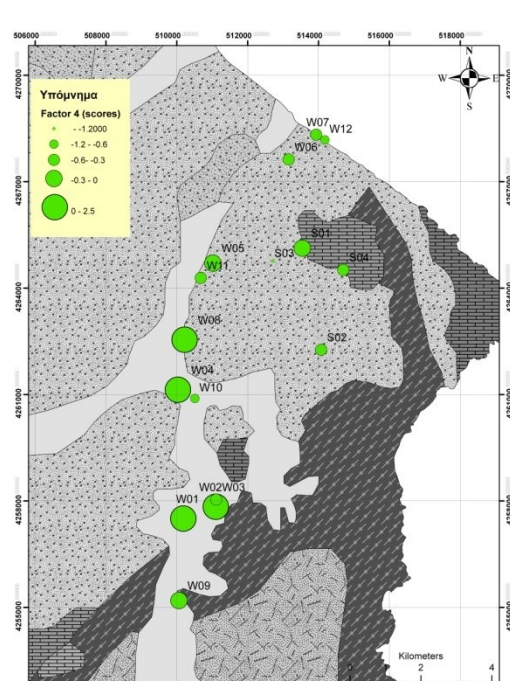
Εικόνα 8. Παράγοντας 1



Εικόνα 9. Παράγοντας 2



Εικόνα 10. Παράγοντας 3



Εικόνα 11. Παράγοντας 4

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα της υδρογεωλογικής και υδροχημικής έρευνας ανέδειξαν βασικά χαρακτηριστικά του προσχωματικού υδροφόρου της λεκάνης του ποταμού Νηλέα που θα πρέπει να προσμετρηθούν στον σχεδιασμό και την διαχείριση του ποτάμιου συστήματος.

Η ποιότητα του υπόγειου νερού επηρεάζεται κυρίως από την μεταβολή του γεωλογικού υποβάθρου, καθώς η περιοχή εκτείνεται τόσο σε τμήμα της Αττικοκυκλαδικής μάζας, όσο και της Πελαγονικής ζώνης στο βορινό του τμήμα. Σε

μικρότερο βαθμό επηρεάζεται από την τροφοδοσία του ελεύθερου υδροφόρου από το καρστικό σύστημα της Οχτωνιάς στα κατάντη του μετώπου των πηγών, ενώ το μεγαλύτερο μέρος των εκροών των πηγών φαίνεται να καταλήγουν απευθείας στην θάλασσα ακολουθώντας προνομιακή ροή μέσω κανονικών ρήγματων Β-ΒΑ διεύθυνσης (Τσερόλας, 2009).

Η υδροχημική έρευνα και η στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων με τη μέθοδο της παραγοντικής ανάλυσης ανέδειξε εστίες ρύπανσης του υδροφόρου. Παρουσία υψηλών συγκεντρώσεων νιτρικών τοπικής σημασίας σε διάφορα σημεία του ελεύθερου υδροφόρου αλλά και ευρύτερες εστίες που προέκυψαν μέσω της χωρικής κατανομής των αποτελεσμάτων της παραγοντικής ανάλυσης. Νοτιότερα τμήματα του υδροφόρου πλησίον οικιστικής ανάπτυξης επίσης φανερώνουν συσχετίσεις ανάμεσα σε ιχνοστοιχεία ανθρωπογενούς προέλευσης και ήπιας μορφής επιβάρυνση. Οι καρστικές πηγές φαίνεται να παρουσιάζουν μια γεωγενούς προέλευσης επιβάρυνση στα ιχνοστοιχεία λίθιο και βάριο, με χαμηλές ωστόσο συγκεντρώσεις, οι οποίες δεν υπερβαίνουν τις διεθνείς προδιαγραφές ποιότητας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Appelo C.A.J., Postma D., 1994. *Geochemistry, groundwater and pollution*. Balkema, Rotterdam, p.530
- Βαϊόπουλος Δ., Βασιλόπουλος Α., Ευελπίδου Ν., 2003. *Περιβαλλοντική και γεωμορφολογική μελέτη της νήσου Εύβοιας με την χρήση τηλεπισκόπησης και G.I.S.*
- Davis J.C., 2002. *Statistics and Data analysis in Geology*. Wiley, p.630
- Dorothy J. Vesper et al 2001., *Contaminant transport in karst aquifers*, Theoretical and Applied Karstology 13, (p.101-111)
- Jain C.K., Sharma M.K., 2001. *Distribution of trace metals in the Hindon River System, India*
- Kokkalas S., 2001. *Tectonic Evolution and stress field of the Kymi-Aliveri Basin, Evia island, Greece*
- Lambrakis N. et al, 2004. *The use of multicomponent statistical analysis in hydrogeological environmental research*, Water Research 38, (p.1862-1872)
- Παπαθεωδώρα Γ., 2009. *Σημειώσεις Μεθόδων Στατιστικής Ανάλυσης στις Επιστήμες της Γης-Παραγοντική Ανάλυση*. Πανεπιστήμιο Πατρών, σ.80.
- Τσερόλας Π., 2009. *Μελέτη υδρογεωλογικών συνθηκών της υδρολογικής λεκάνης του Ποταμού Νηλέα, Κ. Εύβοια*. Πτυχιακή εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, σ.86.
- Xypolias P., Skourlis K., Kokkalas S., 2002. *Upward extrusion and subsequent transpression as a possible mechanism for the exhumation of HP/LT rocks in Evia island, Greece*.



**ΑΚΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗ
ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ**

ΧΡΗΣΗ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΓΙΑ ΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΕΡΓΩΝ ΤΕΧΝΗΤΗΣ ΑΝΑΠΛΗΡΩΣΗΣ ΑΚΤΩΝ

Θεοφάνης Καραμπάς¹
Σπύρος Χριστόπουλος², Ιωάννης Αυγέρης²

¹Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ., 54124, Θεσσαλονίκη

²ΥΔΡΟΑΚΤΟΤΕΧΝΙΚΗ, Λ. Σοφού 20, 57001, Θέρμη

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται ένα ολοκληρωμένο μαθηματικό μοντέλο προσομοίωσης των παράκτιων μορφοδυναμικών διεργασιών που χρησιμοποιείται για το σχεδιασμό των έργων τεχνητής αναπλήρωσης των ακτών. Το υφιστάμενο μοντέλο σχεδιασμού έργων προστασίας ακτών HMAR-CPIM βελτιώνεται με την προσθήκη όρων εγκάρσιας κυματογενούς τρισδιάστατης κυκλοφορίας καθώς και επίδρασης της κυματικής ασυμμετρίας στην εγκάρσια στερεομεταφορά. Με τον τρόπο αυτό εκτός των πλευρικών μακροχρόνιων δισδιάστατων απωλειών άμμου, σε ένα έργο τεχνητής αναπλήρωσης ακτών, εκτιμάται και η εγκάρσια βραχυχρόνια εξέλιξη της βαθυμετρίας. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με υφιστάμενες μεθοδολογίες της διεθνούς βιβλιογραφίας καθώς και με πειραματικά δεδομένα.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Τεχνητή Ανάπλαση Ακτών, Μαθηματικά Μοντέλα, Προστασία Ακτών από Διάβρωση

USE OF MATHEMATICAL MODELS FOR THE DESIGN OF BEACH NOURISHMENT PROJECTS

Theophanis Karambas¹, Spiros Christopoulos², Ioannis Avgeris²

¹ School of Civil Engineering, 54124, Aristotle University of Thessaloniki, GREECE

²HYDROMARE, L. Sofou 20, 57001 Thessaloniki.

ABSTRACT

In the present paper an integrated mathematical model for the simulation of hydro-morphodynamical coastal processes for the design of beach nourishment projects, is presented. The model HMAR-CPIM for the design of coastal protection structures is extended to simulate quasi-3D wave-induced currents as well as wave asymmetry sediment transport rate due to wave motion. In this way, both profile (cross-shore) and planform (2DH) morphology evolution in a beach nourishment project is simulated. Model results are compared with existing methodologies as well as with experimental data.

KEY WORDS: Beach Nourishment, Numerical models, Coastal Protection from Erosion

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τις τελευταίες δεκαετίες ολοένα και περισσότερο χρησιμοποιούνται τα μαθηματικά μοντέλα Παράκτιας Μηχανικής για το σχεδιασμό έργων προστασίας των αμμωδών ακτών από τη διαβρωτική δράση των κυματισμών και των κυματογενών ρευμάτων. Τα αποτελέσματα των μοντέλων αφορούν στην ποσοτική ανάλυση-πρόβλεψη και την ακριβή περιγραφή των φυσικών διεργασιών του παράκτιου θαλάσσιου χώρου, συνεισφέροντας με τον τρόπο αυτό στο βέλτιστο σχεδιασμό των μεθόδων προστασίας ακτών. Τονίζεται ιδιαίτερα ότι, η μετάδοση των κυματισμών, η θραύση τους και η αναρρίχσή τους στις ακτές, η κυματογενής κυκλοφορία, η μεταφορά ίζημάτων και η εξέλιξη της μορφολογίας πυθμένα είναι πολύπλοκα φυσικά φαινόμενα, που θα πρέπει όμως να περιγραφούν με ακρίβεια. Ωστόσο, πολλά μοντέλα περιορίζονται σε δισδιάστατη περιγραφή των παράκτιων κυματογενών διεργασιών, με βάση τη γραμμική θεωρία κυματισμών αγνοώντας τρισδιάστατα φαινόμενα και την επίδραση της κυματικής ασυμμετρίας. Η προσέγγιση αυτή είναι αποδεκτή σε περιπτώσεις εκτίμησης μιας μέσης ετήσιας τάσης εξέλιξης μορφολογίας πυθμένα όπου οι βραχυχρόνιες εποχιακές διακυμάνσεις (διάβρωση τον χειμώνα και πρόσχωση το καλοκαίρι) αλληλοαναιρούνται. Στην περίπτωση όμως της τεχνητής ανάπλασης μιας ακτής, διαμορφώνεται ένα νέο προφίλ ακτής, με απότομη κλίση, ‘ξένο’ προς τα κυματικά χαρακτηριστικά της περιοχής. Οι εγκάρσιοι κυματισμοί θα διαμορφώσουν άμεσα ένα νέο προφίλ, το οποίο θα πρέπει να ληφθεί υπόψη στο σχεδιασμό. Απαιτείται λοιπόν, η προσομοίωση της εγκάρσιας τρισδιάστατης στερεομεταφοράς προς τα ανοιχτά, της καθαρά κυματογενούς στερεομεταφοράς λόγω της μη γραμμικότητας των κυματισμών, καθώς και των ιδιαίτερα πολύπλοκων διεργασιών στη ζώνη αναρρίχησης.

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται η επέκταση του μοντέλου σχεδιασμού έργων προστασίας ακτών HMAR-CPIM για την προσομοίωση της εγκάρσιας κυματογενούς τρισδιάστατης κυκλοφορίας καθώς και επίδρασης της κυματικής ασυμμετρίας στην εγκάρσια στερεομεταφορά. Με τον τρόπο αυτό εκτός των πλευρικών μακροχρόνιων δισδιάστατων απωλειών άμμου, σε ένα έργο τεχνητής αναπλήρωσης ακτών, εκτιμάται και η εγκάρσια βραχυχρόνια εξέλιξη της βαθυμετρίας. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με υφιστάμενες μεθοδολογίες της διεθνούς βιβλιογραφίας καθώς και με πειραματικά δεδομένα.

2. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ ΚΑΙ ΚΥΜΑΤΟΓΕΝΩΝ ΡΕΥΜΑΤΩΝ

Για τη μαθηματική προσομοίωση των παράκτιων κυματογενών διεργασιών γίνεται εφαρμογή του μοντέλου ολοκληρωμένης αντιμετώπισης προστασίας ακτών HMAR-CPIM (Καραμπάς και συν, 2011). Το μοντέλο αποτελείται από τρία επιμέρους υπο-μοντέλα, που προσομοιώνουν τη διαμόρφωση του κυματικού πεδίου στην παράκτια ζώνη, την ανάπτυξη των κυματογενών ρευμάτων και τη διαδικασία μεταφοράς των ιζημάτων και της τάσης εξέλιξης της μορφολογίας του πυθμένα.

2.1 ΜΟΝΤΕΛΟ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ HMAR_WAVEL

Οι υπερβολικής μορφής εξισώσεις ήπιας κλίσης γράφονται (Copeland, 1985α, Καραμπάς, 2004-κεφάλαιο 3, Καραμπάς και συν, 2011):

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{c}{c_g} \nabla \cdot \frac{c_g}{c} \mathbf{Q}_w = 0$$

$$\frac{\partial \mathbf{Q}_w}{\partial t} + \frac{c^2}{d} \nabla \eta = 0 \quad (2.1)$$

όπου η είναι η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας της θάλασσας λόγω του κυματισμού, d το βάθος της θάλασσας, $\mathbf{Q}_w = (U_w, V_w)$, όπου U_w και V_w είναι οι μέσες, ως προς το βάθος, οριζόντιες ταχύτητες κατά x και y , c η ταχύτητα διάδοσης του κυματισμού, $c=L/T$ (όπου L , T το μήκος κύματος και η περίοδος του κύματος αντίστοιχα) και c_g η ταχύτητα ομάδας κυματισμών.

Η απώλεια της ενέργειας λόγω θραύσης των κυματισμών στην ακτή ή πάνω στους κυματοθραύστες εισάγεται στο μοντέλο μέσω της προσομοίωσης των τάσεων Reynolds με τη θεώρηση τυρβώδη συντελεστή ιξώδους. Η απώλεια της ενέργειας λόγω τριβής πυθμένα προσομοιώνεται με τους γραμμικοποιημένους όρους στο δεξί μέρος των εξισώσεων της ορμής (Καραμπάς, 2004-κεφάλαιο 3). Οι παραπάνω εξισώσεις έχουν τη δυνατότητα περιγραφής της μετάδοσης των απλών αρμονικών γραμμικών κυματισμών σε οποιοδήποτε βάθος (συνδυασμός των φαινομένων της διάθλασης, περίθλασης, ανάκλασης και ρηχότητας).

2.2 ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΥΜΑΤΟΓΕΝΟΥΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ HMAR_WAVECIR

Οι εξισώσεις συνέχειας και ισορροπίας, για τον υπολογισμό του κυματογενούς ρεύματος, γράφονται (Καραμπάς, 2004- κεφάλαιο 4, Καραμπάς και συν, 2011):

$$\begin{aligned} \frac{\alpha_z}{a} + \frac{\partial(Uh)}{\partial x} + \frac{\partial(Vh)}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + g \frac{\alpha_z}{a} &= \\ -\frac{1}{\rho h} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} \left(v_h h \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \left(v_h h \frac{\partial U}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{bx}}{\rho h} & \\ \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + g \frac{\alpha_z}{a} &= \\ -\frac{1}{\rho h} \left(\frac{\partial S_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} \left(v_h h \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \left(v_h h \frac{\partial V}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{by}}{\rho h} & \end{aligned} \quad (2.2)$$

όπου ζ η ανύψωση της μέσης στάθμης θάλασσας και U και V είναι οι μέσες, ως προς το βάθος, οριζόντιες ταχύτητες του ρεύματος κατά x και y αντίστοιχα, h το συνολικό βάθος, $h=d+\zeta$, v_h είναι ένας συντελεστής τυρβώδους ιξώδους, S_{xx} , S_{yy} και S_{xy} είναι οι τάσεις ακτινοβολίας και τ_{bx} και τ_{by} οι διατμητικές τάσεις πυθμένα.

Περισσότερες λεπτομέρειες, σχετικά με τα παραπάνω μοντέλα, παρουσιάζονται στην εργασία των Καραμπά και συν (2011).

2.3 ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΤΕΡΕΟΜΕΤΑΦΟΡΑΣ HMAR_SEDTR

Η συνολική παροχή q_t του φορτίου φερτών υλών είναι το άθροισμα της παροχής δύο επιμέρους φορτίων, του φορτίου πυθμένα q_b και του φορτίου σε αιώρηση q_s :

$$q_t = q_b + q_s \quad (2.3)$$

Στην εργασία των Καραμπά και συν (2011) η το φορτίο πυθμένα q_b (ειδική παροχή όγκου φερτών) ως προς τις διευθύνσεις x και y υπολογίζεται από τις σχέσεις των Meyer-Peter και Müller:

$$\frac{\langle q_{bx} \rangle}{\sqrt{\Delta g d_{50}^3}} = 11 \langle |\theta| - \theta_{cr} \rangle^{1.65} \frac{\theta_x}{|\theta|} \quad \frac{\langle q_{by} \rangle}{\sqrt{\Delta g d_{50}^3}} = 11 \langle |\theta| - \theta_{cr} \rangle^{1.65} \frac{\theta_y}{|\theta|} \quad (2.4)$$

όπου τα σύμβολα $\langle \rangle$ δηλώνουν την ολοκλήρωση ως προς την περίοδο του κύματος, θ είναι η παράμετρος Shields, d_{50} είναι η χαρακτηριστική διάμετρος των κόκκων, Δ είναι η σχετική πυκνότητα, $\Delta = (\rho_s - \rho) / \rho$ (ρ_s είναι η πυκνότητα της άμμου και ρ η πυκνότητα του νερού) και θ_{cr} η κρίσιμη παράμετρος του Shields.

Η παράμετρος Shields θ υπολογίζεται από:

$$\theta_x = \frac{\tau_{bx}}{(\rho_s - \rho) g d_{50}} \quad \theta_y = \frac{\tau_{by}}{(\rho_s - \rho) g d_{50}} \quad |\theta| = \sqrt{\theta_x^2 + \theta_y^2} \quad (2.5)$$

Η μεταφορά φερτών σε αιώρηση q_s (ειδική παροχή όγκου φερτών) ως προς τις διευθύνσεις x και y , υπολογίζεται από:

$$q_{sx} = hUC \quad q_{sy} = hVC \quad (2.6)$$

όπου C η μέση ως προς την περίοδο και ως προς το βάθος συγκέντρωση του ιζήματος, η οποία υπολογίζεται από την αναλυτική λύση της εξίσωσης διάχυσης:

$$C = c_a \frac{D_v}{w_f} \exp\left(-\frac{w_f h}{D_v}\right) \quad (2.7)$$

όπου w_f είναι η ταχύτητα καθίζησης των κόκκων της άμμου, D_v ο συντελεστής τυρβώδους διάχυσης και c_a η συγκέντρωση στον πυθμένα $c_a = 0.49 \theta^{1.77} (d_{50} / (w_f T f_w))^{1.77}$.

Ο συντελεστής τυρβώδους διάχυσης D_v προσομοιώνει την τύρβη που παράγεται στον πυθμένα λόγω της τριβής και στην επιφάνεια λόγω της θραύσης και υπολογίζεται με βάση τα χαρακτηριστικά του θραυόμενου κυματισμού και του ρεύματος: $D_v = 0.1 h \sqrt{\tau_b / \rho} + 0.025 h (D / \rho)^{1/3}$ όπου τ_b η συνολική διατμητική τάση στον πυθμένα και D η απώλεια της ενέργειας λόγω της θραύσης των κυματισμών (Καραμπά και συν, 2011).

2.4. ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΤΕΡΕΟΜΕΤΑΦΟΡΑΣ – ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑΣ ΠΥΘΜΕΝΑ

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται οι παρακάτω τρεις επεμβάσεις στο υφιστάμενο μοντέλο HMAR_SEDTR (Καραμπά και συν., 2011):

- Προσομοίωση της επίδρασης της ασυμμετρίας των κυματισμών στη στερεομεταφορά
- Συνεκτίμηση της στερομεταφοράς λόγω του τρισδιάστατου κυματογενούς ρεύματος προς τα ανοιχτά (undertow)
- Υπολογισμός του ρυθμού ιζηματομεταφοράς στη ζώνη αναρρίχησης των κυματισμών για την προσομοίωση βραχυχρόνιων μεταβολών του προφίλ.

Η επίδραση της ασυμμετρίας των κυματισμών στη στερεομεταφορά στο ρυθμό ιζηματομεταφοράς q_w εκτιμάται σύμφωνα με τη βελτιωμένη από τον Leont'yev (1996) ενεργητική προσέγγιση του Bagnold (1963):

$$q_w = \frac{\varepsilon_b}{2 \tan \phi} f_w \left(\overline{u^3} \cos \theta + 3 \overline{u^2} U_d \right) \quad (2.8)$$

$$\frac{(\rho_s / \rho - 1) g}{}$$

όπου f_w ο συντελεστής τριβής πυθμένα, ϕ η εσωτερική γωνία τριβής της άμμου ($\tan \phi = 0.6$), θ η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού, ε_b ένας συντελεστής αποτελεσματικότητας της μεταφοράς φορτίου ($\varepsilon_b = 0.1$), ρ και ρ_s η πυκνότητα του νερού και του ιζήματος αντίστοιχα U_d η πυθμενική ταχύτητα του δευτερογενούς τρισδιάστατου κυματογενούς ρεύματος προς τα ανοιχτά (undertow) και $\overline{u^2}$ και $\overline{u^3}$ οι ροπές παλινδρομικής ταχύτητας.

Η πυθμενική ταχύτητα προς τα ανοικτά του δευτερογενούς ρεύματος (undertow) δίνεται από:

$$U_d = \frac{h}{\rho D_v} \left(\frac{A}{3} + \frac{1}{2} \frac{D}{h} \right) - 0.75 \frac{E \cos \theta}{\rho \sqrt{gh}} \quad \text{και}$$

$$A = \frac{1}{2} \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{E}{h} \cos^2 \theta \frac{\partial h}{\partial x} \quad (2.9)$$

όπου E είναι η ενέργεια των κυματισμών ανά μονάδα επιφανείας, θ η γωνία πρόσπτωσης των κυματισμών και D η απώλεια της ενέργειας λόγω της θραύσης των κυματισμών (Καραμπάς και συν, 2011).

Οι ροπές παλινδρομικής ταχύτητας $\overline{u^2}$ και $\overline{u^3}$ της (2.8) εισάγουν τη μη γραμμική φύση των κυματισμών και υπολογίζονται από τις ημι-εμπειρικές εξισώσεις που προκύπτουν κατά την ανάλυση της παλινδρομικής ταχύτητας σε δύο αρμονικές μεταβλητού εύρους και διαφοράς φάσης (Leont'yev, 1996):

$$\overline{u^2} = \frac{1}{2} u_m^2$$

$$\overline{u^3} = 1.8 \cdot 10^{-3} \frac{g T^2}{h} \frac{H}{h} \left(1 - \sqrt{Q_b} \right) u_m^3 \quad (2.9)$$

όπου u_m η μέγιστη ταχύτητα κύματος στον πυθμένα, T η περίοδος του κύματος και Q_b μια αδιάστατη παράμετρος που σχετίζεται με την πιθανότητα θραύσης των κυματισμών.

Η επίδραση του δευτερογενούς κυματογενούς ρεύματος (undertow) ενσωματώνεται στις (2.6):

$$q_{sx} = h(U + U_d)C \quad q_{sy} = hVC$$

(εάν θεωρήσουμε την x ως την εγκάρσια στην ακτή διεύθυνση)

Επίσης η τιμή της U_d συνυπολογίζεται και στην εκτίμηση των διατμητικών τάσεων για τον υπολογισμό της παραμέτρου Shields στις (2.5). Με τον τρόπο αυτό συμπεριλαμβάνεται και η επίδραση του τρισδιάστατου δευτερογενούς κυματογενούς ρεύματος στην προσομοίωση της στερεομεταφοράς ως φορτίο πυθμένα.

Ο μέγιστος ρυθμός ιζηματομεταφοράς στη ζώνη αναρρίχησης υπολογίζεται από τη σχέση (Leont'yev, 1996):

$$\hat{q}_R = \frac{0.02(2gR)^{3/2}(\tan\beta_{eq} - \tan\beta)}{(\rho_s/\rho - 1)g} \quad (2.10)$$

όπου R το ύψος αναρρίχησης του κύματος, $\tan\beta_{eq}$ η κλίση ισορροπίας του πυθμένα και $\tan\beta$ η κλίση της ακτής.

Η εκτίμηση της κλίσης ισορροπίας $\tan\beta_{eq}$, της κλίσης της ακτής $\tan\beta$ δίνονται από τον (Leont'yev, 1996). Στην ίδια εργασία παρουσιάζεται και η εξίσωση κατανομής της (2.10) ως προς x .

Οι ρυθμοί στερεομεταφοράς (2.8) και (2.10) προστίθενται στις στερεοπαροχές που υπολογίζονται από τις (2.4) και (2.6).

Οι μορφολογικές μεταβολές (ρυθμός μεταβολής της στάθμης του πυθμένα) στον παράκτιο χώρο υπολογίζονται επιλύοντας την εξίσωση διατήρησης του όγκου των φερτών:

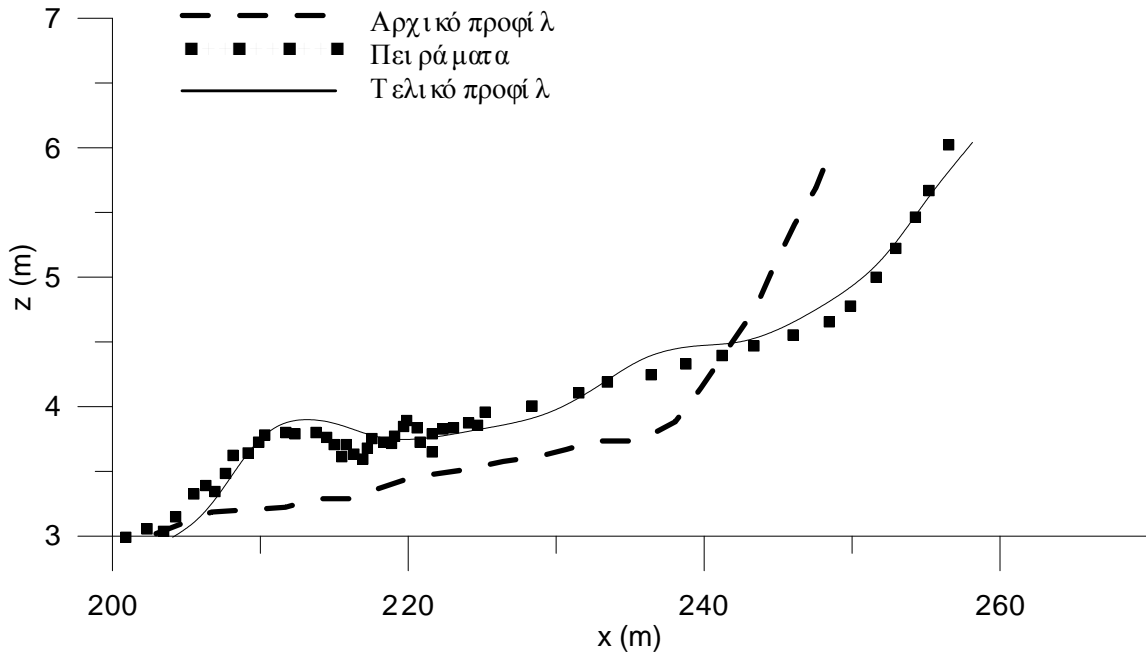
$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = -\frac{1}{(1-p)} \frac{\partial}{\partial x} \left(q_{xt} - 5|q_{tx}| \frac{\partial z_b}{\partial x} \right) - \frac{1}{(1-p)} \frac{\partial}{\partial y} \left(q_{yt} - 5|q_{yt}| \frac{\partial z_b}{\partial y} \right) \quad (2.11)$$

όπου z_b είναι η μεταβολή του βάθους του νερού, p το πορώδες της άμμου ($p \approx 0.4$) και q_{tx} , q_{ty} είναι οι συνολικές στερεοπαροχές κάθετα (άξονας x) και παράλληλα (άξονας y) στην ακτή ($q_{tx} = q_{bx} + q_{sx}$, $q_{ty} = q_{by} + q_{sy}$).

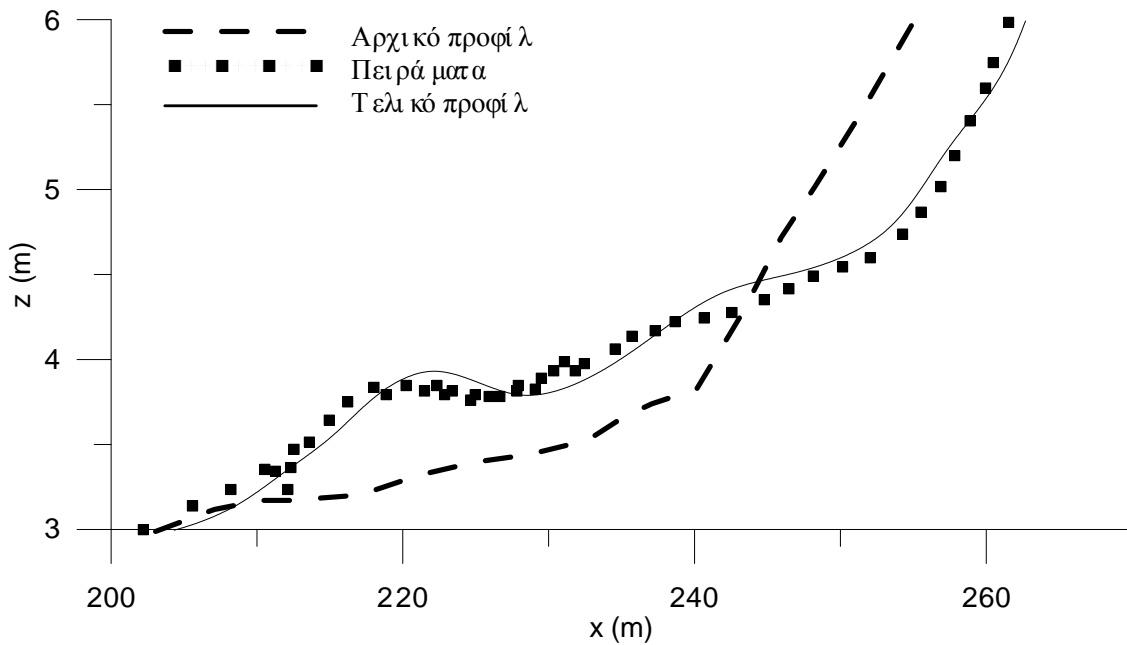
3. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ

Στα πλαίσια του προγράμματος της ΕΕ SAFE, πραγματοποιήθηκαν πειράματα μεγάλης κλίμακας στο Large Wave Flume του Ανοβέρου με σκοπό τη συνεισφορά στη μελέτη της μεθόδου τεχνητής αναπλήρωσης (Dette et al. 1998). Στα πειράματα αυτά ως αρχικό προφίλ διαμορφώθηκε το θεωρητικό προφίλ ισορροπίας του Bruun, ($d = 0.12x^{2/3}$, x είναι η απόσταση από την ακτογραμμή) κάτω από τη στάθμη της θάλασσας, ενώ διαμορφώθηκαν διαφορετικές κλίσεις ακτής στη ζώνη αναρρίχησης. Η μέση διάμετρος κόκκων ήταν $d_{50} = 0.3$ mm. Στην παρούσα εργασία αναπαράγονται τρία τεστ: Test C2 (με κλίση ακτής στη ζώνη αναρρίχησης 1:5), Test B2 (κλίση 1:10) και Test F1 (κλίση 1:3) κάτω από τις παρακάτω κυματικές συνθήκες: προσπίπτον φάσμα TMA με ύψος κύματος $H_{m0} = 1.20$ m και περίοδο $T_{m0} = 5$ s.

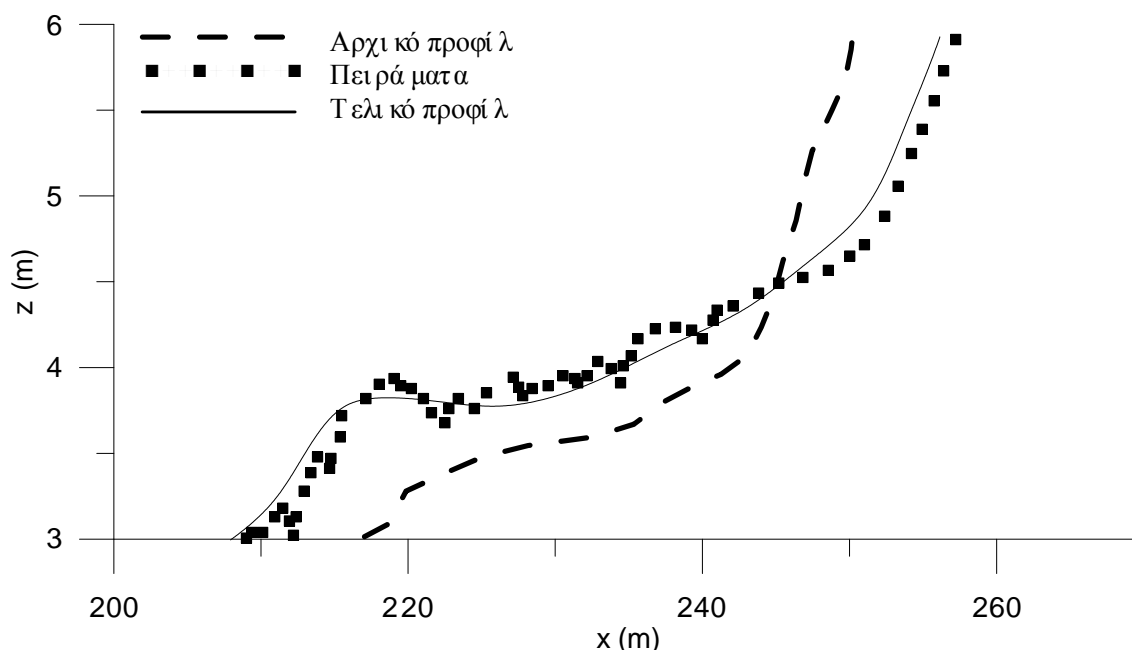
Στα Σχήματα 1, 2 και 3 παρουσιάζονται οι συγκρίσεις των πειραμάτων με τα αποτελέσματα του μοντέλου. Η σύγκριση είναι ικανοποιητική τόσο στη ζώνη θραύσης όσο και στη ζώνη αναρρίχησης.



Σχήμα 1. Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου και πειραμάτων των Dette et al. (1998), Test C2.



Σχήμα 2. Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου και πειραμάτων των Dette et al. (1998), Test B2.



Σχήμα 3. Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου και πειραμάτων των Dette et al. (1998), Test F1.

4. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΔΙΑΤΟΜΩΝ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ ΕΒΡ (EQUILIBRIUM BEACH PROFILES)

Η μέθοδος αυτή (Dean, 2002) βασίζεται στην εκτίμηση του όγκου του υλικού που χρησιμοποιείται ώστε να επιτευχθεί το επιθυμητό πλάτος παραλίας και περιλαμβάνει τις θαλάσσιες διεργασίες οι οποίες διαμορφώνουν το προφίλ της ακτογραμμής πριν και μετά την αναπλήρωση της ακτής σε συνδυασμό με την χαρακτηριστική διάμετρο κόκκου του ιζήματος.

Η εξίσωση που υπολογίζει το νέο προφίλ ισορροπίας που διαμορφώνουν οι κυματισμοί είναι (κανόνας '2/3'):

$$d = Ax^{2/3} \quad (4.1)$$

όπου d = βάθος νερού, A είναι η παράμετρος που σχετίζεται με το μέγεθος του κόκκου και x είναι η απόσταση από την ακτογραμμή.

Η σχέση μεταξύ της παραμέτρου A και της χαρακτηριστικής διαμέτρου d_{50} του κόκκου της άμμου δίνεται από τον Dean (2002).

Σύμφωνα με τη μέθοδο EMP διακρίνονται κυρίως δύο καταστάσεις ισορροπίας:

1. Τεμνόμενα προφίλ (Intersecting profiles)
2. Μη-τεμνόμενα προφίλ (Non-intersecting profiles)

Στην πρώτη κατάσταση ισορροπίας, το υλικό αναπλήρωσης έχει μεγαλύτερη διάμετρο κόκκου από το υπάρχον ($A_F > A_N$) ενώ στη δεύτερη ίση ή μικρότερη ($A_F \leq A_N$). Ο δείκτης F αναφέρεται στο υλικό αναπλήρωσης (Fill) ενώ ο δείκτης N στο υπάρχον (Native).

Για τις δύο διαφορετικές καταστάσεις ισορροπίας ο όγκος υλικού αναπλήρωσης V δίνεται από:

α. Τεμνόμενα προφίλ (Intersecting profiles) $A_N < A_F$

$$V' = \frac{V}{BW_*} = \Delta y' + \frac{3h_*}{5B'} (\Delta y')^{5/3} \frac{1}{\left[1 - \left(\frac{A_N}{A_F}\right)^{3/2}\right]^{2/3}} \quad (4.2)$$

β. Μη-τεμνόμενα προφίλ (Non-intersecting profiles) $A_N \geq A_F$

$$V' = \frac{V}{BW_*} = \Delta y' + \frac{3h_*}{5B'} \left\{ \left[\Delta y' + \left(\frac{A_N}{A_F}\right)^{3/2} \right]^{5/3} - \left(\frac{A_N}{A_F}\right)^{3/2} \right\} \quad (4.3)$$

όπου B το ύψος του παραλιακού αναβαθμού (berm) και h_* το βάθος 'κλεισίματος' (δηλαδή το βάθος που αντιστοιχεί στο θαλάσσιο όριο των διακυμάνσεων του ενεργού προφίλ) και

$$W_* = \left(\frac{h_*}{A_N}\right)^{2/3}, \quad \Delta y'_o = \frac{\Delta y_o}{W_*}, \quad B' = B/h_* \quad (4.4)$$

όπου Δy_o είναι η θέση της ακτογραμμής μετά τη διαδικασία διάβρωσης.

Το αδιάστατο απαιτούμενο αρχικό πλάτος παραλίας $\Delta y'$ δίνεται από τις σχέσεις:

$$\Delta y'_1 = y'_1 - \left(\frac{h_*}{mW_*}\right) y_1^{2/3} \quad (4.5)$$

$$\Psi' = y'_1 - \left(\frac{h_*}{mW_*}\right) y_1^{2/3} + \frac{3h_*}{5B'} y_1^{5/3} - \frac{h_*}{2B} \left(\frac{h_*}{mW_*}\right) y_1^{4/3} \quad (4.6)$$

όπου m η αρχική κλίση που διαμορφώνεται και y'_1 η αδιάστατη απόσταση από την αρχική ακτογραμμή έως τον πόδα του όγκου αναπλήρωσης.

Η μέθοδος εφαρμόστηκε για τα παρακάτω κυματικά χαρακτηριστικά: ύψος κύματος στα βαθιά νερά $H_o = 1$ m, περίοδος $T = 6$ s, ύψος παραλιακού αναβαθμού $B = 1.5$ m, αρχική κλίση που διαμορφώνεται $1/6.667$. Η βυθομετρική αποτύπωση του προφίλ της ακτής έδειξε ότι ακολουθεί τον κανόνα '2/3' της σχέσης (4.1), με συντελεστή A , $A_N = 0.12$. Το χωρικό βήμα ήταν $\Delta x = 1.25$ m και το χρονικό $\Delta t = 0.0125$ s. Το μοντέλο εφαρμόστηκε τόσο χρονικό διάστημα όσο απαιτείται να επέλθει κατάσταση ισορροπίας (της τάξεως των 6 ωρών).

Τα αποτελέσματα της μεθόδου βρίσκονται σε συμφωνία, αν και όχι πολύ ικανοποιητική, δεδομένου της διαφορετικής προσέγγισης του προβλήματος.

Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μεθόδου EMP σε σύγκριση με τα αποτελέσματα του μαθηματικού μοντέλου.

Πίνακας 1. Αποτελέσματα μεθόδου EMP και σύγκριση με τα αποτελέσματα του μαθηματικού μοντέλου.

Διάμετρος κόκκων d_{50} (mm)	Απαιτούμενος όγκος υλικού αναπλήρωσης V (m^3/m)	Αρχικό πλάτος παραλίας (m)	Τελικό πλάτος παραλίας (m)	Διάβρωση μεθόδου EMP (m)	Διάβρωση Μαθηματικού Μοντέλου (m)
0.4	43	19.9	15	4.9	3.9
0.3	58	25.4	15	10.4	8.9
0.6	35	16.6	15	1.6	2.5

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η χρήση του βελτιωμένου μαθηματικού μοντέλου HMAR-CPIM, όπου προσομοιώνεται η εγκάρσια κυματογενής τρισδιάστατη κυκλοφορία καθώς και η επίδραση της κυματικής ασυμμετρίας στην εγκάρσια στερεομεταφορά, δίνει τη δυνατότητα εκτίμησης της εγκάρσιας βραχυχρόνιας εξέλιξης της βαθυμετρίας σε ένα έργο τεχνητής αναπλήρωσης ακτών. Τα αποτελέσματα του βελτιωμένου μοντέλου συγκρίνονται ικανοποιητικά με υφιστάμενες μεθοδολογίες της διεθνούς βιβλιογραφίας καθώς και με πειραματικά δεδομένα. Με τον τρόπο αυτό δίνεται η δυνατότητα στο μηχανικό μελετητή παράκτιων τεχνικών έργων να προσομοιώνει τις μορφοδυναμικές μεταβολές, με σκοπό την επίτευξη μιας βέλτιστης λύσης στο σχεδιασμό έργων και μεθόδων ανάπλασης και προστασίας ακτών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Bagnold, R.A., 1963. *Mechanics of marine sedimentation*. The sea (M. N. Hill, ed.), New York, pp. 507-528.
- Copeland, G.J.M., 1985a. *A practical alternative to the «mild-slope» wave equation*. Coastal Engineering, 9, pp. 125-149.
- Copeland, G.J.M., 1985b. *Practical radiation stress calculations connected with equations of wave propagation*. Coastal Engineering, 9, pp. 195-219.
- Dean, R.G., 2002. *Beach Nourishment: Theory and Practice, Advanced Series on Ocean Engineering*, World Scientific.
- Dette, H.H., Peters, K., and Newe, J., 1998. *Large wave flume experiment '96/97, MAST III – SAFE Project, Report No. 825*.
- Leont'yev, I.O., 1996. *Numerical modelling of beach erosion during storm event*, Coastal Engineering, 29 (1-2):187-200.
- Καραμπάς, Θ., 2004. *Υπολογιστική κυματομηχανική και ακτομηχανική – Θεωρητική προσέγγιση εκπαιδευτικό & επιχειρησιακό λογισμικό*, Τμήμα Επιστημών της Θάλασσας, Παν. Αιγαίου, Μυτιλήνη.
- Καραμπάς, Θ., Χριστόπουλος, Σ., και Αυγέρης, Ι., 2011. *Ολοκληρωμένο μαθηματικό μοντέλο για το σχεδιασμό έργων προστασίας ακτών (HMAR-CPIM)*, 5^ο Παν. Συνέδριο Διαχείρισης και Βελτίωσης Παράκτιων Ζωνών, Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- Κουτίτας, Χ., 1985. *Μαθηματικά ομοιώματα στην Παράκτια Μηχανική*, Θεσσαλονίκη.

**ΔΙΑΔΟΣΗ ΘΡΑΥΟΜΕΝΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ ΠΑΝΩ ΑΠΟ ΕΠΙΠΕΔΟ
ΠΥΘΜΕΝΑ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΚΛΙΣΗΣ ΜΕΣΩ ΜΕΘΟΔΟΥ
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΜΕΓΑΛΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ**

Γεράσιμος Κολοκυθάς*, Αθανάσιος Δήμας

Εργαστήριο Υδραυλικής Μηχανικής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Πατρών, 26500 Πάτρα

*Στοιχεία επικοινωνίας: gkolokithas@upatras.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται οι αριθμητικές προσομοιώσεις τρισδιάστατης, συνεκτικής, τυρβώδους ροής με ελεύθερη επιφάνεια, η οποία προκύπτει από τη διάδοση και θραύση μη-γραμμικών κυμάτων πάνω από επίπεδο πυθμένα σταθερής κλίσης. Βασικός στόχος της εργασίας είναι η ενδελεχής διερεύνηση του φαινομένου της θραύσης (εκχείλισης) και των συνεπαγόμενων κυματογενών ρευμάτων, κάνοντας χρήση της μεθόδου προσομοίωσης μεγάλων κυμάτων (LWS). Η μεθοδολογία LWS στηρίζεται στο διαχωρισμό των κλιμάκων της ταχύτητας και της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας σε πλήρως επιλυόμενες και σε υποπλεγματικές κλίμακες, για τις οποίες εφαρμόζεται μοντέλο τάσεων, αντίστοιχο της μεθόδου των μεγάλων δινών (LES). Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του μοντέλου με σχετικά αποτελέσματα πειραματικών μετρήσεων προκύπτει ότι, σε γενικές γραμμές, οι προβλέψεις του είναι επαρκείς όσον αφορά τα χαρακτηριστικά της θραύσης - βάθος και ύψος - και τη μείωση του ύψους κύματος στη ζώνη απόσβεσης.

**LARGE-WAVE SIMULATION OF BREAKING WAVE
PROPAGATION OVER CONSTANT SLOPE BED**

Gerasimos Kolokythas*, Athanassios Dimas

Laboratory of Hydraulic Engineering, Department of Civil Engineering,
University of Patras, 26500 Patras

*Corresponding author: gkolokithas@upatras.gr

ABSTRACT

In the present study, the three-dimensional, incompressible, turbulent, free-surface flow, developing by the propagation of nonlinear breaking waves over a constant slope, rigid bed is numerically simulated. The main objective is to investigate in depth, the process of spilling wave breaking and the characteristics of the developing undertow current employing the Large-Wave Simulation (LWS) method. According to LWS methodology, large velocity and free-surface scales are fully resolved, and subgrid scales are treated by an eddy viscosity model, similar to Large-Eddy Simulation (LES) methodology. The comparison of present numerical results to corresponding experimental results of other researchers, indicate that the numerical model predicts adequately the wave breaking parameters - breaking height and depth - and the wave dissipation in the surf zone.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα θαλάσσια κύματα στην παράκτια ζώνη βρίσκονται σε διαρκή αλληλεπίδραση με τον πυθμένα, με αποτέλεσμα την εμφάνιση μιας σειράς σημαντικών διεργασιών, όπως η θραύση των κυμάτων, η δημιουργία κυματογενών ρευμάτων και η μεταφορά ιζήματος. Η θραύση των κυμάτων συμβαίνει όταν το ύψος ή/και η παραμόρφωση του κύματος υπερβούν κάποιες κρίσιμες τιμές, καθώς το βάθος του νερού μειώνεται. Οι βασικές κατηγορίες θραύσης είναι τρεις: η θραύση εκχείλισης, εκτίναξης και εφόρμησης. Η ταξινόμηση τους γίνεται με βάση τον αριθμό Iribarren, οποίος εξαρτάται από την κλίση του πυθμένα και την κυρτότητα του κύματος. Πρακτικά, η θραύση εκχείλισης απαντάται σε πυθμένες ήπιας κλίσης, η θραύση εκτίναξης σε μέτριας και απότομης κλίσης, ενώ η θραύση εφόρμησης σε περιπτώσεις πολύ απότομων κλίσεων. Όσον αφορά τη θραύση εκχείλισης, αυτή χαρακτηρίζεται από τη δημιουργία του αποκαλούμενου επιφανειακού στροβίλου στο μέτωπο του θραυόμενου κύματος, αμέσως μετά την έναρξη του φαινομένου.

Η θραύση του κύματος είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την εμφάνιση κυματογενών ρευμάτων, ενός παράλληλου στην ακτογραμμή, το οποίο εμφανίζεται όταν η κατεύθυνση διάδοσης του θραυόμενου κύματος είναι μη-κάθετη στην ακτογραμμή, και ενός εγκάρσιου στην ακτογραμμή, το οποίο είναι γνωστό ως υποβρύχιο κυματογενές ρεύμα. Τα ρεύματα αυτά αναπτύσσονται εντός της ζώνης απόσβεσης, δηλαδή της περιοχής στην οποία αποσβένεται η ενέργεια του θραυόμενου κύματος. Το υποβρύχιο ρεύμα οφείλει την ύπαρξη του στο πεδίο διατμητικής τάσης που αναπτύσσεται στη ζώνη απόσβεσης, προκειμένου να ισορροπήσει τη βαθμίδα της πίεσης και τη μεταβολή της παροχής ορμής, εξαιτίας της κυματογενούς ανύψωσης και της μείωσης του ύψους κύματος. Η κατεύθυνσή του ρεύματος κοντά στον πυθμένα είναι προς τα βαθιά, ενώ κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια είναι προς την ακτή, εξασφαλίζοντας ότι η συνολική παροχή ρευστού σε κάθε κατακόρυφη διατομή θα είναι μηδενική.

Το φαινόμενο της θραύσης κυμάτων στην παράκτια ζώνη έχει αποτελέσει αντικείμενο πολλών ερευνητών, οι οποίοι το προσέγγισαν, είτε με την ανάπτυξη αριθμητικών μοντέλων, είτε μέσω εργαστηριακών πειραμάτων. Οι Dimas & Dimakopoulos (2009) ανέπτυξαν αριθμητικό μοντέλο προσομοίωσης της θραύσης (εκχείλισης) κυμάτων το οποίο ενσωματώθηκε σε κώδικα προσομοίωσης δισδιάστατης μη-συνεκτικής ροής με ελεύθερη επιφάνεια που δημιουργείται από τη διάδοση κυμάτων πάνω από πυθμένα σταθερής κλίσης. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων τους με σχετικά πειραματικά αποτελέσματα (Ting & Kirby, 1994) δείχνει ότι με κατάλληλη επιλογή κάποιων παραμέτρων το μοντέλο προβλέπει αρκετά ικανοποιητικά τα χαρακτηριστικά της θραύσης. Πιο πρόσφατα, προκειμένου να μελετήσουν την τυρβώδη ροή που δημιουργείται από τη θραύση κυμάτων πάνω από πυθμένα σταθερής κλίσης, οι Dimakopoulos & Dimas (2011), έκαναν χρήση της μεθόδου προσομοίωσης μεγάλων κυμάτων (LWS) σε σύζευξη με τον κώδικα μη-συνεκτικής ροής (Dimas & Dimakopoulos, 2009) για την περίπτωση τρισδιάστατου πεδίου ροής. Τα αποτελέσματα έδειξαν ικανοποιητική συμφωνία με τις αντίστοιχες πειραματικές μετρήσεις (Ting & Kirby, 1994, 1996), οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση του μοντέλου.

Καινοτομία της παρούσας εργασίας αποτελεί η σύζευξη της μεθόδου προσομοίωσης LWS (Dimas & Fialkowski, 2000) με κώδικα αριθμητικής επίλυσης τρισδιάστατης συνεκτικής ροής, ώστε να δοθεί η δυνατότητα υπολογισμού των κυματογενών ρευμάτων, στον οποίο συνεισφέρει ουσιαστικά η παρουσία της διατμητικής τάσης στον πυθμένα. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται αριθμητικές προσομοιώσεις τρισδιάστατης ροής με ελεύθερη επιφάνεια, η οποία προκύπτει από τη διάδοση και θραύση μη-γραμμικών κυμάτων, εγκάρσια στην ακτογραμμή, πάνω από πυθμένα σταθερής κλίσης. Η μεθοδολογία LWS βασίζεται στο διαχωρισμό των κλιμάκων των μεταβλητών της ροής (ταχύτητα, πίεση και ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας) σε επιλυόμενες και υποπλεγματικές (SGS) κλίμακες. Κύριος σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η αντιμετώπιση των μειονεκτημάτων των προαναφερόμενων

εργασιών, στις οποίες γίνεται θεώρηση μη-συνεκτικής ροής. Σε πρώτη φάση, δηλαδή για την περίπτωση διάδοσης κάθετα στην ακτογραμμή, το σημαντικότερο από αυτά είναι η σωστή αποτύπωση του προφίλ του υποβρύχιου ρεύματος. Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζονται κατά σειρά οι εξισώσεις που διέπουν τη ροή, τα κυριότερα στοιχεία της μεθοδολογίας LWS, η αριθμητική μέθοδος, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και τα κυριότερα συμπεράσματα.

2. ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΡΟΗΣ

Η τρισδιάστατη, ασυμπίεστη ροή ελεύθερης επιφάνειας, για ρευστό σταθερής συνεκτικότητας, διέπεται από την εξίσωση συνέχειας

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.1)$$

και τις εξισώσεις Navier-Stokes

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\text{Re}_d} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (2.2)$$

όπου $i, j = 1, 2, 3$, t είναι ο χρόνος, x_1, x_2 οι οριζόντιες συντεταγμένες, x_3 η κατακόρυφη συντεταγμένη, u_1, u_2, u_3 οι συνιστώσες της ταχύτητας, p η δυναμική πίεση και Re_d ο αριθμός Reynolds. Οι εξισώσεις (2.1) και (2.2) εκφράζονται σε αδιάστατη μορφή με παραμέτρους αδιαστατοποίησης το βάθος εισόδου d_i , την επιτάχυνση της βαρύτητας g και την πυκνότητα του ρευστού ρ , επομένως $\text{Re}_d = (gd_i)^{1/2} d_i / \nu$, όπου ν είναι το κινηματικό ιξώδες του ρευστού.

Η κινηματική και η δυναμική συνθήκη ορθής τάσης στην ελεύθερη επιφάνεια, αντίστοιχα, είναι

$$u_3 = \frac{d\eta}{dt} = \frac{\partial \eta}{\partial t} + u_1 \frac{\partial \eta}{\partial x_1} + u_2 \frac{\partial \eta}{\partial x_2} \quad (2.3)$$

$$p - \frac{\eta}{\text{Fr}^2} - \frac{2}{\text{Re}_d} \left[\frac{\partial u_3}{\partial x_3} - \frac{1}{2} \frac{\partial \eta}{\partial x_1} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_1} \right) - \frac{1}{2} \frac{\partial \eta}{\partial x_2} \left(\frac{\partial u_2}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_2} \right) \right] = 0 \quad (2.4)$$

όπου η είναι η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας και Fr είναι ο αριθμός Froude, ο οποίος σύμφωνα με την αδιαστατοποιημένη διατύπωση των εξισώσεων ισούται με τη μονάδα, ενώ στην (2.4) έχει θεωρηθεί μηδενική ατμοσφαιρική πίεση. Η δυναμική συνθήκη, με την οποία επιβάλλεται ο μηδενισμός των διατμητικών τάσεων στην ελεύθερη επιφάνεια, εκφράζεται για καθεμία από τις οριζόντιες διευθύνσεις x_1 και x_2 , αντίστοιχα, ως εξής

$$2 \frac{\partial \eta}{\partial x_1} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_1} - \frac{\partial u_3}{\partial x_3} \right) + \frac{\partial \eta}{\partial x_2} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_1} \right) - \left[1 - \left(\frac{\partial \eta}{\partial x_1} \right)^2 \right] \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial \eta}{\partial x_1} \frac{\partial \eta}{\partial x_2} \left(\frac{\partial u_2}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_2} \right) = 0 \quad (2.5)$$

$$2 \frac{\partial \eta}{\partial x_2} \left(\frac{\partial u_2}{\partial x_2} - \frac{\partial u_3}{\partial x_3} \right) + \frac{\partial \eta}{\partial x_1} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_1} \right) - \left[1 - \left(\frac{\partial \eta}{\partial x_2} \right)^2 \right] \left(\frac{\partial u_2}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_2} \right) + \frac{\partial \eta}{\partial x_1} \frac{\partial \eta}{\partial x_2} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_1} \right) = 0 \quad (2.6)$$

Επιπλέον, η συνθήκη μη-ολίσθησης πυθμένα για τις οριζόντιες διευθύνσεις x_1 και x_2 , καθώς και η συνθήκη μη-διαπέρατοτητας είναι, αντίστοιχα

$$u_1 - u_3 \frac{\partial d}{\partial x_1} = 0, \quad u_2 - u_3 \frac{\partial d}{\partial x_2} = 0 \quad (2.7)$$

$$u_3 + u_1 \frac{\partial d}{\partial x_1} + u_2 \frac{\partial d}{\partial x_2} = 0 \quad (2.8)$$

όπου d είναι το βάθος πυθμένα μετρημένο από την αδιατάρακτη στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας.

Οι καρτεσιανές συντεταγμένες μετασχηματίζονται, ώστε το υπολογιστικό πεδίο ροής να γίνει ανεξάρτητο του χρόνου, σύμφωνα με τις εξής εκφράσεις

$$s_1 = x_1, \quad s_2 = x_2 \quad \text{και} \quad s_3 = \frac{2x_3 + d - \eta}{d + \eta} \quad (2.9)$$

όπου στο μετασχηματισμένο πεδίο, η ελεύθερη επιφάνεια αντιστοιχεί σε $s_3 = 1$ και ο πυθμένας σε $s_3 = -1$. Με εφαρμογή της (2.9), οι εξισώσεις συνέχειας και Navier-Stokes (2.1) και (2.2) μετασχηματίζονται, αντίστοιχα, στις

$$\frac{\partial u_k}{\partial s_k} + \frac{2}{d + \eta} \left(\frac{\partial u_3}{\partial s_3} - r_k \frac{\partial u_k}{\partial s_3} \right) = 0 \quad (2.10)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_i}{\partial t} - \frac{1 + s_3}{d + \eta} \frac{\partial \eta}{\partial t} \frac{\partial u_i}{\partial s_3} + u_k \frac{\partial u_i}{\partial s_k} + \frac{2}{d + \eta} \left(u_3 \frac{\partial u_i}{\partial s_3} - r_k u_k \frac{\partial u_i}{\partial s_3} \right) = \\ R_i + \frac{1}{\text{Re}_d} \left[\frac{\partial^2 u_i}{\partial s_k \partial s_k} + \frac{4(r_k^2 + 1)}{(d + \eta)^2} \frac{\partial^2 u_i}{\partial s_3^2} + V_i \right] \end{aligned} \quad (2.11)$$

όπου, εφεξής, $k=1,2$ και

$$R_k = -\frac{\partial p}{\partial s_k} + \frac{2}{d + \eta} r_k \frac{\partial p}{\partial s_3}, \quad R_3 = -\frac{2}{d + \eta} \frac{\partial p}{\partial s_3} \quad (2.12)$$

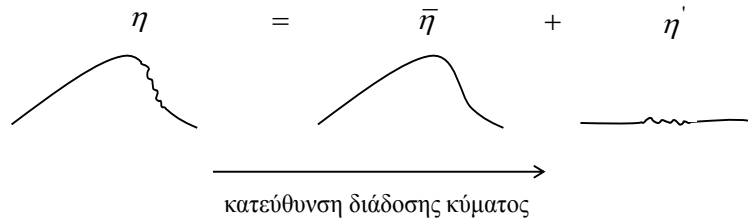
$$V_i = -\frac{2}{d + \eta} \left\{ 2r_k \frac{\partial^2 u_i}{\partial s_k \partial s_3} + \left[\frac{\partial r_k}{\partial s_k} - \frac{2}{(d + \eta)} r_k \frac{\partial r_k}{\partial s_3} \right] \frac{\partial u_i}{\partial s_3} \right\} \quad (2.13)$$

$$r_k = \frac{1 + s_3}{2} \frac{\partial \eta}{\partial s_k} - \frac{1 - s_3}{2} \frac{\partial d}{\partial s_k} \quad (2.14)$$

3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ LWS

Όπως προαναφέρθηκε, με τη μέθοδο προσομοίωσης μεγάλων κυμάτων (LWS) επιτυγχάνεται ο διαχωρισμός των κλιμάκων της ροής σε επιλυόμενες και μη επιλυόμενες, ο

οποίος στηρίζεται στην εφαρμογή ενός χωρικού φίλτρου στις ταχύτητες, στην πίεση και στην ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας. Κατά συνέπεια, κάθε μεταβλητή της ροής, f , εκφράζεται ως το άθροισμα του επιλυόμενου, \bar{f} , και του υποπλεγματού τμήματος της, f' , όπως π.χ. φαίνεται στο Σχήμα 1 κατά το διαχωρισμό της ανύψωσης η . Το φιλτράρισμα της τελευταίας μεταβλητής αποτελεί και το σημείο διαφοροποίησης της μεθόδου LWS σε σχέση με τη μέθοδο LES.



Σχήμα 1: Διαχωρισμός των κλιμάκων ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας κατά τη θραύση εκχείλισης.

Οι εξισώσεις συνέχειας και Navier-Stokes για τις επιλυόμενες κλίμακες της ροής, προκύπτουν από τη διαδικασία του φιλτραρίσματος στις (2.10) και (2.11), και είναι, αντίστοιχα

$$\frac{\partial \bar{u}_k}{\partial s_k} + \frac{2}{d + \bar{\eta}} \left(\frac{\partial \bar{u}_3}{\partial s_3} - \bar{r}_k \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial s_3} \right) = 0 \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} - \frac{1 + s_3}{d + \bar{\eta}} \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial t} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial s_3} + \bar{u}_k \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial s_k} + \frac{2}{d + \bar{\eta}} \left(\bar{u}_3 \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial s_3} - \bar{r}_k \bar{u}_k \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial s_3} \right) = \\ \bar{R}_i + \frac{1}{\text{Re}_d} \left[\frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial s_k \partial s_k} + \frac{4(\bar{r}_k^2 + 1)}{(d + \bar{\eta})^2} \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial s_3^2} + \bar{V}_i \right] + \bar{T}_i \end{aligned} \quad (3.2)$$

όπου

$$\bar{T}_i = - \frac{\partial \tau_{ik}}{\partial s_k} - \frac{2}{d + \bar{\eta}} \frac{\partial \tau_{i3}}{\partial s_3} + \frac{1 + s_3}{d + \bar{\eta}} \frac{\partial \tau_{i3}^\eta}{\partial s_3} - \frac{1 - s_3}{d + \bar{\eta}} \frac{\partial \tau_{ik}}{\partial s_3} \frac{\partial d}{\partial s_k} \quad (3.3)$$

και περιλαμβάνει όλους τους όρους των υποπλεγματού (SGS) τάσεων, δηλαδή τις τάσεις δίνης και της τάσεις κύματος, οι οποίες, αντίστοιχα, είναι

$$\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (3.4)$$

$$\tau_{i3}^\eta = \overline{u_i u_k} \frac{\partial \eta}{\partial s_k} - \bar{u}_i \bar{u}_k \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial s_k} + \overline{u_i} \frac{\partial \eta}{\partial t} - \bar{u}_i \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial t} + \bar{p} \frac{\partial \eta}{\partial s_i} - \bar{p} \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial s_i} \quad (3.5)$$

Οι SGS τάσεις δίνης εμφανίζονται ακριβώς όπως και στη μεθοδολογία LES, σε αντίθεση με τις αντίστοιχες τάσεις κύματος, οι οποίες εμφανίζονται αποκλειστικά στη μεθοδολογία LWS.

Εφαρμόζοντας τον μετασχηματισμό (2.9) στις οριακές συνθήκες (2.3) - (2.8) για την ελεύθερη επιφάνεια ($s_3 = 1$) και τον πυθμένα ($s_3 = -1$) και στη συνέχεια τη διαδικασία

φιλτραρίσματος με τις προαναφερόμενες απλοποιητικές παραδοχές, προκύπτουν οι αντίστοιχες μετασχηματισμένες οριακές συνθήκες για τις επιλυόμενες κλίμακες.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι κατά την εφαρμογή του φίλτρου στις (2.10) και (2.11) έγιναν απλοποιητικές παραδοχές, οι οποίες αναλύονται στη διδακτορική διατριβή Δημακόπουλος (2009, σελ. 55). Επίσης, φιλτράροντας τους συνεκτικούς όρους, προκύπτουν υποπλεγματικοί όροι, οι οποίοι μπορούν να θεωρηθούν αμελητέοι σε σχέση με τους υπόλοιπους όρους της εξίσωσης (3.2), επειδή διαιρούνται με σχετικά υψηλές τιμές του αριθμού Reynolds, και κατ' επέκταση αγνοούνται.

Στην παρούσα εργασία, οι SGS τάσεις δίνης και κύματος, οι οποίες εξαρτώνται από τις μη επιλυόμενες κλίμακες, προσομοιώνονται με τη χρήση μοντέλων τυρβώδους συνεκτικότητας (Rogallo & Moin, 1984). Συγκεκριμένα, το μοντέλο για τις τάσεις δίνης είναι

$$\tau_{ij} = -2\nu_\tau \bar{S}_{ij} = -2C^2 \Delta^2 |\bar{S}| \bar{S}_{ij} \quad (3.6)$$

όπου C είναι παράμετρος του μοντέλου με τιμή 0.1 (όπως συνήθως επιλέγεται και στη μεθοδολογία LES), $\Delta = (\Delta_1 \Delta_2 \Delta_3)^{1/3}$ είναι το μέγεθος της μικρότερης επιλυόμενης κλίμακας με βάση τις διαστάσεις των κελιών του πλέγματος, S_{ij} είναι ο τανυστής του ρυθμού παραμόρφωσης για τις επιλυόμενες κλίμακες

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial s_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial s_i} \right) \quad (3.7)$$

και $|\bar{S}| = (\bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij})^{1/2}$ το μέτρο του. Το μοντέλο των τάσεων κύματος βασίζεται σε αυτό των Dimas & Fialkowski (2000) και ορίζεται, εντελώς ανάλογα με την (3.6), ως εξής

$$\tau_{ij}^\eta = -2\nu_\tau \bar{S}_{ij}^\eta = -2(C^\eta)^2 \Delta^2 |\bar{S}^\eta| \bar{S}_{ij}^\eta \quad (3.8)$$

όπου C^η είναι παράμετρος του μοντέλου και S_{ij}^η είναι ο παραμορφωμένος τανυστής του ρυθμού παραμόρφωσης για τις επιλυόμενες κλίμακες

$$\bar{S}_{ij}^\eta = \delta_{3j} S_{ik} \left| \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial s_k} \right| \quad (3.9)$$

όπου δ_{ij} είναι το δέλτα του Kronecker.

4. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ

Η αριθμητική επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes επιτυγχάνεται με χρήση κλασματικής μεθόδου ολοκλήρωσης σταθερού βήματος, όσον αφορά τη χρονική διακριτοποίηση και ενός υβριδικού σχήματος για τη χωρική διακριτοποίηση. Το υβριδικό σχήμα περιλαμβάνει διακριτοποίηση των εξισώσεων με χρήση κεντρικών πεπερασμένων διαφορών κατά την οριζόντια διεύθυνση s_1 , ψευδο-φασματικής προσέγγισης κατά Fourier στην οριζόντια διεύθυνση s_2 , και εφαρμογή ψευδο-φασματικής μεθόδου παρεμβολής με N πολυώνυμα Chebyshev κατά την κατακόρυφη διεύθυνση s_3 .

Οι μετασχηματισμένες εξισώσεις Navier-Stokes μπορούν να γραφούν ως εξής

$$\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial t} = \bar{A}_i - \partial_j^T \bar{\Pi} + \frac{1}{\text{Re}_d} \left[\Delta_j^T \bar{v}_i + \bar{V}_i \right] + \bar{T}_i \quad (4.1)$$

όπου $\bar{v}_i = \bar{u}_i - \delta_{3i} \bar{r}_k \bar{u}_k$, ο όρος \bar{A}_i περιλαμβάνει όλους τους μη-γραμμικούς όρους, ∂_j^T είναι ο μετασχηματισμένος τελεστής παραγωγίσης, $\bar{\Pi} = \bar{p} + 0.5(\bar{v}_j \bar{v}_j)$ είναι το μετασχηματισμένο ύψος πίεσης και Δ_j^T είναι ο μετασχηματισμένος τελεστής του Laplace.

Κάθε βήμα της χρονικής διακριτοποίησης πραγματοποιείται σε τρία στάδια, διαδικασία κατά την οποία το πεδίο ταχύτητας στο επόμενο χρονικό βήμα, υπολογίζεται προσθέτοντας διαδοχικά τις αντίστοιχες διορθώσεις καθενός από τα τρία αυτά στάδια, στο πεδίο του προηγούμενου χρονικού βήματος. Το πεδίο δυναμικής πίεσης λαμβάνεται στο δεύτερο στάδιο του κάθε χρονικού βήματος, ενώ η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας υπολογίζεται από την κινηματική οριακή συνθήκη στο τέλος κάθε χρονικού βήματος.

Στο πρώτο στάδιο γίνεται χρήση ρητού σχήματος για τη διακριτοποίηση των μη-γραμμικών όρων \bar{A}_i , των SGS όρων \bar{T}_i και των όρων \bar{V}_i , των μετασχηματισμένων εξισώσεων (4.1). Στο δεύτερο στάδιο εφαρμόζεται ένα πεπλεγμένο σχήμα Euler για τον όρο του ύψους πίεσης, $\partial_j^T \bar{\Pi}$, όπου, λαμβάνοντας υπόψη την εξίσωση συνέχειας, προκύπτει η γενικευμένη εξίσωση Poisson για το μετασχηματισμένο ύψος πίεσης. Σε αυτό το στάδιο εφαρμόζονται η δυναμική οριακή συνθήκη ελεύθερης επιφάνειας και η συνθήκη αδιαπέρατου πυθμένα. Στο τρίτο και τελευταίο στάδιο του χρονικού βήματος, χρησιμοποιείται επίσης ένα πεπλεγμένο σχήμα Euler, και σε αυτό υπεισέρχονται οι εναπομείναντες συνεκτικοί όροι, $\Delta_j^T \bar{v}_i$, των εξισώσεων κίνησης. Για τον υπολογισμό των συνιστωσών της ταχύτητας, σε αυτό το στάδιο, εφαρμόζονται η οριακή συνθήκη διατμητικής τάσης ελεύθερης επιφάνειας και οι οριακές συνθήκες πυθμένα.

Σύμφωνα με το υβριδικό σχήμα της χωρικής διακριτοποίησης, κάθε μεταβλητή της ροής \bar{f} (ταχύτητες και πίεση) προσεγγίζεται ως

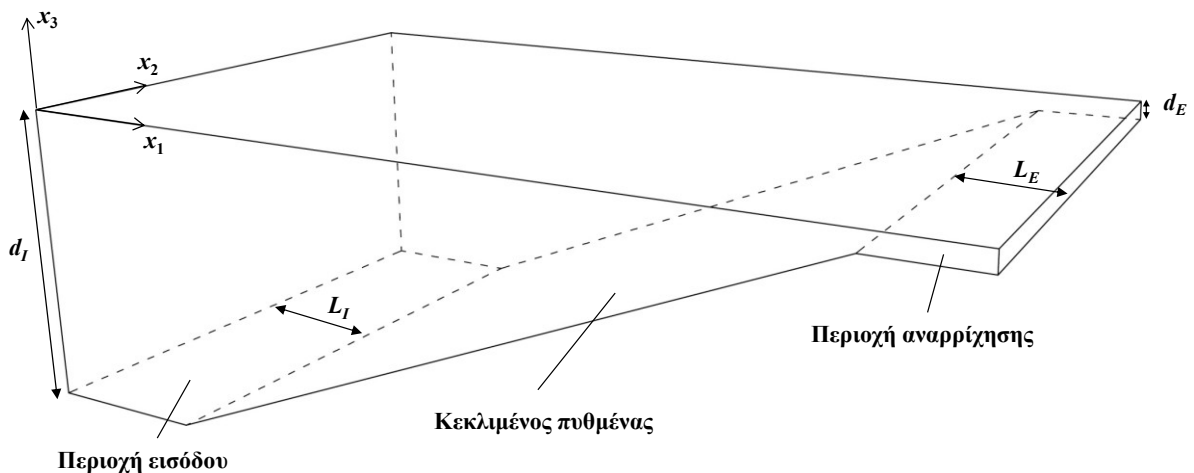
$$\bar{f}(s_1, s_2, s_3, t) = \sum_{m=-M/2}^{M/2-1} \sum_{n=0}^N \tilde{f}_{mn}(s_1, t) \cdot \exp\left(-2\pi i \frac{ms_2}{L_2}\right) T_n(s_3) \quad (4.2)$$

όπου \tilde{f}_{mn} είναι η μετασχηματισμένη κατά Chebyshev-Fourier μεταβλητή \bar{f} , M είναι ο αριθμός των σημείων Fourier, $L_2 = M \cdot \Delta_2$ είναι το μήκος του υπολογιστικού πεδίου κατά s_2 , και T_n είναι το πολυώνυμο Chebyshev μέγιστης τάξης N . Οι μετασχηματισμοί μεταξύ πραγματικού και φασματικού πεδίου γίνονται με χρήση του αλγορίθμου Fast Fourier Transform (Press et al., 1992).

Η διακριτοποίηση της (4.1) με εφαρμογή της (4.2) οδηγεί στο σχηματισμό ενός συστήματος αλγεβρικών εξισώσεων για καθεμία από τις μετασχηματισμένες μεταβλητές της ροής με τη γενική μορφή $[A] \times [\tilde{f}] = [\tilde{b}]$. Καθένα από αυτά τα συστήματα δύναται να διαιρεθεί σε M υποσυστήματα (της μορφής $[A_m] \times [\tilde{f}_m] = [\tilde{b}_m]$, ένα για κάθε κόμβο Fourier), τα οποία μπορούν να επιλυθούν παράλληλα, αφού δεν αλληλεξαρτώνται. Η επίλυση κάθε υποσυστήματος γίνεται με χρήση μιας επαναληπτικής μεθόδου, γενίκευση της μεθόδου Gauss-Seidel, σε κάθε χρονικό βήμα. Ο πίνακας των συντελεστών $[A_m]$ είναι ένας περιορισμένου εύρους διαγώνιος πίνακας, ο οποίος διασπάται μία φορά με την έναρξη της χρονικής ολοκλήρωσης με χρήση της μεθόδου διάσπασης LU.

Στην παρούσα εργασία, γίνεται προσομοίωση της διάδοσης θραυόμενων κυμάτων Stokes 2^{ης} τάξης, πάνω από πυθμένα σταθερής κλίσης. Όπως φαίνεται στο σκαρίφημα του υπολογιστικού πεδίου (Σχήμα 2), ένα οριζόντιο τμήμα μήκους L_I και βάθους d_I , προηγείται

του κεκλιμένου τμήματος του πυθμένα, εξασφαλίζοντας την ομαλή εισροή των κυμάτων. Στην περιοχή αναρρίχησης, η οποία ακολουθεί το κεκλιμένο τμήμα και έχει μήκος L_E , ο πυθμένας θεωρείται επίσης οριζόντιος με βάθος $d_E \ll d_I$. Η θεώρηση αυτή γίνεται εξαιτίας του χρησιμοποιούμενου μετασχηματισμού των εξισώσεων ροής, ο οποίος δεν επιτρέπει το μηδενισμό του βάθους ροής. Εντός της περιοχής αναρρίχησης περιλαμβάνονται δύο επικαλυπτόμενες ζώνες: μία ζώνη απορρόφησης κυμάτων, μήκους $L_A \approx L_E$, για την ελαχιστοποίηση της ανάκλασης κυμάτων από το όριο εξόδου (Dimas & Dimakopoulos, 2009), και μία ζώνη σταδιακής μείωσης της ταχύτητας (ή αλλιώς ζώνη επιβράδυνσης της ροής), μήκους L_D , ώστε να αποτραπεί η απώλεια μάζας νερού από το όριο εξόδου. Εντός της τελευταίας, γίνεται χρήση μειωμένης τιμής του Re_d , η οποία αντιστοιχεί σε αυξημένη τιμή του κινηματικού ιξώδους, κατά την επίλυση των μετασχηματισμένων εξισώσεων (4.1).



Σχήμα 2: Σκαρίφημα του υπολογιστικού πεδίου ροής.

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

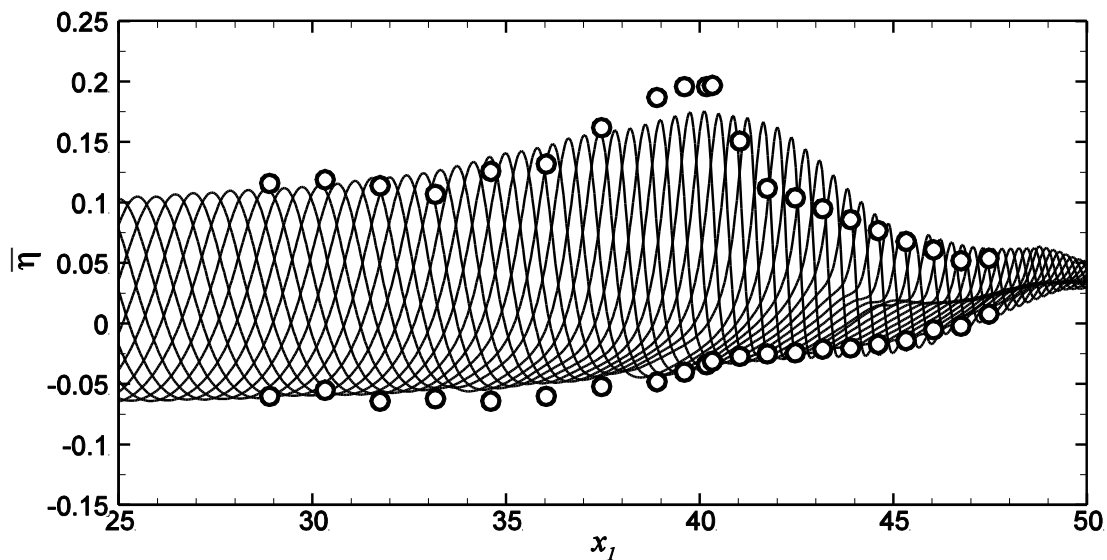
Η επαλήθευση της μεθοδολογίας LWS εφαρμοζόμενη σε σύζευξη με τις εξισώσεις Euler για την περίπτωση μη-συνεκτικής ροής, από την οποία προέκυψε και η βαθμονόμηση της παραμέτρου, C^l , του μοντέλου των SGS τάσεων κύματος, πραγματοποιήθηκε από τους Dimakopoulos & Dimas (2011). Η τιμή στην οποία κατέληξαν για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης τους, είναι $C^l = 0.4$ και προήλθε από σύγκριση αυτών με αντίστοιχες πειραματικές μετρήσεις των Ting & Kirby (1994, 1996) για την περίπτωση κάθετης, ως προς την ακτογραμμή, διάδοσης θραυόμενου κύματος πάνω από πυθμένα σταθερής κλίσης $\tan\beta = 1/35$.

Στην παρούσα εργασία, εξετάζεται η ακρίβεια της μεθοδολογίας LWS, η οποία πλέον συνδυάζεται με τις εξισώσεις Navier-Stokes, μέσω αριθμητικής προσομοίωσης της ίδιας περίπτωσης διάδοσης κυμάτων. Γίνεται, επίσης, σύγκριση των αποτελεσμάτων των αριθμητικών προσομοιώσεων με τις πειραματικές μετρήσεις που διενήργησαν οι Ting & Kirby (1994), ενώ θεωρείται τιμή της παραμέτρου του μοντέλου $C^l = 0.4$.

Οι παράμετροι ροής των πειραμάτων (Ting & Kirby, 1994) που αφορούσαν την περίπτωση θραύσης εκχείλισης ελλειπτικών κυμάτων, συνοψίζονται στις εξής: βάθος εισόδου κυμάτων $d_I = 0.4$ m, ύψος και περίοδος κύματος $H_I = 0.125$ m και $T = 2$ s, αντίστοιχα, οι οποίες αντιστοιχούν σε ύψος και μήκος κύματος μεγάλου βάθους $H_o = 0.127$ m και $\lambda_o = 6.245$ m, αντίστοιχα. Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η περίπτωση κυμάτων με τις προαναφερόμενες παραμέτρους μεγάλου βάθους, ενώ το βάθος εισόδου θεωρείται $d_I = 0.7$ m, ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί η θεωρία κυμάτων Stokes για το εισερχόμενο, στο πεδίο ροής, κύμα. Στο συγκεκριμένο βάθος, το ύψος κύματος προκύπτει ίσο με $H_I = 0.118$ m. Κάνοντας

χρήση των μεγεθών g , d_I , προκύπτουν οι αδιαστατοποιημένες τιμές των παραμέτρων εισερχόμενου κύματος, $H_I = 0.168$, $T = 7.487$ και $\lambda_o = 6.605$. Επίσης, θεωρείται αριθμός Reynolds $Re_d = 250000$, ενώ εντός της ζώνης αναρρίχησης χρησιμοποιείται τιμή 100 φορές μικρότερη αυτής. Ο αριθμός Iribaren είναι $\xi_o = \tan\beta(\lambda_o/H_o)^{0.5} = 0.2$ και αντιστοιχεί σε θραύση εκχείλισης μέσης έντασης. Το συνολικό μήκος του υπολογιστικού πεδίου είναι $L = 52$, το οριζόντιο τμήμα του πυθμένα έχει μήκος $L_I = 15$ και η περιοχή αναρρίχησης έχει μήκος $L_E = 3.05$ και βάθος $d_E = 0.03$. Η ζώνη απορρόφησης κυμάτων και η ζώνη επιβράδυνσης έχουν μήκη $L_A = 3$ και $L_D = 2$, αντίστοιχα. Οι αριθμητικές παράμετροι είναι: $\Delta_1 = 0.04$, $N = 128$, $M = 32$, $\Delta_2 = 0.02$ και $\Delta t = 10^{-4}$.

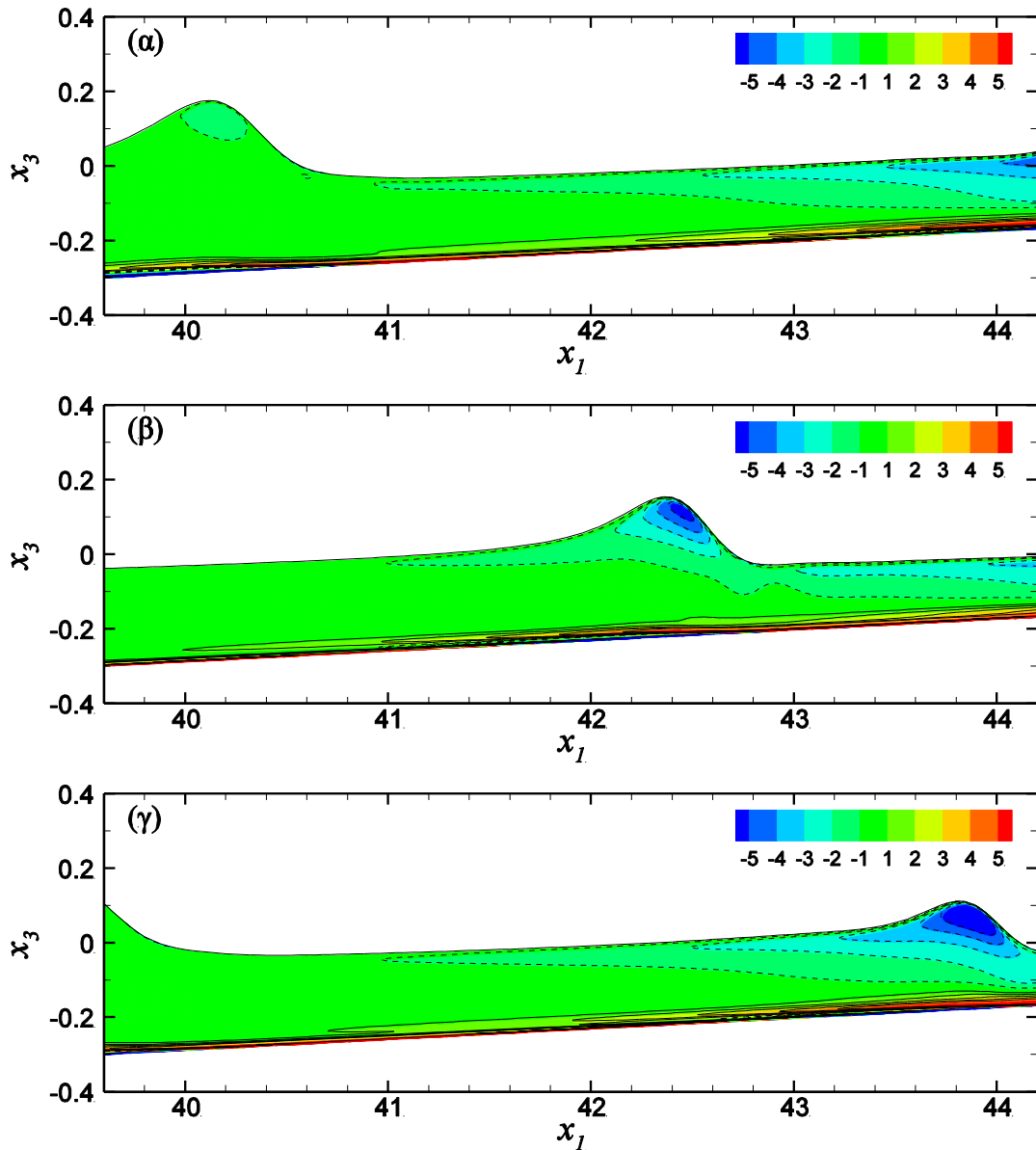
Στο Σχήμα 3 φαίνονται στιγμιότυπα της ανύψωσης της επιλυόμενης ελεύθερης επιφάνειας, μετά την πάροδο 15 περιόδων κύματος, T , τα οποία συγκρίνονται με τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων των Ting & Kirby (1994) για τη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας, δηλαδή την κορυφή και την κοιλία κύματος, αντίστοιχα. Το αριθμητικό μοντέλο προβλέπει άριστα το βάθος θραύσης του κύματος $d_b = 0.28$, το οποίο αντιστοιχεί στη θέση $x_1 \approx 40.3$, αλλά υποεκτιμά το ύψος θραύσης, όπως φαίνεται από την απόκλιση, περίπου κατά 9%, της τιμής του μοντέλου για την κορυφή στη θραύση ($\eta_b = 0.176$) και της αντίστοιχης πειραματικής μέτρησης ($\eta_b = 0.194$). Στα μεγαλύτερα βάθη της ζώνης απόσβεσης ($x_1 < 44$), το μοντέλο υποεκτιμά την απόσβεση του ύψους κύματος, αντίθετα με ότι συμβαίνει για το τμήμα της ζώνης απόσβεσης κοντά στην ακτογραμμή ($x_1 > 44$), όπου οι προβλέψεις του μοντέλου είναι πάρα πολύ καλές. Τα αριθμητικά αποτελέσματα για την περιοχή της ρήχωσης προσεγγίζουν ικανοποιητικά τις αντίστοιχες πειραματικές μετρήσεις.



Σχήμα 3: Στιγμιότυπα της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας κατά τη διάδοση κυμάτων πάνω από πυθμένα σταθερής κλίσης $\tan\beta = 1/35$. Τα σύμβολα αντιστοιχούν στις πειραματικές μετρήσεις των Ting & Kirby (1994) για την υψηλότερη και τη χαμηλότερη θέση της ελεύθερης επιφάνειας.

Τρία τυπικά στιγμιότυπα της κατανομής της αδιαστατοποιημένης στροβιλότητας ω_2 , στη ζώνη απόσβεσης, τη χρονική στιγμή της έναρξης του φαινομένου και σε χρονικά διαστήματα $\Delta t = 0.5T$ και $0.8T$ μετά τη θραύση, παρουσιάζονται στο Σχήμα 4. Με την έναρξη του φαινομένου, στην κορυφή του θραυόμενου κύματος εμφανίζεται στροβιλότητα αρνητικού πρόσημου, η οποία αντιστοιχεί σε δεξιόστροφη ανακυκλοφορία του ρευστού. Μετά τη θραύση ο επιφανειακός στρόβιλος γίνεται ακόμα πιο ισχυρός, ενώ ταυτόχρονα,

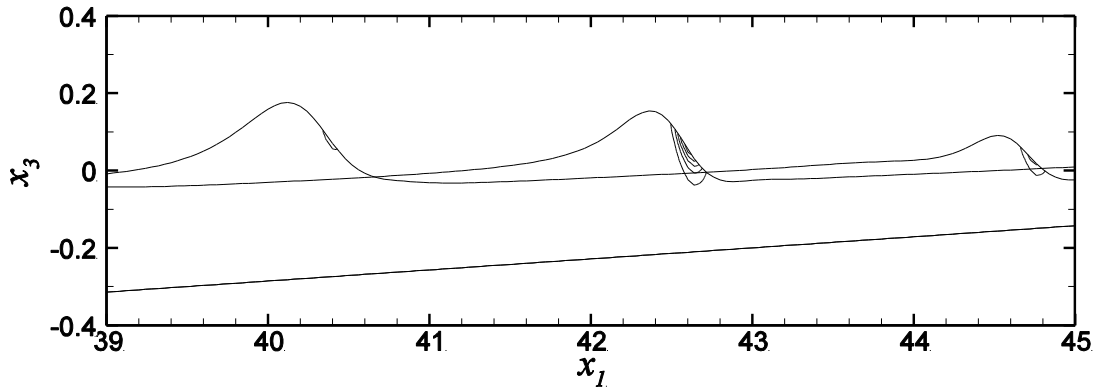
συμπαρασυρόμενος από το κύμα στη ζώνη απόσβεσης, διαχέεται στον ολόκο αυτού. Στο Σχήμα 4 φαίνονται, επίσης, η κατανομή της στροβιλότητας κοντά στον πυθμένα, η οποία οφείλεται στη διατμητική τάση που αναπτύσσεται στον πυθμένα, με μέγιστες τιμές μέχρι και 10 φορές μεγαλύτερες από αυτές της στροβιλότητας στη θραυόμενη κορυφή του κύματος.



Σχήμα 4: Στιγμιότυπα ισοϋψών του πεδίου στροβιλότητας σε μία διατομή ($x_2 = 0.32$) στη ζώνη απόσβεσης: (α) τη στιγμή έναρξης της θραύσης, (β) σε χρονικό διάστημα $\Delta t = 0.5T$ μετά τη θραύση και (γ) σε χρονικό διάστημα $\Delta t \approx 0.8T$ μετά τη θραύση.

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία LWS, η θραύση και η απόσβεση του κύματος συνοδεύονται από την ανάπτυξη και τη συνδυασμένη δράση των SGS τάσεων δίνης και κύματος. Στο Σχήμα 5 παρουσιάζονται τυπικά στιγμιότυπα της τάσης κύματος τ_{13}^n , που είναι η μεγαλύτερη σε μέγεθος από τις SGS τάσεις, εντός της ζώνης απόσβεσης, κατά την έναρξη της θραύσης και σε χρόνο $0.5T$ αργότερα. Είναι προφανές ότι η δημιουργία του επιφανειακού στροβίλου (Σχήμα 4) συνοδεύεται από τη συνεχόμενη αύξηση του μεγέθους της τάσης τ_{13}^n στο μέτωπο του θραυόμενου κύματος. Η αύξηση αυτή συμβαίνει για χρονικό διάστημα $\Delta t =$

$0.5T$ μετά την έναρξη της θραύσης, και αντίστοιχα για το διάστημα $1 \geq d/d_b \geq 0.78$, ενώ για χρόνο μεγαλύτερο από $0.5T$ η δύναμή της εξασθενεί μέχρι μηδενισμού της. Ανάλογη συμπεριφορά επιδεικνύουν και οι υπόλοιπες SGS τάσεις εντός της ζώνης απόσβεσης (στο επίπεδο x_1 - x_3), ενώ οι τάσεις κατά τη διεύθυνση x_2 είναι κατά πολύ μικρότερες σε μέγεθος.

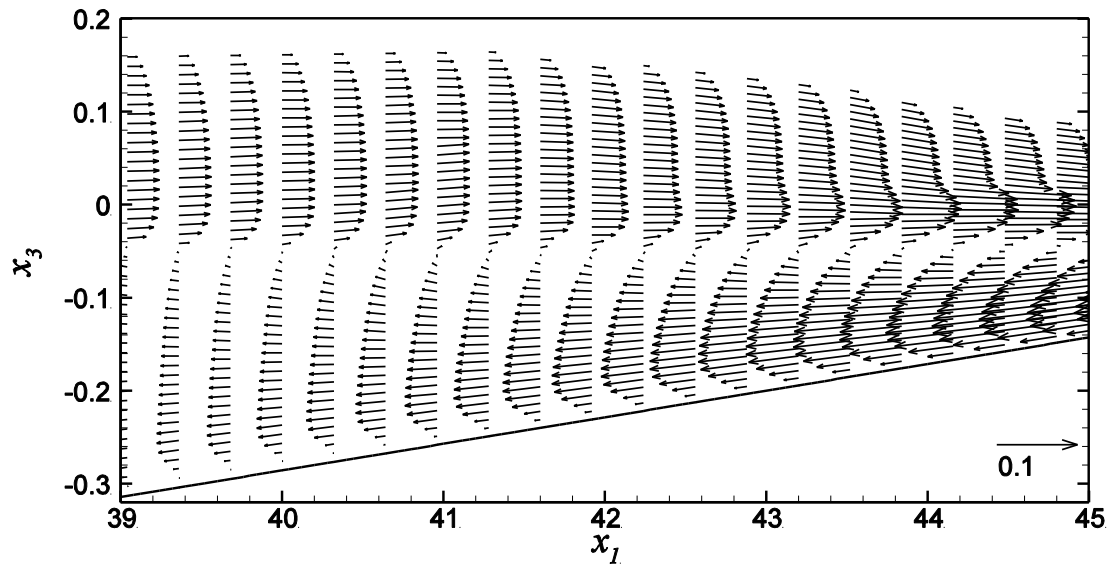


Σχήμα 5: Δύο στιγμιότυπα της SGS τάσης κύματος τ_{13}^{η} , σε μία διατομή ($x_2 = 0.32$) στη ζώνη απόσβεσης, τα οποία αντιστοιχούν στα (α) και (β) του Σχήματος 4. Το πρώτο στιγμιότυπο περιλαμβάνει δύο κορυφές (θέσεις $x_1 \approx 40$ και 44.5), ενώ οι ισοϋψείς καμπύλες σχεδιάζονται ανά διαστήματα των 0.0002 από το 0 ως το 0.001 .

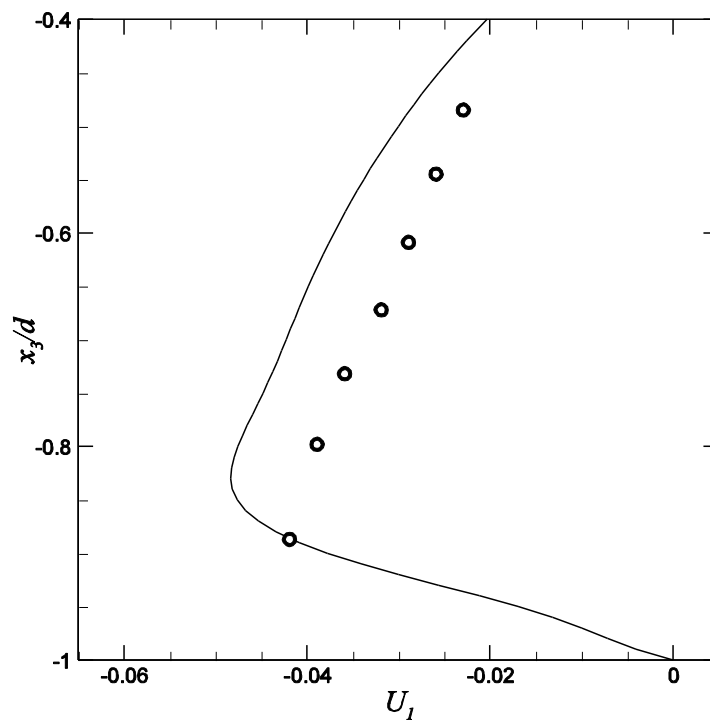
Όπως έχει προαναφερθεί στην εισαγωγή, η δημιουργία του κυματογενούς υποβρύχιου ρεύματος, που συνοδεύει τη θραύση του κύματος, εξασφαλίζει ότι η συνολική παροχή ρευστού, κατά την εγκάρσια στην ακτογραμμική διεύθυνση, είναι μηδενική. Στο Σχήμα 6 παρουσιάζεται μία τυπική κατανομή της χρονικά μέσης ταχύτητας εγκάρσια στην ακτογραμμική (για μία περίοδο κύματος) ανάντη της γραμμής θραύσης και σε τμήμα της ζώνης απόσβεσης, και είναι προφανές ότι το μοντέλο είναι σε θέση να προσομοιώσει επαρκώς το εν λόγω φαινόμενο. Στη ζώνη απόσβεσης, η κατεύθυνση της μέσης ταχύτητας είναι προς την ανοιχτή θάλασσα κοντά στον πυθμένα, και προς την ακτογραμμική κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια, ενώ πριν τη γραμμή θραύσης η μέση ταχύτητα κοντά στον πυθμένα, αν και είναι πολύ μικρή, έχει κατεύθυνση προς αυτή. Στο Σχήμα 7, η πρόβλεψη του αριθμητικού μοντέλου για την κατακόρυφη κατανομή του υποβρύχιου ρεύματος στη θέση $x_1 = 42$, όπου $d/d_b = 0.82$, συγκρίνεται με το αντίστοιχο προφίλ που έχει προκύψει από τις μετρήσεις των Ting & Kirby (1994). Είναι προφανές ότι το μοντέλο υπερεκτιμά την ισχύ του υποβρύχιου ρεύματος, με τη μέγιστη απόκλιση να είναι περίπου 20% σε σχέση με τις μετρήσεις. Επίσης, η θέση του μεγίστου της καμπύλης της αριθμητικής προσομοίωσης βρίσκεται σε μικρότερο βάθος σε σχέση με την αντίστοιχη των μετρήσεων, γεγονός που αποδίδεται στη διαφορά της χρησιμοποιούμενης τιμής Re_d του μοντέλου και των μετρήσεων, με την πρώτη να είναι 7 φορές μικρότερη της δεύτερης.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται ένα αριθμητικό μοντέλο για την προσομοίωση της διάδοσης και θραύσης κυμάτων πάνω από πυθμένα σταθερής κλίσης στην παράκτια ζώνη. Το μοντέλο περιλαμβάνει σύζευξη της μεθόδου προσομοίωσης μεγάλων κυμάτων (LWS) με την αριθμητική επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes. Με τη μεθοδολογία LWS, στο μοντέλο εισάγονται οι υποπλεγματικές (SGS) τάσεις κύματος και δίνης, οι οποίες υποβοηθούν τη θραύση και την απόσβεση της ενέργειας του θραυόμενου κύματος. Σε γενικές



Σχήμα 6: Κατανομή της μέσης ταχύτητας (υποβρύχιο ρεύμα) εγκάρσια στην ακτογραμμή, για μία περίοδο κύματος T , σε μία διατομή ($x_2 = 0.32$) στη ζώνη απόσβεσης.



Σχήμα 7: Κατακόρυφη κατανομή της μέσης οριζόντιας ταχύτητας (υποβρύχιο ρεύμα), σε μία διατομή ($x_2 = 0.32$) στη θέση $x_1 = 42$ (κατάντη της γραμμής θραύσης). Τα σύμβολα αντιστοιχούν στις πειραματικές μετρήσεις των Ting & Kirby (1994).

γραμμές, οι προβλέψεις του μοντέλου για τα χαρακτηριστικά της θραύσης και την απόσβεση του κύματος κρίνονται ικανοποιητικές, ύστερα από σύγκριση στιγμιότυπων της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας με σχετικά αποτελέσματα πειραματικών μετρήσεων (Ting & Kirby, 1994). Η ανάπτυξη του επιφανειακού στροβίλου στην κορυφή του θραυόμενου κύματος συνοδεύεται από αύξηση της ισχύος των SGS τάσεων αλλά και διαδοχική μείωση τους (μέχρι μηδενισμού) στα ρηχά της ζώνης απόσβεσης. Η κατανομή της μέσης, ανά περίοδο κύματος,

ταχύτητας εγκάρσια ως προς την ακτογραμμή, που προκύπτει από την προσομοίωση, αποτυπώνει επαρκώς τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του, δημιουργούμενου εξαιτίας της θραύσης, υποβρύχιου ρεύματος (undertow current). Η ποσοτική επαλήθευση της ισχύος του υποβρύχιου ρεύματος προκύπτει από τη σύγκριση του προφίλ της οριζόντιας ταχύτητας (εγκάρσια στην ακτογραμμή) σε συγκεκριμένη θέση, με το αντίστοιχο που έχει μετρηθεί από τους Ting & Kirby (1994).

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστούμε την Επιτροπή Ερευνών (ΕΛΚΕ) του Πανεπιστημίου Πατρών, και ειδικότερα το Πρόγραμμα Κ. ΚΑΡΑΘΕΟΔΩΡΗ, για την χρηματοδότηση του ανωτέρω έργου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Δημακόπουλος, Α. 2009. *Αριθμητική Προσομοίωση της Τρισδιάστατης Τυρβώδους Ροής Θραυόμενων Κυμάτων στην Παράκτια Ζώνη*. Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, 134 σελ.
- Dimakopoulos, A.S. and Dimas, A.A. 2011. *Large-wave simulation of three-dimensional, cross-shore and oblique, spilling breaking on constant slope beach*. Coastal Engineering, 58: 790-801.
- Dimas, A.A. and Dimakopoulos, A.S. 2009. *A surface-roller model for the numerical simulation of spilling wave breaking over constant slope beach*. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 135(5): 235-244.
- Dimas, A.A. and Fialkowski, L.T. 2000. *Large-wave simulation (LWS) of free-surface flows developing weak spilling breaking waves*. Journal of Computational Physics, 159(2): 172–196.
- Rogallo, R.S. and Moin, P. 1984. *Numerical simulation of turbulent flows*. Annual Review of Fluid Mechanics, 16: 99-137.
- Press, W.H., Teukolsky, S.A., Vetterling, W.T. and Flannery, B.P. 1992. *Numerical Recipes in Fortran 77*. Cambridge University Press, 963 pp..
- Ting, F.C.K. and Kirby, J.T. 1994. *Observation of undertow and turbulence in a laboratory surf zone*. Coastal Engineering, 24(1-2): 51-80.
- Ting, F.C.K. and Kirby, J.T. 1996. *Dynamics of surf-zone turbulence in a spilling breaker*. Coastal Engineering, 27(3-4): 131-160.

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΣΤΟ ΒΕΛΤΙΣΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΕΡΓΩΝ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΑΚΤΩΝ ΔΗΜΟΥ ΑΣΙΝΗΣ

Σπύρος Χριστόπουλος¹, Ιωάννης Αυγέρης¹,
Θεοφάνης Καραμπάς², Χριστόφορος Κουτίτας²

¹ΥΔΡΟΑΚΤΟΤΕΧΝΙΚΗ, Λ. Σοφού 20, 57001, Θέρμη

²Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ., 54124, Θεσσαλονίκη

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται η εφαρμογή του ολοκληρωμένου μαθηματικού μοντέλου HMAR-CPIM (HYDROMARE - Coastal Protection Integrated Model) προσομοίωσης των παράκτιων μορφοδυναμικών διεργασιών, που χρησιμοποιείται για το σχεδιασμό των παράκτιων τεχνικών έργων προστασίας ακτών από διάβρωση στην παράκτια περιοχή της Δημοτικής Ενότητας Ασίνης. Το μοντέλο συντίθεται από τα υπο-μοντέλα μετάδοσης κυματισμών HMAR_WAVEL, κυματογενούς κυκλοφορίας HMAR_WAVECIR και παράκτιας στερεομεταφοράς εξέλιξης μορφολογίας HMAR_SEDTR, τα οποία εκτελούνται διαδοχικά. Το ολοκληρωμένο μοντέλο HMAR-CPIM χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της υφιστάμενης κατάστασης και τη διερεύνηση των διαβρωτικών φαινομένων σε τρεις ακτές της Δημοτικής Ενότητας Ασίνης και στη συνέχεια για την ανάλυση τεχνικών λύσεων με εφαρμογή της κατασκευής περιβαλλοντικά φιλικών τεχνικών έργων προστασίας ακτών (βυθισμένων κυματοθραυστών) για τη σταθεροποίηση της ακτής που αναπλάστηκε.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Προστασία Ακτών από Διάβρωση, Μαθηματικά Μοντέλα, Βυθισμένοι Κυματοθραύστες

MATHEMATICAL MODELS IMPLEMENTATION FOR THE OPTIMUM DESIGN OF COASTAL PROTECTION WORKS AT ASINI MUNICIPALITY

Spiros Christopoulos¹, Ioannis Avgeris¹,
Theophanis Karambas², Koutitas Christopher²

¹HYDROMARE, L. Sofou 20, 57001 Thermi, Thessaloniki.

²School of Civil Engineering, 54124, Aristotle University of Thessaloniki, GREECE

ABSTRACT

The present paper deals with the implementation of the integrated mathematical model HMAR-CPIM (HYDROMARE - Coastal Protection Integrated Model) for the simulation of morphodynamical coastal processes and the design of coastal protection works at the Asini coastal area. The model consists of the sub-models of wave transmission HMAR_WAVEL, wave induced circulation HMAR_WAVECIR and coastal sediment transport and bed morphology HMAR_SEDTR, which are executed in sequence. The integrated model HMAR-CPIM is used for the simulation of the existing situation and the investigation of erosive phenomena at three coasts at Asini Municipality and then for the analysis of technical solutions applying environmentally friendly coastal protection structures, as the submerged breakwaters, for the stabilization of the restored beach.

KEY WORDS: Coastal Protection, Beach Nourishment, Submerged Breakwaters

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το αντικείμενο της εφαρμοσμένης έρευνας ήταν η αντιμετώπιση της παρατηρούμενης διάβρωσης σε τμήματα ακτών του Δήμου Ασίνης: α) στην παραλία Τολού, όπου σε μήκος περίπου 1km μπροστά από τον οικισμό, το πλάτος της παραλίας κυμαίνεται από 3-7m β) στην παραλία Ιρίων, όπου σε μήκος 1,5 km βορειοδυτικά του αλιευτικού καταφυγίου υπάρχουν έντονα προβλήματα διάβρωσης με υποχώρηση της ακτής και γ) στην παραλία Πλάκα Δρεπάνου, όπου δημιουργούνται προβλήματα στο πρανές του παραλιακού δρόμου. Οι ακτές που εξετάστηκαν, της παραλίας Τολού, της παραλίας Ιρίων και της παραλίας της Πλάκας Δρεπάνου ανήκουν στην παραλιακή ζώνη της Δημοτικής Ενότητας Ασίνης του Δήμου Ναυπλιέων Νομού Αργολίδας. Σε όλες τις εξεταζόμενες παραλίες υπάρχει σημαντική τουριστική δραστηριότητα, ιδιαίτερα στο Τολό και στην Πλάκα Δρεπάνου, ενώ στην παραλία Ιρίων υπάρχει σημαντική οικιστική ανάπτυξη κατά μήκος της παραλιακής ζώνης.



Σχήμα 1: Θέση έργων 1: Παραλία Τολού, 2: Παραλία Πλάκας, 3: Παραλία Ιρίων

Η εξέλιξη της ακτογραμμής στις τρεις παραλίες εξετάστηκε εποπτικά μέσα από τις αεροφωτογραφίες των ετών 1960, 1972, 1988 και 2000.

Στην παραλία Τολού παρατηρούνται διαβρωτικές τάσεις στα βορειοανατολικά του τέταρτου προβλήτα (ανατολικά του υφιστάμενου αλιευτικού καταφυγίου), χωρίς ωστόσο οι πυθμενικοί πρόβολοι να είναι σε θέση να αμβλύνουν τις τάσεις αυτές, όπως φαίνεται και από την αεροφωτογραφία του έτους 2000, στην οποία οι εξάρσεις στην ακτογραμμή είναι αμελητέες, ειδικά όσο απομακρυνόμαστε από τον τέταρτο προβλήτα. Η ομοιομορφία αυτή στο μέτωπο της ακτής είναι ενδεικτική της αδυναμίας των προβόλων να προκαλέσουν απόθεση υλικού στα ενδιάμεσα σε αυτούς τμήματα, λόγω του ότι η στερεομεταφορά εξελίσσεται κυρίως εγκάρσια και όχι παράλληλα στην ακτή.

Στην παραλία της Πλάκας Δρεπάνου δεν παρουσιάζεται αξιοσημείωτη μετατόπιση της θέσης της ακτογραμμής συγκρίνοντας τις διαθέσιμες αεροφωτογραφίες και το πρόβλημα συνίσταται στην έντονη αναρρίχηση των κυματισμών στο πρανές της ακτής όταν πνέουν ορμητικοί νότιοι άνεμοι.

Στην παραλία των Ιρίων είναι χαρακτηριστική, με την πάροδο των ετών, η έντονη υποχώρηση της ακτογραμμής στη θέση της παλιάς εκβολής του ρέματος, κατάσταση η οποία σταδιακά επεκτείνεται ολοένα και βορειότερα κάτω από την επίδραση των κυματισμών του νότιου τομέα. Ιδιαίτερα η κατάσταση αυτή αποτυπώνεται στις αεροφωτογραφίες του 1960, όπου το πλάτος της παραλίας είναι περίπου ίσο με το πλάτος του δρόμου, και του 2000, όπου το πλάτος της παραλίας σε αυτήν την περιοχή είναι μηδαμινό.

2. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

Για τη μαθηματική προσομοίωση τόσο της υφιστάμενης κατάστασης όσο και των πιθανών σεναρίων αντιμετώπισης των διαβρωτικών προβλημάτων με έργα προστασίας ακτών γίνεται εφαρμογή του μοντέλου ολοκληρωμένης αντιμετώπισης προστασίας ακτών HMAR-CPIM (Καραμπάς και συν, 2011). Το μοντέλο αποτελείται από τρία επιμέρους υπο - μοντέλα, που προσομοιώνουν τη διαμόρφωση του κυματικού πεδίου στην παράκτια ζώνη, την ανάπτυξη των κυματογενών ρευμάτων και τη διαδικασία μεταφοράς των ιζημάτων και της τάσης εξέλιξης της μορφολογίας του πυθμένα.

2.1 ΜΟΝΤΕΛΟ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ HMAR_WAVEL

Οι υπερβολικής μορφής εξισώσεις ήπιας κλίσης γράφονται (Copeland, 1985α, Καραμπάς, 2004-κεφάλαιο 3):

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{c}{c_g} \nabla \frac{c_g}{c} \mathbf{Q}_w = 0$$

$$\frac{\partial \mathbf{Q}_w}{\partial t} + \frac{c^2}{d} \nabla \eta = 0 \quad (2.1)$$

όπου η είναι η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας της θάλασσας λόγω του κυματισμού, d το βάθος της θάλασσας, $\mathbf{Q}_w = (U_w, V_w)$, όπου U_w και V_w είναι οι μέσες ως προς το βάθος οριζόντιες ταχύτητες κατά x και y , c η ταχύτητα διάδοσης του κυματισμού, $c = L/T$ (όπου L , T το μήκος κύματος και η περίοδος του κύματος αντίστοιχα) και c_g η ταχύτητα ομάδας κυματισμών.

Η απώλεια της ενέργειας λόγω θραύσης των κυματισμών στην ακτή ή πάνω στους κυματοθραύστες εισάγεται στο μοντέλο μέσω της προσομοίωσης των τάσεων Reynolds με τη θεώρηση τυρβώδη συντελεστή ιξώδους. Στο δεξί μέρος των εξισώσεων της ορμής προστίθενται οι όροι:

$$\nu_h \nabla^2 \mathbf{U}_w \quad (2.2)$$

όπου ν_h ένας τεχνητός συντελεστής τυρβώδους διάχυσης συνάρτηση της απώλειας της ενέργειας λόγω θραύσης τυχαίων κυματισμών σε πεδία με πολύπλοκη βυθομετρία (Καραμπάς και συν, 2011).

Η απώλεια της ενέργειας λόγω τριβής πυθμένα προσομοιώνεται με την προσθήκη γραμμικοποιημένων όρων στο δεξί μέρος των εξισώσεων της ορμής (Καραμπάς, 2004-κεφάλαιο 3).

Οι παραπάνω εξισώσεις (2.1) προκύπτουν από την αντικατάσταση της κατακόρυφης κατανομής της πίεσης και των οριζοντίων ταχυτήτων, σύμφωνα με τη

γραμμική θεωρία κυματισμών, στις γραμμικοποιημένες εξισώσεις Navier-Stokes. Έτσι έχουν τη δυνατότητα περιγραφής της μετάδοσης των απλών αρμονικών γραμμικών κυματισμών σε οποιοδήποτε βάθος (συνδυασμός των φαινομένων της διάθλασης, περίθλασης, ανάκλασης και ρηχότητας). Για την ολοκλήρωση τους μπορούν να χρησιμοποιηθούν γνωστά ρητά σχήματα πεπερασμένων διαφορών που εφαρμόζονται στην αριθμητική ολοκλήρωση των εξισώσεων μακρών κυματισμών (Κουτίτας, 1985, Καραμπάς, 2004-κεφάλαιο 3).

Οι οριακές συνθήκες που εφαρμόζονται στα πλευρικά όρια του πεδίου είναι συνθήκες σπογγώδους ζώνης, σύμφωνα με την τεχνική απορρόφησης των κυματισμών (Καραμπάς, 2004-κεφάλαιο 3). Η χρονοσειρά διέγερσης με την οποία εισάγεται η κυματική διαταραχή στο πεδίο είναι ημιτονοειδής.

2.2 ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΥΜΑΤΟΓΕΝΟΥΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ HMAR_WAVECIR

Η απώλεια της ενέργειας των κυματισμών, κυρίως λόγω της θραύσης τους, σε συνδυασμό με την επίδραση των φαινομένων της διάθλασης και περίθλασης, οδηγεί στη δημιουργία παράκτιων κυματογενών ρευμάτων.

Οι εξισώσεις συνέχειας και ισορροπίας, για τον υπολογισμό του κυματογενούς ρεύματος, γράφονται (Καραμπάς, 2004- κεφάλαιο 4):

$$\frac{\alpha_z}{a} + \frac{\partial(Uh)}{\partial x} + \frac{\partial(Vh)}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + g \frac{\alpha_z}{\partial x} =$$

$$-\frac{1}{\rho h} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} \left(v_h h \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \left(v_h h \frac{\partial U}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{bx}}{\rho h}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + g \frac{\alpha_z}{\partial y} =$$

$$-\frac{1}{\rho h} \left(\frac{\partial S_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} \left(v_h h \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \left(v_h h \frac{\partial V}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{by}}{\rho h} \quad (2.3)$$

όπου ζ η ανύψωση της μέσης στάθμης θάλασσας και U και V είναι οι μέσες ως προς το βάθος οριζόντιες ταχύτητες του ρεύματος κατά x και y αντίστοιχα, h το συνολικό βάθος, $h=d+\zeta$, S_{xx} , S_{yy} και S_{xy} είναι οι τάσεις ακτινοβολίας και τ_{bx} και τ_{by} οι διατμητικές τάσεις πυθμένα.

Οι τάσεις ακτινοβολίας που είναι συναρτήσεις των μεταβλητών του κυματικού μοντέλου, U_w , V_w και η , υπολογίζονται από τις σχέσεις του Copeland (1985b). Οι εκφράσεις αυτές των τάσεων τάσεις ακτινοβολίας βασίζονται στη γραμμική θεωρία κυματισμών και είναι γενικές, χωρίς να γίνεται η παραδοχή απλά προωθούμενων κυματισμών (μια παραδοχή που γίνεται πολύ συχνά). Για το λόγο αυτό μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πολύπλοκα πεδία του παράκτιου χώρου όπου συνυπάρχουν τα φαινόμενα της διάθλασης, θραύσης, περίθλασης και (μερικής ή ολικής) ανάκλασης των κυματισμών.

Οι διατμητικές τάσεις τ_{bx} και τ_{by} στις εξισώσεις ορμής των (2.3) προσομοιώνουν την απώλεια της ενέργειας λόγω τριβής στον πυθμένα. Ο ρόλος τους είναι σημαντικός στην εκτίμηση των κυματογενών ρευμάτων και γι' αυτό απαιτείται μια όσο το δυνατόν

πιο ακριβής προσομοίωσή τους. Οι διατμητικές τάσεις δίνονται από τις σχέσεις:

$$\tau_{bx} = \frac{1}{2} \rho f_{cw} \langle u_b \sqrt{u_b^2 + v_b^2} \rangle \quad \tau_{by} = \frac{1}{2} \rho f_{cw} \langle v_b \sqrt{u_b^2 + v_b^2} \rangle \quad (2.4)$$

όπου τα σύμβολα $\langle \rangle$ δηλώνουν την ολοκλήρωση ως προς την περίοδο του κύματος, u_b και v_b οι συνολικές (κύματος και ρεύματος) ταχύτητες στον πυθμένα και f_{cw} είναι ο συνολικός συντελεστής τριβής λόγω κύματος και ρεύματος.

Ο συντελεστής f_{cw} είναι άθροισμα των συντελεστών τριβής ρεύματος f_c και κύματος f_w (Καραμπάς, 2004- κεφάλαιο 4). Ο συντελεστής τριβής λόγω ρεύματος f_c είναι συνάρτηση του συντελεστή τριβής Chezy c_c : $f_c = 2g/c_c^2$ με $c_c = 18 \log_{10}(12h/k_s)$. Ο συντελεστής τριβής λόγω κυματισμών δίνεται από τη σχέση: $f_w = \exp[5.213(k_s/\Xi)^{0.19} - 5.977]$ όπου Ξ το πλάτος τροχιάς των μορίων κοντά στον πυθμένα λόγω του κυματισμού και k_s η τραχύτητα του θαλάσσιου αμμόδου πυθμένα.

Η τραχύτητα k_s στον παράκτιο χώρο, κάτω από τη δράση των κυματισμών, υπολογίζεται αφού ληφθεί υπόψη και η τραχύτητα των αμμοκυματιών, $k_s = 8\eta_r^2 / \lambda + 170d_{50} \sqrt{\theta_{2.5} - 0.05}$, όπου η_r είναι το ύψος και λ το μήκος των αμμοκυματιών και $\theta_{2.5}$ η παράμετρος Shields που αντιστοιχεί σε επίπεδο πυθμένα με τραχύτητα $2.5d_{50}$ (d_{50} είναι η χαρακτηριστική διάμετρος των κόκκων). Τα μεγέθη η_r και λ , συνδέονται με τα χαρακτηριστικά του κυματισμού και είναι συνάρτηση του αριθμού κινητικότητας Ψ (Καραμπάς, 2004, κεφάλαιο 4).

2.3 ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΤΕΡΕΟΜΕΤΑΦΟΡΑΣ – ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑΣ ΠΥΘΜΕΝΑ ΗΜΑΡ_ΣΕΔΤΡ

Η συνολική παροχή q_t του φορτίου φερτών υλών είναι το άθροισμα της παροχής δύο επιμέρους φορτίων, του φορτίου πυθμένα q_b και του φορτίου σε αιώρηση q_s :

$$q_t = q_b + q_s \quad (2.5)$$

Σε ένα περιβάλλον κυματισμών-ρευμάτων το φορτίο πυθμένα q_b (ειδική παροχή όγκου φερτών) ως προς τις διευθύνσεις x και y δίνεται από τις σχέσεις των Meyer-Peter και Müller:

$$\frac{\langle q_{bx} \rangle}{\sqrt{\Delta g d_{50}^3}} = 11 \langle |\theta| - \theta_{cr} \rangle^{1.65} \frac{\theta_x}{|\theta|} \quad \frac{\langle q_{by} \rangle}{\sqrt{\Delta g d_{50}^3}} = 11 \langle |\theta| - \theta_{cr} \rangle^{1.65} \frac{\theta_y}{|\theta|} \quad (2.6)$$

όπου θ είναι η παράμετρος Shields, d_{50} είναι η χαρακτηριστική διάμετρος των κόκκων, Δ είναι η σχετική πυκνότητα, $\Delta = (\rho_s - \rho) / \rho$ (ρ_s είναι η πυκνότητα της άμμου και ρ η πυκνότητα του νερού) και θ_{cr} η κρίσιμη παράμετρος του Shields (Καραμπάς και συν, 2011).

Η μεταφορά φερτών σε αιώρηση q_s (ειδική παροχή όγκου φερτών) ως προς τις διευθύνσεις x και y , υπολογίζεται από:

$$q_{sx} = \int_{-d}^{\zeta} u_c(z) c(z) dz \quad q_{sy} = \int_{-d}^{\zeta} v_c(z) c(z) dz \quad (2.7)$$

όπου $c(z)$ η μέση, ως προς τη περίοδο, συγκέντρωση και $u_c(z)$, $v_c(z)$ η κατανομή ως προς το βάθος των ταχυτήτων του ρεύματος (Καραμπάς, 2004, κεφάλαιο 4). Για τη συγκέντρωση $c(z)$ υιοθετείται η αναλυτική λύση της εξίσωσης διάχυσης (Madsen et al., 2003):

$$c(z) = c_a \exp\left(-\frac{w_f z}{D_v}\right) \quad (2.8)$$

όπου w_f είναι η ταχύτητα καθίζησης, D_v ο τυρβώδης συντελεστής διάχυσης και c_a η συγκέντρωση στον πυθμένα $c_a = 0.49\theta^{1.77} (d_{50}/(w_f T f_w))^{1.77}$.

Ο τυρβώδης συντελεστής διάχυσης D_v προσομοιώνει την τύρβη που παράγεται στον πυθμένα λόγω της τριβής και στην επιφάνεια λόγω της θραύσης και υπολογίζεται με βάση τα χαρακτηριστικά του θραυόμενου κυματισμού και του ρεύματος: $D_v = 0.1h\sqrt{\tau_b/\rho} + 0.025h(D/\rho)^{1/3}$ όπου τ_b η συνολική διατμητική τάση στον πυθμένα και D η απώλεια της ενέργειας λόγω της θραύσης των κυματισμών (Καραμπάς και συν, 2011).

Η εκτίμηση της στερεομεταφοράς παράλληλα στην ακτή μέσα στη ζώνη αναρρίχησης των κυματισμών βασίζεται στη σχέση των Larson και Wamsley (2007):

$$q_{swash} = 0.0008 \frac{\tan\phi}{\tan^2\phi - (dh/dy)^2} \frac{u_o^2 v_o t_o}{g T} \quad (2.9)$$

όπου ϕ η γωνία εσωτερικής τριβής της άμμου ($\sim 30^\circ$) και u_o , v_o και t_o οι κυματικές ταχύτητες και ο σχετικός χρόνος αναρρίχησης. Τα μεγέθη αυτά υπολογίζονται από τη βαλλιστική θεωρία και σχετίζονται με το ύψος αναρρίχησης και την κυματική ταχύτητα κοντά στην ακτογραμμή (Larson και Wamsley, 2007).

Οι μορφολογικές μεταβολές (ρυθμός μεταβολής της στάθμης του πυθμένα) στον παράκτιο χώρο υπολογίζονται επιλύοντας την εξίσωση διατήρησης του όγκου των φερτών:

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = -\frac{1}{(1-p)} \frac{\partial}{\partial x} \left(q_{xt} - 5|q_{tx}| \frac{\partial z_b}{\partial x} \right) - \frac{1}{(1-p)} \frac{\partial}{\partial y} \left(q_{yt} - 5|q_{yt}| \frac{\partial z_b}{\partial y} \right) \quad (2.10)$$

όπου z_b είναι η μεταβολή του βάθους του νερού, p το πορώδες της άμμου ($p \approx 0.4$) και q_{tx} , q_{ty} είναι οι συνολικές στερεοπαροχές παράλληλα (άξονας x) και κάθετα (άξονας y) στην ακτή ($q_{tx} = q_{bx} + q_{sx}$, $q_{ty} = q_{by} + q_{sy}$).

3. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Η προτεινόμενη μέθοδος αντιμετώπισης των διαβρωτικών προβλημάτων είναι η μέθοδος της τεχνητής ανάπλασης σε συνδυασμό με ήπια τεχνικά έργα προστασίας όπως βυθισμένοι κυματοθραύστες παράλληλα στην ακτή (DELOS, 2004, Pilarczyk, 2003), που βοηθούν στον εγκλωβισμό των ποσοτήτων άμμου που μεταφέρθηκαν και ελαχιστοποιούν κυρίως τις εγκάρσιες απώλειες. Οι κατασκευές αυτές μεταβάλουν το πεδίο της κυματογενούς κυκλοφορίας, μετατρέποντάς το σε πιο ήπιο. Οι βυθισμένοι κυματοθραύστες μειώνουν και την εγκάρσια διαβρωτική δυναμική των κυματισμών (γιατί μειώνουν την ενέργεια του κύματος που προσπίπτει). Η μέθοδος της τεχνητής

ανάπλασης θεωρείται μία σχετικά περιβαλλοντικά φιλική λύση, γιατί απλά, αντικαθίσταται το υλικό που διαβρώνεται με βασικότερο της πλεονέκτημά ότι δεν δημιουργούνται διαβρώσεις κατάντη της περιοχής που αναπλάθεται.

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι εφαρμογές των υπο-μοντέλων (WAVEL, WAVECIR, SEDTR) της προηγούμενης ενότητας, για τις ακτές στις περιοχές του Τολού, της Πλάκας Δρεπάνου και των Ιρίων. Το χωρικό βήμα ήταν $\Delta x=2.0$ m και το χρονικό $\Delta t=0.0125$ s. Το μοντέλο εφαρμόστηκε για πραγματικό χρόνο 2 ετών.

Πίνακας 1: Τολό, Εφαρμογές - χαρακτηριστικά μεγέθη Βυθισμένων Κυματοθραυστών

Εφαρμογή ΥΚ	Βάθος στη θέση έργων (m)	Απόσταση μεταξύ Βυθισμένων Κυμα/τών (m)	Μήκος Βυθισμένου Κυμα/στη (m)	Αριθμός Βυθισμένων Κυμα/τών
Σενάριο 1	5,5	60	150	4
Σενάριο 2	5,5	35	165	4
Σενάριο 3	4,8	35	165	4

Πίνακας 2: Πλάκα Δρεπάνου, Εφαρμογές-χαρακτηριστικά μεγέθη Βυθισμένων Κυματοθραυστών

Εφαρμογή ΥΚ	Βάθος στη θέση έργων (m)	Απόσταση μεταξύ Βυθισμένων Κυμα/τών (m)	Μήκος Βυθισμένου Κυμα/στη (m)	Αριθμός Βυθισμένων Κυμα/τών
Σενάριο 1	5,0	60	170	2
Σενάριο 2	5,0	-	400	1
Σενάριο 3	3,7	60	170	2

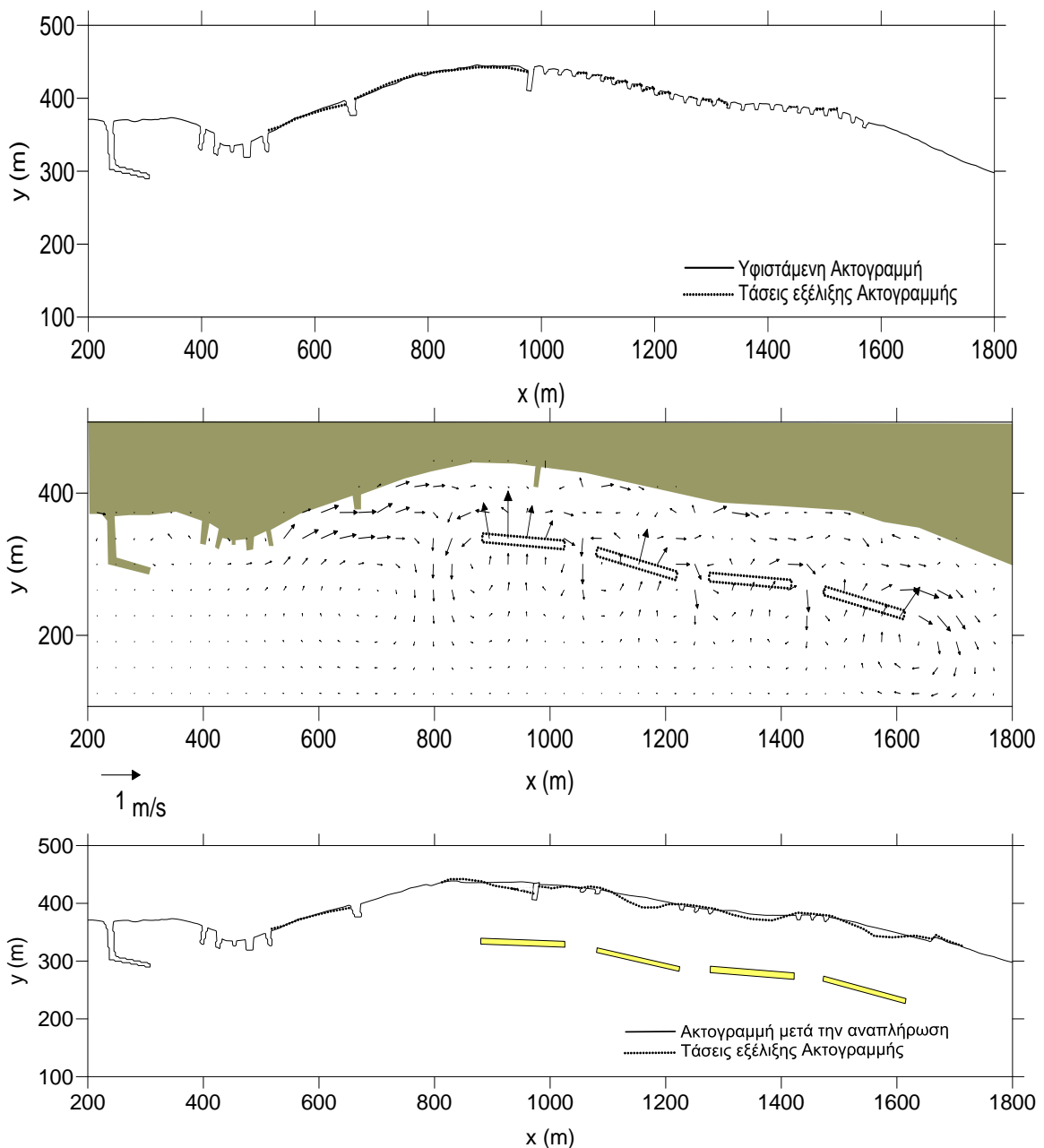
Οι εφαρμογές (Πίνακες 1, 2 και 3) έγιναν και στις τρεις περιπτώσεις για την υφιστάμενη κατάσταση (ΥΚ) καθώς και για τις λύσεις που προτείνονται και αφορούν την κατασκευή βυθισμένων κυματοθραυστών (BK) έχοντας σαν μεταβλητές τις τιμές των παρακάτω παραμέτρων: Μήκος βυθισμένων κυματοθραυστών, Απόσταση μεταξύ τους, Απόσταση από την ακτή, Συντελεστής διάδοσης K_t (λόγος του ύψους του κύματος που προσπίπτει προς το ύψος του κύματος που διαδίδεται προς την ακτή).

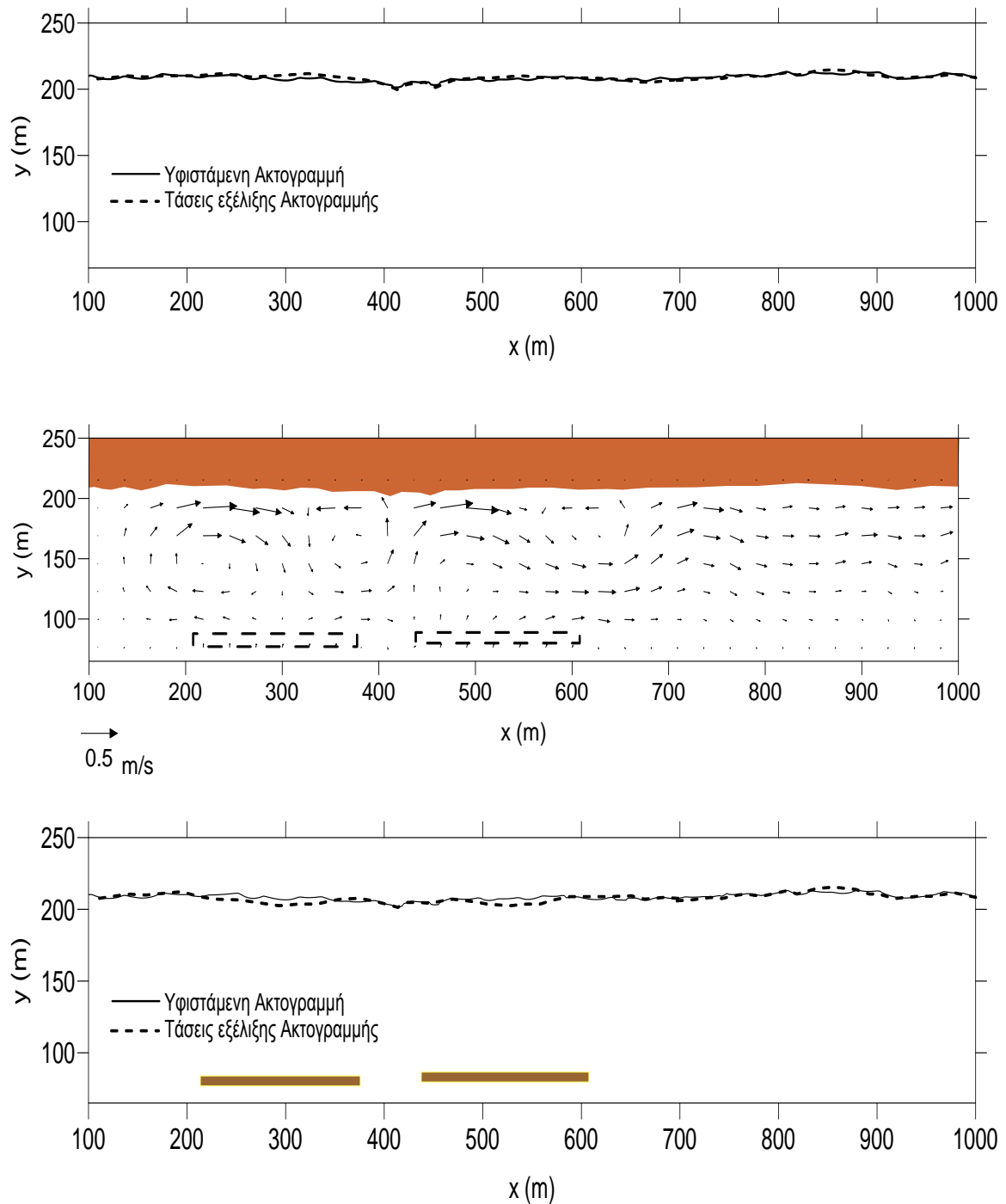
Ο συντελεστής διάδοσης θεωρείται σταθερός και ίσος με 0,4, $K_t=0,4$ σε όλες τις εφαρμογές με κατασκευή βυθισμένων κυματοθραυστών. Για την επιλογή των παραπάνω χαρακτηριστικών ακολουθήθηκαν, σε γενικές γραμμές, οι κλασσικοί κανόνες κυματοθραυστών παράλληλα στην ακτή προσαρμοσμένοι για τους βυθισμένους κυματοθραύστες (Pilarczyk, 2003, DELOS, 2004).

Στη συνέχεια παρουσιάζονται για τις τρεις παραλίες (Σχήματα 2-4) μερικά από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και πιο συγκεκριμένα η απεικόνιση της τάσης εξέλιξης της ακτογραμμής στην υφιστάμενη κατάσταση, το πεδίο ταχυτήτων της κυματογενούς κυκλοφορίας για έναν από τους αντιπροσωπευτικούς ανέμους ανά περιοχή και τέλος η απεικόνιση της τάσης εξέλιξης της ακτογραμμής για την τελικά επιλεγείσα λύση.

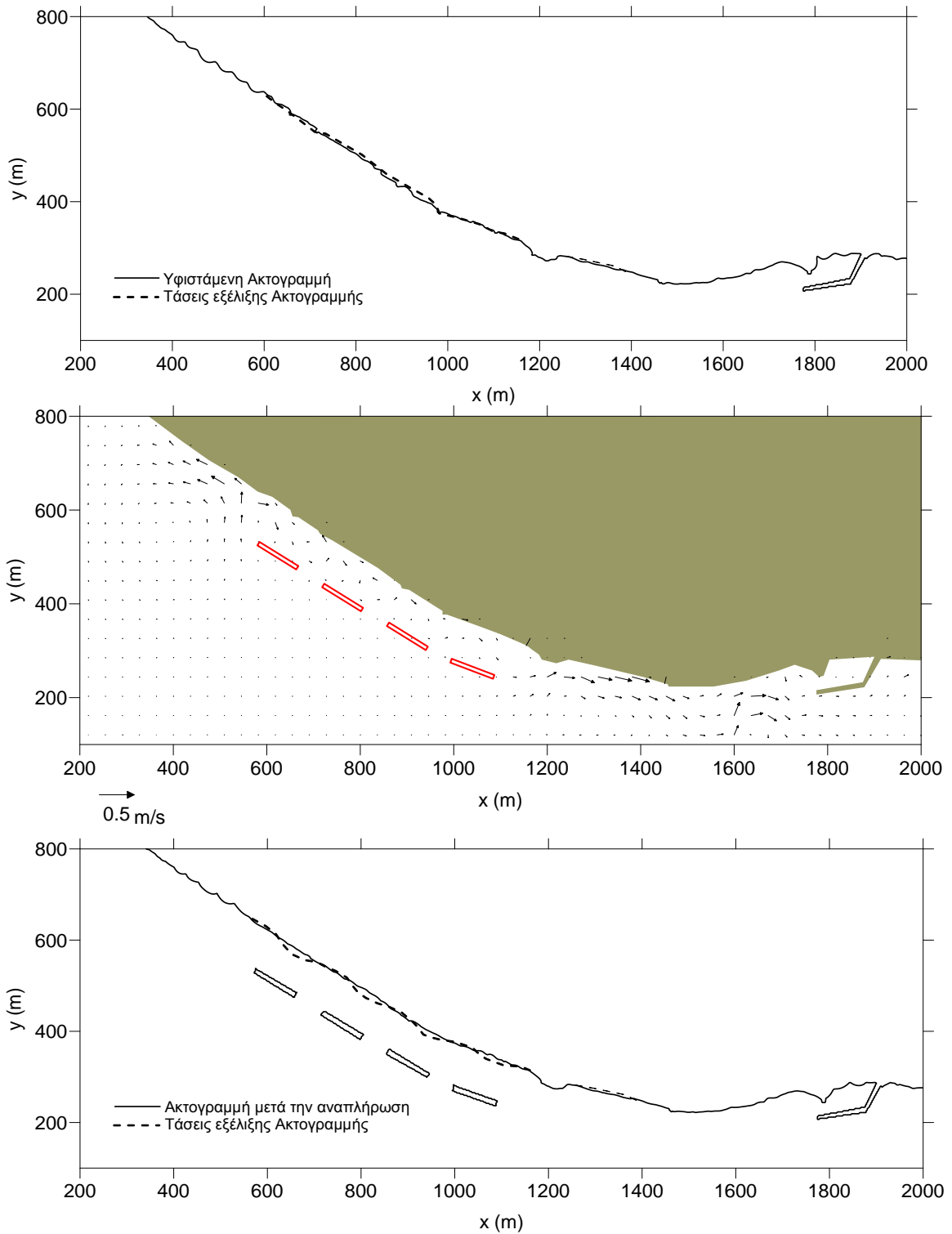
Πίνακας 3: Ίρια, Εφαρμογές - χαρακτηριστικά μεγέθη Βυθισμένων Κυματοθραυστών

Εφαρμογή ΥΚ	Βάθος στη θέση έργων (m)	Απόσταση μεταξύ Βυθισμένων Κυμα/τών (m)	Μήκος Βυθισμένου Κυμα/στη (m)	Αριθμός Βυθισμένων Κυμα/τών
Σενάριο 1	5,0	70	100	4
Σενάριο 2	5,0	40	270(1), 130(2)	3
Σενάριο 3	5,0	70	270, 300	2

**Σχήμα 2** Τολό, Τάση εξέλιξης ακτογραμμής στην υφιστάμενη κατάσταση, Πεδίο ταχυτήτων κυματογενούς κυκλοφορίας για τους ΝΑ ανέμους, Τάση εξέλιξης ακτογραμμής (Σενάριο 1)



Σχήμα 3 Παραλία Δρεπάνου, Τάση εξέλιξης ακτογραμμής στην υφιστάμενη κατάσταση, Πεδίο ταχυτήτων κυματογενούς κυκλοφορίας για τους Ν ανέμους, Τάση εξέλιξης ακτογραμμής (Σενάριο 1)



Σχήμα 4 Τρία, Τάση εξέλιξης ακτογραμμής στην υφιστάμενη κατάσταση, Πεδίο ταχυτήτων κυματογενούς κυκλοφορίας για τους Ν ανέμους, Τάση εξέλιξης ακτογραμμής (Σενάριο 1)

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τις μαθηματικές προσομοιώσεις και αναλύσεις προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα για την αντιμετώπιση των προβλημάτων που υφίστανται στις ακτές της Δημοτικής Ενότητας Ασίνης. Στην περιοχή του Τολού, η είσοδος της κυματικής ενέργειας γίνεται κυρίως από τους ΝΑ κυματισμούς, οι οποίοι είναι οι συχνότεροι και με το μεγαλύτερο μήκος αναπτύγματος. Όταν πνέουν ΝΑ άνεμοι δημιουργείται ισχυρό ρεύμα ΒΑ κατεύθυνσης στο παράκτιο τμήμα μεταξύ του τρίτου και του τέταρτου προβλήτα, που βρίσκονται ανατολικά του αλιευτικού καταφυγίου, προκαλώντας παράλληλη στην ακτή στερεομεταφορά κατά την ίδια κατεύθυνση. Η διαβρωτική τάση αναπτύσσεται στο τμήμα της ακτής μήκους 650 m που βρίσκεται στα βορειοανατολικά του τέταρτου προβλήτα, λόγω του ότι ο συγκεκριμένος προβλήτας ανακόπτει την παραπάνω στερεομεταφορά, οπότε το φαινόμενο στην περιοχή αυτή εξελίσσεται κυρίως εγκάρσια στην ακτογραμμή, με τους πυθμενικούς προβόλους να αδυνατούν να συγκρατήσουν αμμώδες υλικό. Από τις προτεινόμενες λύσεις εφαρμογής υιοθετείται το σενάριο 1 με την κατασκευή τεσσάρων βυθισμένων κυματοθραυστών μήκους 150m και σε απόσταση 60m μεταξύ τους, διότι αντιμετωπίζει ικανοποιητικά τα διαβρωτικά προβλήματα σε όλο το υπό προστασία τμήμα ακτής με πιο ομοιόμορφο και ικανοποιητικό τρόπο (διατήρηση μεγαλύτερου πλάτους ακτής σε μεγαλύτερο τμήμα της προστατευόμενης ακτής), συγκρινόμενο με τα σενάρια 2 και 3.

Στην περιοχή της Πλάκας Δρεπάνου στην περίπτωση των Ν ορμητικών ανέμων οι κυματισμοί έχουν μεγάλο ύψος, γεγονός που σε συνδυασμό με το ότι προσπίπτουν κάθετα στην ακτή έχει σαν αποτέλεσμα το ύψος της αναρρίχησης στα πρανή της παραλίας να είναι σημαντικό. Τα κυματογενή ρεύματα αναπτύσσονται παράλληλα στην ακτή και στις τρεις κατευθύνσεις ανέμων του Ν τομέα που την προσβάλλουν. Στους ΝΑ ανέμους το ρεύμα έχει μικρότερη ένταση και η κατεύθυνση του είναι νοτιοδυτική, αντίθετη με αυτή που παρατηρείται στους Ν και ΝΔ ανέμους. Στη δυτική πλευρά του τμήματος της ακτής που εξετάστηκε, παρατηρείται μια ήπια διαβρωτική τάση σε μήκος περίπου 150m. Από τις προτεινόμενες λύσεις εφαρμογής υιοθετείται το σενάριο 1 με την κατασκευή δύο βυθισμένων κυματοθραυστών μήκους 170m, σε απόσταση 60m μεταξύ τους σε βάθος έδρασης -5,0m, διότι αντιμετωπίζει πιο ομοιόμορφα και σταθεροποιεί την προστατευόμενη ακτή σε όλο της το μήκος, συγκρινόμενη με τα σενάρια 2 και 3.

Στην περιοχή των Ιρίων Η παράκτια κυματογενής κυκλοφορία αναπτύσσεται κυρίως παράλληλα στην ακτογραμμή, με φορά Ν-Β όταν πνέουν οι άνεμοι του νοτίου τομέα, που είναι και οι επικρατέστεροι στην περιοχή, είναι δε πιο έντονη στο βόρειο τμήμα της ακτής. Σε ένα σχετικά μεγάλο τμήμα της υπό μελέτη ακτής από το κέντρο της και βορειότερα, προβλέπεται υποχώρηση του μετώπου της ακτογραμμής. Από τις προτεινόμενες λύσεις εφαρμογής υιοθετείται το σενάριο 1 με την κατασκευή τεσσάρων βυθισμένων κυματοθραυστών μήκους 100m και σε απόσταση 70m μεταξύ τους, διότι αντιμετωπίζει ικανοποιητικά τα διαβρωτικά προβλήματα σε όλο το υπό προστασία τμήμα ακτής, χωρίς να δημιουργεί ιδιαίτερα προβλήματα στις γειτονικές ακτές, όπως εμφανίζεται στο βορειότερο τμήμα της ακτής στις περιπτώσεις των σεναρίων 2 και 3.

Και στις τρεις περιπτώσεις η εφαρμογή κατάλληλα σχεδιασμένων τεχνικών λύσεων που βασίζονται στην κατασκευή βυθισμένων κυματοθραυστών παράλληλων στην ακτογραμμή, σε συνδυασμό με την τεχνητή ανάπλαση των ακτών στο Τολό και τα Ίρια θα ανασχέσει τις διαβρωτικές τάσεις, σταθεροποιώντας τα μέτωπα των ακτών και συνακόλουθα παρέχοντας προστασία στις παράκτιες υποδομές. Παράλληλα, στα παραλιακά τμήματα που βρίσκονται στη «σκιά» των έργων αναμένεται ο σχηματισμός προεξοχών (salients) στην ακτογραμμή, οι όποιες δύναται να αξιοποιηθούν για χρήση από τους λουόμενους.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Copeland, G.J.M., 1985a. *A practical alternative to the «mild-slope» wave equation*. Coastal Engineering, 9, pp. 125-149.
- Copeland, G.J.M., 1985b. *Practical radiation stress calculations connected with equations of wave propagation*. Coastal Engineering, 9, pp. 195-219.
- DELOS, 2004. *Low Crested Structures design guideline*, έκθεση του ερευνητικού προγράμματος της Ε.Ε. DELOS, Coordinator H.F. Burcharth.
- Καραμπάς, Θ., 2004. *Υπολογιστική κυματομηχανική και ακτομηχανική – Θεωρητική προσέγγιση εκπαιδευτικό & επιχειρησιακό λογισμικό*, Τμήμα Επιστημών της Θάλασσας, Παν. Αιγαίου, Μυτιλήνη.
- Καραμπάς, Θ., Χριστόπουλος, Σ., Αυγέρης, Ι., 2011. *Ολοκληρωμένο μαθηματικό μοντέλο για το σχεδιασμό έργων προστασίας ακτών (HMAR-CPIM)*, 5^ο Παν. Συνέδριο Διαχείρισης και Βελτίωσης Παράκτιων Ζωνών, Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- Κουτίτας, Χ., 1985. *Μαθηματικά ομοιώματα στην Παράκτια Μηχανική*, Θεσσαλονίκη.
- Larson, M., and Wamsley, T.V., 2007. *A formula for longshore sediment transport in the wash*. Coastal Sediments '07, ASCE, New Orleans, pp. 1924–1937.
- Madsen, O., Tajima, Y., and Ebersole, B., 2003. *Longshore sediment transport: a realistic order-of-magnitude estimate*. Coastal Sediments '03, ASCE, Clearwater Beach, Florida, CDROM.
- Pilarczyk, K.W., 2003. *Design of low-crested (submerged) structures – an overview*. Proceedings 6th International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries, Colombo, Sri Lanka.

ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΠΑΡΑΚΤΙΑΣ ΖΩΝΗΣ ΤΟΥ ΣΤΡΥΜΟΝΙΚΟΥ ΚΟΛΠΟΥ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΜΙΑΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Ε.Κ. Οικονόμου, Ε. Γιαννακοπούλου, Αθ. Γείτονας

Τομέας Συγκοινωνιακών & Υδραυλικών Έργων
Τμήμα Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών Α.Π.Θ.
Πανεπιστημιούπολη Θεσσαλονίκη 54124
τηλ.: 2310 994360 e-mail: eoikonom@topo.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι παράκτιες ζώνες, συνήθως οικολογικά ευαίσθητες περιοχές, αποτελούν κύριες εστίες οικιστικής, οικονομικής, βιομηχανικής και τουριστικής ανάπτυξης, εξαιτίας των φυσικών χαρακτηριστικών τους και της υψηλής αισθητικής αξίας του τοπίου. Αποτέλεσμα των παραπάνω είναι η ρύπανση του παράκτιου χώρου με μεγάλες ποσότητες οργανικών φορτίων, λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων, αστικών λυμάτων και βιομηχανικών υγρών αποβλήτων που καταλήγουν τελικά στη θάλασσα, μέσω των υδάτινων αποδεκτών. Στην εργασία εξετάζεται η παράκτια ζώνη του Στρυμονικού Κόλπου, στην οποία προτείνονται εναλλακτικές μέθοδοι διαχείρισης. Η επιλογή της επικρατέστερης εναλλακτικής πρότασης γίνεται μέσω της διαδικασίας της πολυκριτηριακής ανάλυσης. Πιο συγκεκριμένα, εφαρμόζεται η Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία, προκειμένου οι εναλλακτικές λύσεις που προτείνονται να αξιολογηθούν και να ταξινομηθούν με τη χρήση οικονομικών, οικολογικών και κοινωνικών κριτηρίων, έτσι ώστε να επιτύχουμε μία ολοκληρωμένη διαχείριση της παράκτιας ζώνης.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: πολυκριτηριακή ανάλυση, ΑΗΡ, παράκτια ζώνη, Στρυμονικός Κόλπος

COASTAL ZONE MANAGEMENT OF STRYMONIKOS GULF WITH THE AID OF A MULTICRITERIA ANALYSIS METHOD

E. K. Oikonomou, E. Yiannakopoulou, A. Guitonas

Department of Transportation and Hydraulic Engineering
Faculty of Rural & Surveying Engineering, AUTH
AUTH Campus, Thessaloniki 54124
tel.: 2310 994360 e-mail: eoikonom@topo.auth.gr

ABSTRACT

The coastal zones, as ecologically sensitive areas, are considered as the main location of residential, financial, industrial and touristic development, due to their natural characteristics and the highly aesthetic value of the landscape. However, they are vulnerable to pollution by large quantities of organic matter, fertilizers and pesticides, urban and industrial wastewater, which eventually end up in the sea, through the aquatic recipients. In this paper, the examined area is the coastal zone of the Strymonikos Gulf, where alternative management tools are presented. The selection of the prevailing alternative proposal is made through the process of the multi-criteria analysis. More specifically, the method of Analytical Hierarchical Process is applied so that the suggested alternative solutions can be estimated and classified by using economic, ecological and social criteria, in order to achieve coastal zone integrated management.

KEYWORDS: multicriteria analysis, AHP, coastal zone management, Strymonikos Gulf

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι παράκτιες περιοχές προσφέρονται για οικιστική, τουριστική και γενικότερη οικονομική ανάπτυξη. Η οικιστική δραστηριότητα στον παράκτιο χώρο απαιτεί τις ουσιώδεις κατασκευές (κατοικίες), αλλά και τα σχετικά έργα υποδομής και υποστήριξης (μεταφορές, τηλεπικοινωνίες, ενέργεια, ύδρευση, επεξεργασία υγρών αποβλήτων και διαχείριση στερών αποβλήτων κ.α.) για τη διαβίωση του πληθυσμού. Στην παράκτια περιοχή υπάρχουν ή κατασκευάζονται λιμάνια, μαρίνες, μόλοι και αλιευτικά καταφύγια, ενώ συγχρόνως ο γειτονικός θαλάσσιος παράκτιος χώρος μπορεί να παρέχει ευκαιρίες για αναψυχή, ψάρεμα και ιχθυοκαλλιέργειες. Ο τουρισμός και η αναψυχή στις παράκτιες περιοχές είναι μια πολύ σημαντική οικονομική και όχι μόνο δραστηριότητα και ίσως αποτελεί το βασικότερο παράγοντα αλλαγών στην παράκτια ζώνη. Πέρα από τις καθαρές παραλίες και τα διαυγή νερά, απαιτούνται υποδομές και παροχή ποιοτικών υπηρεσιών στην περιοχή, ενώ η γενικότερη «πίεση» στον περιβάλλοντα χώρο είναι εξαιρετικά μεγάλη (Fabbri, 1998 και Kok κ.α., 2001). Η υψηλή συγκέντρωση πληθυσμού και δραστηριοτήτων είναι ο βασικός παράγοντας περιβαλλοντικής πίεσης στις παράκτιες ζώνες. Οι αναπτυξιακές διεργασίες των τελευταίων 40 ετών συνοδεύονται από μείζονες αλλαγές των παράκτιων οικοσυστημάτων και κοινωνιών, με αποτέλεσμα τον πολλαπλασιασμό των περιβαλλοντικών πιέσεων. Οικιακά, αγροτικά και βιομηχανικά λύματα και στερεά απόβλητα, ατμοσφαιρική ρύπανση και θόρυβος, ρύπανση από πετρελαιοκηλίδες, αποστραγγίσεις υγροτόπων, επιπτώσεις από δασικές πυρκαγιές, υπεράντληση των υπόγειων νερών, διάβρωση του εδάφους, κίνηση αυτοκινήτων και σκαφών, αλόγιστη δόμηση εξοχικών κατοικιών και τουριστικών εγκαταστάσεων, προσωρινή ή μόνιμη ελεύθερη κατασκήνωση, μηχανοκίνητη αναψυχή και ερασιτεχνική αλιεία συνιστούν ένα ευρύ φάσμα χαρακτηριστικών πιέσεων. Σε μεγάλο μέρος της παράκτιας ζώνης αναπτύσσονται εντατικές αγροτικές δραστηριότητες και ιχθυοκαλλιέργειες. Ακόμα, σημαντικά τμήματα ποτάμιων Δέλτα ή άλλων παράκτιων υγροτόπων παραδίδονται στην εντατική γεωργία (Αγγελίδης και Οικονόμου, 2005).

Ο ολοκληρωμένος σχεδιασμός για τις παράκτιες περιοχές (συμπεριλαμβανομένων των χρήσεων γης, των φυσικών πόρων και της διαχείρισης της ρύπανσης) πρέπει να επιλύσει τις συγκρούσεις που εμφανίζονται συχνά λόγω των οικιστικών, τουριστικών, βιομηχανικών, μεταφορικών, αγροτικών και ψυχαγωγικών δραστηριοτήτων που «συνωστίζονται» στις περιοχές αυτές. Ορισμένες τομεακά προσανατολισμένες χρήσεις μπορούν να συνυπάρξουν σε μια προσέγγιση πολλαπλών χρήσεων, ενώ άλλες θα πρέπει να περιοριστούν σοβαρά. Ο ρόλος της Ολοκληρωμένης Διαχείρισης των Παράκτιων Ζωνών είναι να εκτιμήσει τα αποτελέσματα του συνδυασμού διάφορων χρήσεων και να προτείνει ένα βέλτιστο συνδυασμό (Clark, 1996). Για το λόγο αυτόν, έχουν αναπτυχθεί διάφορες μεθοδολογίες, προκειμένου να βοηθήσουν τους μελετητές και τους αρμόδιους στη λήψη ορθών αποφάσεων. Μία από αυτές είναι και η Αναλυτική Ιεραρχική Μέθοδος, η οποία επιλέχθηκε από τους συγγραφείς, για να επιλύσει το πρόβλημα της βιώσιμης ανάπτυξης της παράκτιας ζώνης του Στρυμονικού Κόλπου, στα πλαίσια της Ολοκληρωμένης Διαχείρισης των Παράκτιων Ζωνών.

2. ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ – ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΙΕΡΑΡΧΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ

Με βάση τις ιδιαιτερότητες που παρουσιάζουν τα προβλήματα λήψης αποφάσεων με πολλαπλά κριτήρια, η πολυκριτήρια ανάλυση αποφάσεων έχει τρεις βασικούς στόχους: την ανάλυση της ανταγωνιστικής φύσης των κριτηρίων, τη μοντελοποίηση των προτιμήσεων του αποφασίζοντος και τον εντοπισμό ικανοποιητικών λύσεων. Ο «Roy» (1996) πρότεινε ένα γενικό μεθοδολογικό πλαίσιο για την επίτευξη αυτών των στόχων, με τα εξής στάδια: α) αντικείμενο της απόφασης, β) συνεπής οικογένεια κριτηρίων, γ) μοντέλο ολικής προτίμησης και δ) υποστήριξη της απόφασης.

Στο πρώτο στάδιο καθορίζεται το σύνολο των εναλλακτικών δραστηριοτήτων και η προβληματική της ανάλυσης. Υπάρχουν τέσσερις προβληματικές που καλύπτουν τις πρακτικές περιπτώσεις (Roy, 1996):

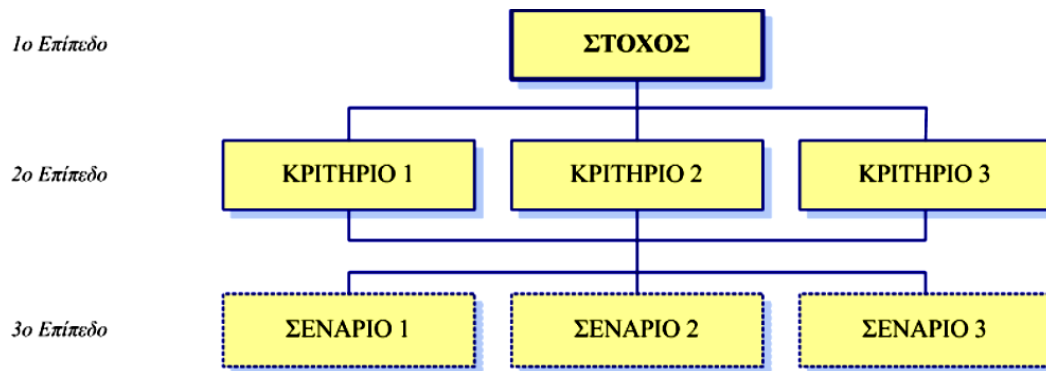
- Η προβληματική τύπου «α» αναφέρεται στην επιλογή μίας ή περισσότερων εναλλακτικών, οι οποίες θεωρούνται ως οι πιο κατάλληλες («choice»).
- Η προβληματική «β» αναφέρεται στην ταξινόμηση των εναλλακτικών σε προκαθορισμένες ομοιογενείς κατηγορίες («classification/sorting»).
- Η προβληματική «γ» αναφέρεται στην κατάταξη των εναλλακτικών δραστηριοτήτων, ξεκινώντας από τις καλύτερες («ranking»).
- Τέλος, η προβληματική «δ» αναφέρεται στην περιγραφή των εναλλακτικών, με βάση τα επιμέρους κριτήρια αξιολόγησης («description»).

Στο δεύτερο στάδιο καθορίζεται μία συνεπής οικογένεια κριτηρίων. Τα κριτήρια μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής: στα αντικειμενικά κριτήρια, τα οποία περιγράφονται πλήρως από έναν αριθμό και στα υποκειμενικά κριτήρια, τα οποία μπορούν να περιγραφούν μόνο ποιοτικά και με λεκτικές εκφράσεις όπως «πολύ καλά», «μέτρια» κ.α. (Liang and Wang, 1991).

Το επόμενο στάδιο περιλαμβάνει την κατασκευή και χρήση ενός μοντέλου ολικής προτίμησης, το οποίο θεωρείται η σύνθεση όλων των κριτηρίων, έτσι ώστε να ολοκληρωθεί ο στόχος της ανάλυσης, με βάση την προβληματική που έχει οριστεί. Το μοντέλο χρησιμοποιείται ως βάση για: τον προσδιορισμό μίας συνολικής αξιολόγησης κάθε εναλλακτικής, την πραγματοποίηση διμερών συγκρίσεων μεταξύ των εναλλακτικών και τη διεύρυνση του συνόλου των εναλλακτικών (σε συνεχές σύνολο). Η ανάπτυξή του γίνεται με δύο τρόπους, αλληλεπιδραστικά, μέσω συνεργασίας του αναλυτή και του αποφασίζοντα ή με ανάλυση των αποφάσεων που λαμβάνει ο αποφασίζων, έτσι ώστε να αναπτυχθεί το κατάλληλο μοντέλο που είναι συμβατό με την πολιτική λήψης των αποφάσεων που ακολουθεί ο αποφασίζων (Roy, 1996).

Η Αναλυτική Ιεραρχική Μέθοδος («AHP») είναι μία μέθοδος πολυκριτηριακής ανάλυσης που αναπτύχθηκε από το «Saaty» στις αρχές της δεκαετίας του 1980. Χρησιμοποιείται παγκοσμίως σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, στις οποίες πολλές εναλλακτικές δραστηριότητες προτείνονται για την επίτευξη ενός σκοπού υπό αλληλοσυγκρουόμενα κριτήρια (Kamal, 1999). Το κύριο πλεονέκτημα της «AHP» είναι ότι μπορεί να εφαρμοστεί για την εξαγωγή εκτιμήσεων, οι οποίες αφορούν τόσο σε ποιοτικά, αλλά και σε ποσοτικά στοιχεία (Badri, 1999). Η «AHP» αναλύεται σε τέσσερα στάδια: α) στην ιεραρχική ανάλυση του προβλήματος απόφασης σε στοιχεία απόφασης, β) στη συλλογή προτιμήσεων του αποφασίζοντα σχετικά με τα στοιχεία απόφασης, γ) στον υπολογισμό των επιμέρους προτεραιοτήτων (βαρών) για τα στοιχεία απόφασης και δ) στη σύνθεση των επιμέρους προτεραιοτήτων σε γενικές προτεραιότητες των εναλλακτικών λύσεων. Τα δύο πρώτα στάδια πραγματοποιούνται με τη συμμετοχή του αποφασίζοντα (στάδια απόφασης), ενώ τα δύο τελευταία είναι καθαρά υπολογιστικά.

Το 1^ο στάδιο της αναλυτικής ιεραρχικής μεθόδου είναι αρκετά σημαντικό, γιατί καθορίζει την ποιότητα των αποτελεσμάτων στη συνέχεια. Σε αυτό το στάδιο, λοιπόν, το πρόβλημα αναλύεται σε μία ιεραρχική δομή. Στην κορυφή της ιεραρχικής δομής, η οποία είναι σε μορφή δέντρου, τοποθετείται ο απώτερος στόχος, ενώ στο τελευταίο επίπεδο της ιεραρχίας βρίσκονται οι εναλλακτικές λύσεις. Είναι προφανές ότι οι εναλλακτικές λύσεις θα ήταν αδύνατο να συγκριθούν ως προς ένα τόσο γενικό στόχο. Για το λόγο αυτόν, γίνεται μία περαιτέρω ανάλυσή του σε επιμέρους υποστόχους (κριτήρια), οι οποίοι με τη σειρά τους αναλύονται περαιτέρω στα πρότυπα μίας ιεραρχικής δομής μέχρις ότου να μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά για τη σύγκριση των εναλλακτικών σεναρίων (Δεσπότης, 2002).



Σχήμα 1: Ιεραρχικό μοντέλο απόφασης τριών επιπέδων.

Στο 2^ο στάδιο συγκρίνονται κατά ζεύγη τα στοιχεία κάθε επιπέδου της ιεραρχικής δομής, ως προς το βαθμό προτίμησης του ενός έναντι του άλλου, σε σχέση με το κριτήριο του αμέσως ανώτερου επιπέδου. Δημιουργούνται πίνακες κατά ζεύγη συγκρίσεων, των οποίων ο αριθμός ταυτίζεται με τον αριθμό των κόμβων του δέντρου, με εξαίρεση τις εναλλακτικές λύσεις. Για να μπορέσουν να πραγματοποιηθούν οι συγκρίσεις των κριτηρίων ανά ζεύγη, με αναφορά στο στόχο και των εναλλακτικών ανά ζεύγη και με αναφορά στα κριτήρια σε όλες τις βαθμίδες, είναι απαραίτητη μία αριθμητική κλίμακα, που υποδεικνύει πόσες φορές πιο σημαντικό και ισχυρό είναι το ένα στοιχείο σε σχέση με το άλλο, με το οποίο συγκρίνεται (βλ. Πίνακα 1). Στο 3^ο στάδιο, υπολογίζονται, για κάθε πίνακα συγκρίσεων, τα σχετικά βάρη «w» των συγκρινόμενων στοιχείων απόφασης. Στο 4^ο στάδιο, συνθέτονται τα βάρη των στοιχείων, που υπολογίστηκαν από τους επιμέρους πίνακες συγκρίσεων κατά ζεύγη, σε γενικές προτεραιότητες των εναλλακτικών λύσεων, ως προς τον απώτερο στόχο (Δεσπότης, 2002).

Πίνακας 1 : Αριθμητική συγκριτική κλίμακα «Saaty» (1986).

Ένταση προτίμησης	Ορισμός	Εξήγηση
1	Ίση προτίμηση.	Δύο δραστηριότητες συνεισφέρουν εξίσου στο στόχο.
3	Ασθενής προτίμηση ενός στοιχείου πάνω σε άλλο.	Η εμπειρία και η κρίση ευνοούν ελαφρώς μία δραστηριότητα αντί της άλλης.
5	Ισχυρή προτίμηση ενός στοιχείου πάνω σε άλλο.	Η εμπειρία και η κρίση ευνοούν σθεναρά μία δραστηριότητα αντί της άλλης.
7	Πολύ ισχυρή προτίμηση.	Μία δραστηριότητα ευνοείται σθεναρά και η κυριαρχία της εκδηλώνεται στην πράξη.
9	Μέγιστη προτίμηση.	Οι ενδείξεις που ευνοούν τη μία δραστηριότητα αντί της άλλης είναι του υψηλότερου δυνατού βαθμού
2, 4, 6, 8	Ενδιάμεσες τιμές ανάμεσα σε δύο παρακείμενες κρίσεις.	Όταν απαιτείται συμβιβασμός.

3. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ «ΑΗΡ» ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΖΩΝΗ ΤΟΥ ΣΤΡΥΜΟΝΙΚΟΥ

3.1. Η ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΤΟΥ ΣΤΡΥΜΟΝΙΚΟΥ ΚΟΛΠΟΥ

Η περιοχή μελέτης υπάγεται διοικητικά σε δύο Περιφέρειες, ενώ περιλαμβάνει τμήματα τεσσάρων Περιφερειακών Ενοτήτων. Πιο συγκεκριμένα, η περιοχή μελέτης περιλαμβάνει τμήματα των Π.Ε. Θεσσαλονίκης, Σερρών και Χαλκιδικής της Περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας, καθώς και τμήμα της Π.Ε. Καβάλας της Περιφέρειας Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης. Για τον προσδιορισμό των εναλλακτικών προτάσεων διαχείρισης του

Στο επόμενο επίπεδο της ιεραρχικής δομής καθορίζονται τα κριτήρια που θα χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση των εναλλακτικών σεναρίων, τα οποία είναι οικονομικά, κοινωνικά και περιβαλλοντικά. Έπειτα, τα κριτήρια αυτά αναλύονται σε επιμέρους υποκριτήρια, με σκοπό να μειωθεί η πολυπλοκότητα του προβλήματος όπως φαίνεται στον πίνακα, που ακολουθεί:

Πίνακας 2: Τα κριτήρια και τα υποκριτήρια του προβλήματος απόφασης.

Κριτήρια	Οικονομικά	Κοινωνικά	Περιβαλλοντικά
Υποκριτήρια	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Οικονομική ανάπτυξη ▪ Κόστος εφαρμογής 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Καταπολέμηση ανεργίας ▪ Κοινωνική αποδοχή ▪ Ποιότητα ζωής 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ποσότητα επιφανειακών υδάτων ▪ Ποιότητα επιφανειακών υδάτων ▪ Ποσότητα υπόγειων υδάτων ▪ Ποιότητα υπόγειων υδάτων ▪ Ρύπανση αέρα ▪ Ηχορύπανση ▪ Κατανάλωση φυσικών πόρων

Αφού καθορίστηκαν ο απώτερος στόχος, τα κριτήρια και τα υποκριτήρια μένει να οριστούν και τα εναλλακτικά σενάρια ανάπτυξης για την περιοχή μελέτης, τα οποία αποτελούν και το τελευταίο επίπεδο της ιεραρχικής δομής. Οι εναλλακτικές προτάσεις που πραγματοποιούνται, είναι υποθετικές και στηρίζονται στις επιτρεπόμενες χρήσεις για τις διάφορες περιοχές, όπως παρουσιάζονται στα εγκεκριμένα και υπό εκπόνηση χωροταξικά σχέδια των Δήμων της περιοχής. Από αυτές τις επιτρεπόμενες χρήσεις επιλέχθηκαν αυτές που σχετίζονται κυρίως με την ανάπτυξη. Ακολουθεί η αναλυτική διατύπωση των προτάσεων για κάθε σενάριο:

3.2.1.Σενάριο 1 – Έμφαση στην ανάπτυξη του τουρισμού, του εμπορίου, του πρωτογενούς και του δευτερογενούς τομέα παραγωγής.

Η ανάπτυξη δραστηριοτήτων του πρωτογενούς τομέα παραγωγής προβλέπεται στις περιοχές γεωργικής γης με επιτρεπόμενες χρήσεις γης και δραστηριότητες τις υποδομές και εγκαταστάσεις γεωργικής, γεωργοκτηνοτροφικής-πτηνοτροφικής παραγωγής, την κατοικία για όσους ασχολούνται με τον πρωτογενή τομέα παραγωγής και τις εγκαταστάσεις και τα δίκτυα τεχνικής υποδομής. Επίσης, στις περιοχές δασικών εκτάσεων προτείνεται προώθηση της κτηνοτροφίας, καθώς και των μελισσοκομείων. Όσον αφορά στην ανάπτυξη δραστηριοτήτων του δευτερογενούς τομέα παραγωγής αλλά και του εμπορίου, αρχικά, προτείνεται η δημιουργία ολοκληρωμένων ζωνών παραγωγικών δραστηριοτήτων σε τρεις περιοχές, μία βόρεια της οδού προς Βρασνά, μία δυτικά της Ολυμπιάδας και μία περιοχή εκατέρωθεν της επαρχιακής οδού Νέας Μαδύτου–Βαρβάρας. Σε αυτές θα περιλαμβάνονται βιομηχανικές–βιοτεχνικές μονάδες και επαγγελματικά εργαστήρια χαμηλής και μέσης όχλησης, εγκαταστάσεις χονδρικού εμπορίου, αποθήκευσης και διαμετακόμισης, καταστήματα και γραφεία για την εξυπηρέτηση των παραγωγικών μονάδων της περιοχής, καταστήματα εστίασης και αναψυχής, γήπεδα στάθμευσης, καθώς και εγκαταστάσεις εμπορικών εκθέσεων και καταστημάτων. Παράλληλα, στις ιδιοκτησίες μη δασικού χαρακτήρα στις δασικές περιοχές, προτείνονται βιοτεχνικές εγκαταστάσεις και επαγγελματικά εργαστήρια χαμηλής όχλησης, όταν έχουν συνάφεια με την τοπική δασική, γεωργική, ζωική παραγωγή, τη μελισσοκομία, την παραγωγή τοπικών παραδοσιακών προϊόντων, καθώς και εκθετήρια-σημεία πώλησης των ανωτέρω τοπικών προϊόντων. Η

ανάπτυξη δραστηριοτήτων τουρισμού και αναψυχής προβλέπεται στις παράκτιες περιοχές και συγκεκριμένα στην Ασπροβάλτα, στην Παραλία Οφρυνίου, και στην Κάρυανη. Προτείνεται η δημιουργία ξενοδοχείων ή τουριστικών καταλυμάτων κάθε είδους, δυναμικότητας μέχρι 150 κλινών, χώροι οργανωμένης κατασκήνωσης, εγκαταστάσεις αναψυχής, υπαίθριες αθλητικές εγκαταστάσεις, καθώς και εμπορικά καταστήματα. Επίσης, προτείνονται εγκαταστάσεις ειδικής τουριστικής υποδομής (συνεδριακά κέντρα, κέντρα αθλητικού τουρισμού κ.λπ.) και εγκαταστάσεις εξυπηρέτησης λουόμενων στην Παραλία Οφρυνίου και ένας τουριστικός λιμένας στην Ασπροβάλτα.

Τέλος, στις περιοχές προστασίας προτείνονται πολύ συγκεκριμένες δραστηριότητες, καθώς αφορούν σε ευαίσθητα οικοσυστήματα, που διέπονται από ένα ιδιαίτερο καθεστώς. Στην παρόχθια περιοχή της λίμνης Βόλβης, προτείνεται η εγκατάσταση ελαφριάς υποδομής (φυλάκια, επιστημονικός εξοπλισμός, ξύλινα καθιστικά, παρατηρητήρια κ.λπ.). Επιπλέον, προτείνεται η ανάπτυξη της γεωργίας και της δενδροκαλλιέργειας στις περιοχές γεωργικής γης, που βρίσκονται εντός των ορίων των ζωνών προστασίας, με ορθολογική όμως χρήση λιπασμάτων και φαρμάκων. Ταυτόχρονα, στην περιοχή προτείνεται η χρήση των λιμναίων οικοσυστημάτων ως ιχθυοτροφεία και η λειτουργία και συντήρηση της υφιστάμενης ιχθυοσυλλεπτικής εγκατάστασης στο Ρήχιο ποταμό. Στην περιφερειακή περιοχή προτείνεται η εγκατάσταση και η λειτουργία νέων μικρών μονάδων υδατοκαλλιέργειών, μεταποιητικών μονάδων αγροτικών προϊόντων (ισχύος μικρότερης από 15 ίππους), βιώσιμων πτηνοκτηνοτροφικών μονάδων, καθώς και η δημιουργία κατασκηνώσεων, σε συνδυασμό με χώρους υπαίθριας άθλησης κοντά στη Νέα Απολλωνία και κοντά στη Ρεντίνα.

3.2.2. Σενάριο 2 – Έμφαση στην ανάπτυξη εναλλακτικών μορφών τουρισμού και στη βιολογική παραγωγή.

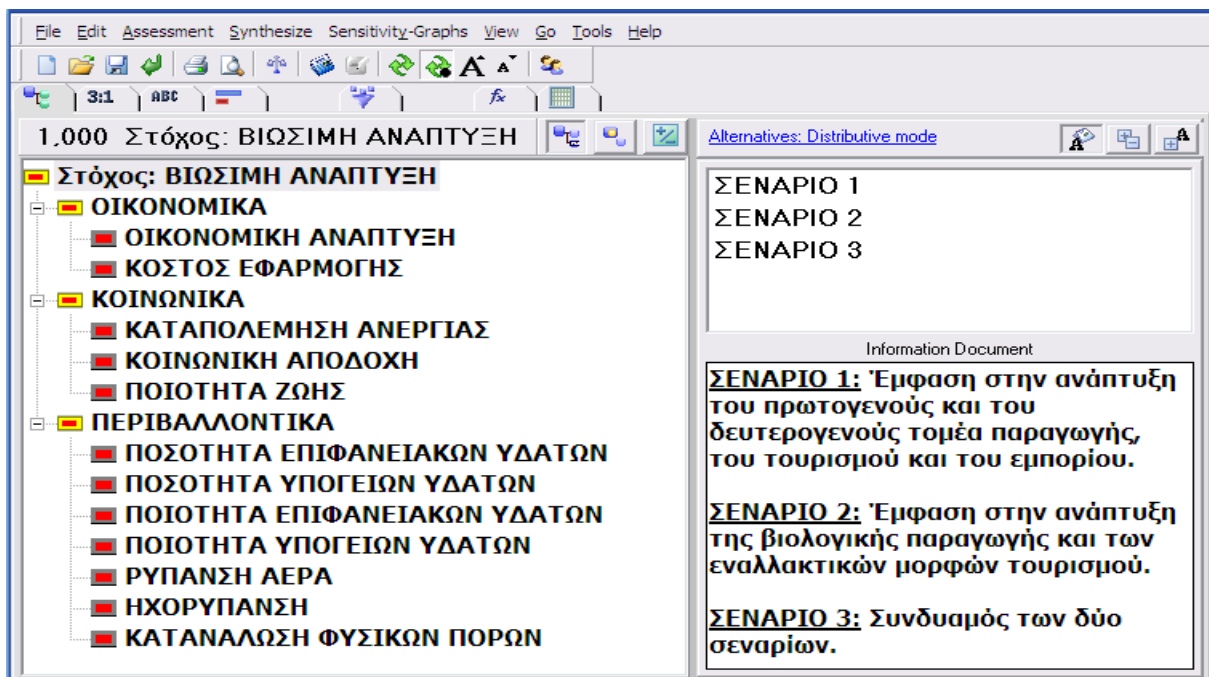
Η ανάπτυξη εναλλακτικών μορφών τουρισμού προτείνεται στη Δημοτική Ενότητα Αρέθουσας. Στις περιοχές που βρίσκονται εντός δασικών εκτάσεων, προτείνεται η δημιουργία εγκαταστάσεων για την υπαίθρια δασική αναψυχή, με ήπιες διαμορφώσεις του χώρου, με ελαφρές, μη μόνιμες εγκαταστάσεις, (ξύλινα ημιυπαίθρια περίπτερα, κίосκια καθιστικά, μονοπάτια, παρατηρητήρια θέας κ.λπ.), που αποσκοπούν στην ανάπτυξη του περιηγητικού και αρχαιολογικού τουρισμού. Στις ιδιοκτησίες μη δασικού χαρακτήρα προτείνεται η ίδρυση και λειτουργία αγροτουριστικών εγκαταστάσεων δυναμικότητας 80 κλινών, λοιπών τουριστικών εγκαταστάσεων και δικτύων και εγκαταστάσεων τεχνικής υποδομής, κτιρίων εστίασης και αναψυχής, ήπιου όμως χαρακτήρα. Τέλος, προτείνεται η δημιουργία μίας αρχαιολογικής διαδρομής με πλωτό μέσο στον ποταμό Στρυμόνα, που θα ξεκινά από τις εκβολές του ποταμού και το λιμάνι (αλιευτικό καταφύγιο) και θα φτάνει μέχρι τον αρχαιολογικό χώρο της Αμφίπολης, ώστε να αποτελέσει εναλλακτική πρόταση τουριστικής διαδρομής. Στον πρωτογενή τομέα προτείνεται ό,τι και στο Σενάριο 1, αλλά με εναλλακτικές μορφές παραγωγής και συγκεκριμένα, στις γεωργικές περιοχές και στις γεωργικές περιοχές υψηλής παραγωγικότητας συνιστάται η βιολογική παραγωγή. Επίσης, προτείνεται η ολοκληρωμένη διαχείριση των αποβλήτων, όπως π.χ. παραγωγή βιοαερίου από την αναερόβια χώνευση κτηνοτροφικών αποβλήτων, μέσω αποκεντρωμένων συστημάτων και γενικότερα η κατασκευή δικτύων τεχνικής υποδομής. Τέλος, στις περιοχές δασικών εκτάσεων προτείνονται εγκαταστάσεις μελισσοκομείων για βιολογική παραγωγή μελιού. Στις περιοχές προστασίας για την ανάπτυξη εναλλακτικών μορφών τουρισμού συνιστώνται ό,τι και στο Σενάριο 1 εκτός από τις παρακάτω περιπτώσεις: στην παρόχθια περιοχή της λίμνης Βόλβης προτείνεται η χρήση των λιμναίων οικοσυστημάτων για βιολογική υδατοκαλλιέργεια, στο Ρήχιο ποταμό προτείνεται η εγκατάσταση και η λειτουργία νέων μικρών μονάδων βιολογικής υδατοκαλλιέργειας, βιώσιμων βιολογικών πτηνοκτηνοτροφικών μονάδων, καθώς και η άσκηση της μελισσοκομίας για βιολογική παραγωγή μελιού στις δασικές περιοχές.

3.2.3. Σενάριο 3 – Συνδυασμός των δύο Σεναρίων 1 και 2.

Το τρίτο σενάριο διατυπώθηκε με σκοπό να συνδυάσει τις προτάσεις, που έγιναν στο πρώτο και στο δεύτερο σενάριο. Με τον τρόπο αυτόν, προωθεί μία πολύπλευρη ανάπτυξη της περιοχής, περιλαμβάνοντας μία περισσότερο ισόρροπη ανάπτυξη και των τριών τομέων παραγωγής. Συγκεκριμένα προτείνει μία ήπια ανάπτυξη του πρωτογενούς τομέα, εντάσσοντας και την βιολογική παραγωγή, μία ήπια ανάπτυξη του δευτερογενούς τομέα, ενθαρρύνοντας τη δημιουργία βιομηχανικών-βιοτεχνικών εγκαταστάσεων, που λείπουν από την περιοχή, ενώ ταυτόχρονα στοχεύει στην ολοκληρωμένη ανάπτυξη του τουρισμού, προωθώντας και τον εναλλακτικό τουρισμό στις ορεινές περιοχές, οι οποίες μέχρι τώρα αποτελούν ανεκμετάλλευτους πόρους. Ταυτόχρονα, σέβεται αρκετά το περιβάλλον και τα ευαίσθητα οικοσυστήματα της περιοχής. Πρόκειται, λοιπόν, για ένα αρκετά ισορροπημένο σενάριο, που προσαρμόζεται πολύ καλά στα δεδομένα της περιοχής, φροντίζοντας για την ανάπτυξή της, αλλά μεριμνώντας ταυτόχρονα και για το περιβάλλον.

3.3. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ «EXPERT CHOICE»

Το λογισμικό «Expert Choice» είναι ένα πολυκριτήριο σύστημα λήψης απόφασης, που στηρίζεται στη Μέθοδο της Αναλυτικής Ιεράρχησης (ΑΗΡ). Σύμφωνα με τον «Saaty» (κατασκευαστή του «EC» και εμπνευστή της «ΑΗΡ»), τα βήματα που ακολουθούνται στην «ΑΗΡ» και στο λογισμικό, είναι τα εξής: ορισμός του προβλήματος • σύνθεση της απόφασης στη μορφή του μοντέλου ιεράρχησης • εισαγωγή δεδομένων • σύγκριση όλων των κριτηρίων ανά ζεύγος, σε σχέση με το στόχο και των υποκριτηρίων σε σχέση με τα κριτήρια • σύγκριση κάθε εναλλακτικής λύσης ανά ζεύγος, σε σχέση με κάθε υποκριτήριο, με τη βοήθεια κατάταξης, ανάλογα με το βαθμό προτίμησης του κάθε εναλλακτικού σεναρίου • και σύνθεση όλων των παραπάνω συγκρίσεων, με στόχο τον καθορισμό της καλύτερης εναλλακτικής λύσης. Πρώτα εισάγονται τα δεδομένα στο λογισμικό, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2:



Εικόνα 2: Το αρχικό στάδιο εισαγωγής του στόχου, των κριτηρίων, των υποκριτηρίων και των εναλλακτικών σεναρίων.

Στη συνέχεια πραγματοποιούμε τις κατά ζεύγη συγκρίσεις. Αρχικά, βαθμολογούμε τα κριτήρια ανά ζεύγη, με αναφορά στο στόχο, στη συνέχεια τα υποκριτήρια με αναφορά στα κριτήρια και τέλος, τα εναλλακτικά σενάρια ανά ζεύγη, με αναφορά στα υποκριτήρια, υποδεικνύοντας κάθε φορά, πόσες φορές πιο σημαντικό και ισχυρό είναι το ένα στοιχείο σε σχέση με το άλλο με το οποίο συγκρίνεται. Αυτό γίνεται με τη βοήθεια της αριθμητικής κλίμακας του «Saaty», στην οποία αναφερθήκαμε παραπάνω. Όσον αφορά στη σύγκριση των εναλλακτικών σεναρίων σε σχέση με τα υποκριτήρια υπήρξαν οι βαθμολογίες που παρουσιάζονται στον Πίνακα 3. Όσον αφορά στη σύγκριση των υποκριτηρίων σε σχέση με τα κριτήρια, θεωρήθηκε ότι ο βαθμός συμμετοχής των υποκριτηρίων ως προς τα αντίστοιχα κριτήρια είναι ο ίδιος και για αυτό βαθμολογήθηκαν με «1». Τέλος, το ίδιο ισχύει και στη σύγκριση των κριτηρίων σε σχέση με τον απώτερο στόχο που είναι η βιώσιμη ανάπτυξη, θεωρώντας ότι ο βαθμός συμμετοχής των κριτηρίων για την επίτευξη του απώτερου στόχου είναι ο ίδιος και για αυτό βαθμολογήθηκαν με «1», όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.

Πίνακας 3: Βαθμολογία σεναρίων σε σχέση με τα υποκριτήρια.

<u>ΑΠΑΣΧΟΛΗΣΗ</u>					<u>ΚΟΙΝΩΝΙΚΗ ΑΠΟΔΟΧΗ</u>					<u>ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΖΩΗΣ</u>				
	E1	E2	E3	W		E1	E2	E3	W		E1	E2	E3	W
E1	1	6	2	0,577	E1	1	2	5	0,113	E1	1	3	6	0,091
E2		1	5	0,081	E2		1	5	0,179	E2		1	4	0,218
E3			1	0,342	E3			1	0,709	E3			1	0,691

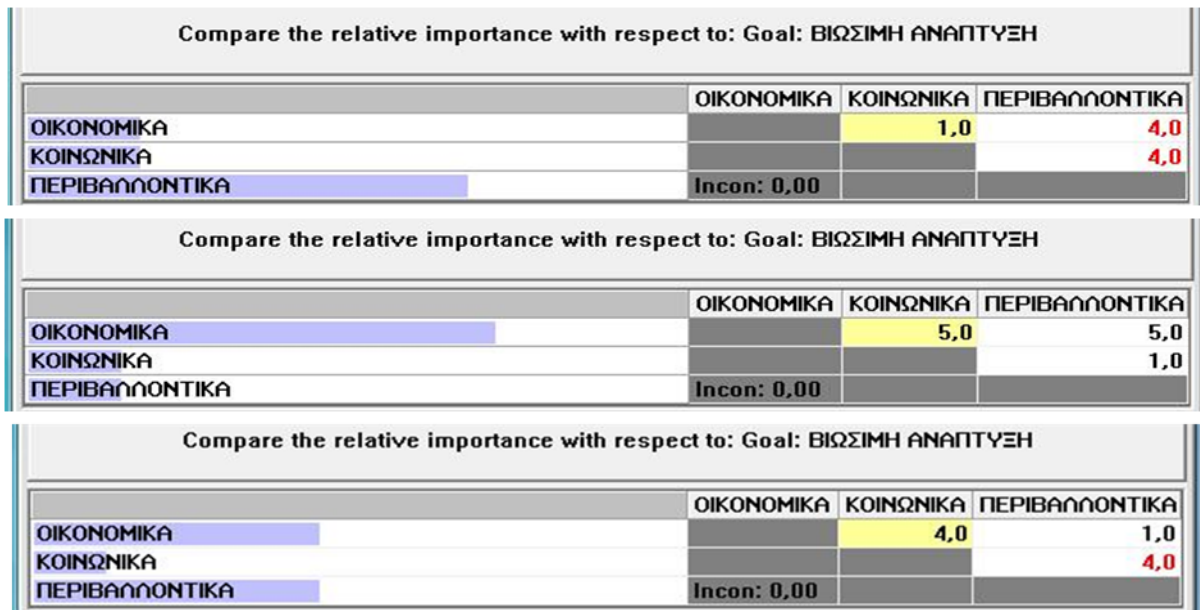
<u>ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗ</u>					<u>ΚΟΣΤΟΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ</u>				
	E1	E2	E3	W		E1	E2	E3	W
E1	1	6	2	0,577	E1	1	4	3	0,117
E2		1	5	0,081	E2		1	3	0,614
E3			1	0,342	E3			1	0,268

<u>ΠΟΣΟΤ ΕΠΙΦ ΥΔΑΤ</u>					<u>ΠΟΙΟΤ ΕΠΙΦ ΥΔΑΤ</u>					<u>ΠΟΣΟΤ ΥΠΟΓ ΥΔΑΤ</u>					<u>ΠΟΙΟΤ ΥΠΟΓ ΥΔΑΤ</u>				
	E1	E2	E3	W		E1	E2	E3	W		E1	E2	E3	W		E1	E2	E3	W
E1	1	4	2	0,137	E1	1	5	3	0,105	E1	1	4	2	0,137	E1	1	5	3	0,105
E2		1	3	0,625	E2		1	3	0,637	E2		1	3	0,625	E2		1	3	0,637
E3			1	0,238	E3			1	0,258	E3			1	0,238	E3			1	0,258

<u>ΚΑΤΑΝ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ</u>					<u>ΡΥΠΑΝΣΗ ΑΕΡΑ</u>					<u>ΗΧΟΡΥΠΑΝΣΗ</u>				
	E1	E2	E3	W		E1	E2	E3	W		E1	E2	E3	W
E1	1	4	3	0,117	E1	1	5	3	0,105	E1	1	4	3	0,117
E2		1	3	0,614	E2		1	3	0,637	E2		1	3	0,614
E3			1	0,268	E3			1	0,258	E3			1	0,268

Compare the relative importance with respect to: Goal: ΒΙΩΣΙΜΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗ			
	ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ	ΚΟΙΝΩΝΙΚΑ	ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ
ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ		1,0	1,0
ΚΟΙΝΩΝΙΚΑ			1,0
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ	Incon: 0,00		

Εικόνα 3: Βαθμολογία κριτηρίων σε σχέση με τον απώτερο στόχο



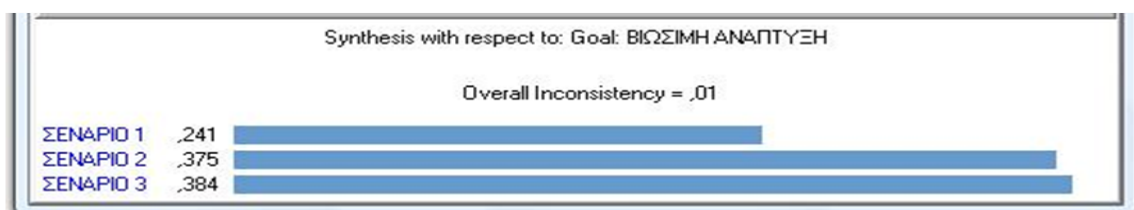
Εικόνα 4: Βαθμολογία κριτηρίων σε σχέση με τον απώτερο στόχο της βιώσιμης ανάπτυξης.

Στη συνέχεια, διατηρώντας σταθερές τις βαθμολογίες των εναλλακτικών σεναρίων σε σχέση με τα υποκριτήρια και των υποκριτηρίων σε σχέση με τα κριτήρια, έγινε η σύγκριση των κριτηρίων σε σχέση με τον απώτερο στόχο, που είναι η βιώσιμη ανάπτυξη, με τρεις διαφορετικές βαθμολογίες (βλ. Εικόνα 4). Στην πρώτη περίπτωση θεωρήσαμε σημαντικότερα τα περιβαλλοντικά κριτήρια, στη δεύτερη τα οικονομικά, ενώ στην τρίτη θεωρήσαμε ότι τα οικονομικά και τα περιβαλλοντικά κριτήρια είναι σημαντικότερα από τα κοινωνικά.

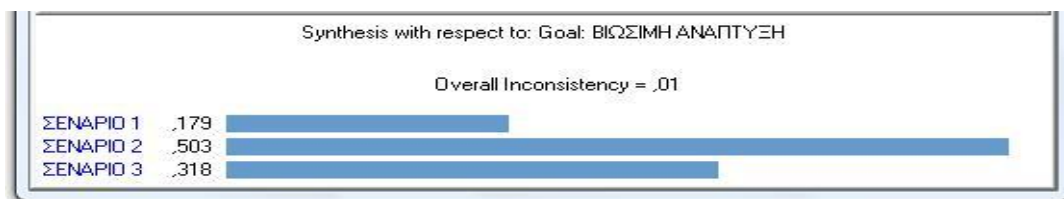
3.4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στη συνέχεια, γίνεται η σύνθεση όλων των παραπάνω συγκρίσεων και παρουσιάζονται τα βάρη που προέκυψαν από αυτές και χρησιμοποιήθηκαν εν τέλει για τον καθορισμό της καλύτερης εναλλακτικής λύσης με βάση τις αναμενόμενες επιπτώσεις. Στις παρακάτω Εικόνες 5, 6, 7 και 8 παρουσιάζεται η κατάταξη των εναλλακτικών σεναρίων και η τελική τους βαθμολογία, όπως προκύπτουν ως αποτελέσματα του λογισμικού.

Στην πρώτη περίπτωση ως καταλληλότερο εναλλακτικό σενάριο προέκυψε το Σενάριο 3, στη συνέχεια ακολουθεί με μικρή διαφορά το Σενάριο 2 και τέλος, το Σενάριο 1. Επίσης, ο συνολικός δείκτης ασυνέπειας είναι αποδεκτός. Στη δεύτερη περίπτωση, ως καταλληλότερο εναλλακτικό σενάριο προέκυψε το Σενάριο 2 και με μεγάλη διαφορά από τα υπόλοιπα. Στη συνέχεια, ακολουθούν το Σενάριο 3 και τέλος, το Σενάριο 1. Επίσης, ο συνολικός δείκτης ασυνέπειας είναι αποδεκτός. Στην τρίτη περίπτωση, ως καταλληλότερο εναλλακτικό σενάριο προέκυψε το Σενάριο 2, ενώ ακολουθούν με μικρές διαφορές τα Σενάρια 3 και 1.



Εικόνα 5: Τελική βαθμολογία σεναρίων σε σχέση με τον απώτερο στόχο της βιώσιμης ανάπτυξης.



Εικόνα 6: Τελική βαθμολογία σεναρίων σε σχέση με τον απώτερο στόχο της βιώσιμης ανάπτυξης.



Εικόνα 7: Τελική βαθμολογία σεναρίων σε σχέση με τον απώτερο στόχο της βιώσιμης ανάπτυξης.



Εικόνα 8: Τελική βαθμολογία σεναρίων σε σχέση με τον απώτερο στόχο της βιώσιμης ανάπτυξης.

Και σε αυτήν την περίπτωση, ο συνολικός δείκτης ασυνέπειας είναι αποδεκτός. Τέλος, στην τέταρτη περίπτωση, ως καταλληλότερο εναλλακτικό σενάριο προέκυψε το Σενάριο 2, στη συνέχεια ακολουθεί το Σενάριο 3 και τέλος, το Σενάριο 1. Επίσης, ο συνολικός δείκτης ασυνέπειας είναι αποδεκτός.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το πρόβλημα της αξιολόγησης και επιλογής του σεναρίου ανάπτυξης, που προσαρμόζεται επαρκώς στα δεδομένα κάθε περιοχής και ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις της, είναι ένα ζήτημα ζωτικής σημασίας, καθώς οι παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπόψη για τη βιώσιμη ανάπτυξη, είναι πολλαπλοί και πολυδιάστατοι. Στην παρούσα εργασία διερευνήθηκε η δυνατότητα χρήσης του λογισμικού για την ανάδειξη ενός βέλτιστου σεναρίου διαχείρισης της παράκτιας ζώνης του Στρυμονικού Κόλπου, ανάμεσα σε τρία, προκειμένου να αντικειμενοποιηθούν οι επιπτώσεις των σεναρίων, παρόλη την υποκειμενική βαθμολόγησή τους. Μελετήθηκε, εκτός από την περίπτωση της ίσης βαρύτητας των οικονομικών, κοινωνικών και περιβαλλοντικών κριτηρίων, και η περίπτωση κατά την οποία κάποιο από τα τρία κριτήρια υπερτερεί. Αυτό το ενδεχόμενο το εξετάσαμε, καθώς υπάρχει η δυνατότητα να διεξαχθεί έρευνα με ερωτηματολόγια στην περιοχή μελέτης, που θα καθορίσει τη βαρύτητα που δίνουν οι κάτοικοι και οι φορείς της περιοχής στα ως άνω κριτήρια, κατά συνέπεια, δεν είναι δεδομένο ότι οι τρεις συνιστώσες της βιώσιμης ανάπτυξης έχουν την ίδια βαρύτητα μεταξύ τους.

Αξίζει να αναφερθεί, ότι στην 1^η περίπτωση η τελική βαθμολογία του τρίτου σεναρίου δεν έχει μεγάλη διαφορά από τη βαθμολογία του δεύτερου. Επίσης, στη 2^η περίπτωση όπου τα περιβαλλοντικά κριτήρια υπερτερούν έναντι των άλλων δύο, τότε καταλληλότερο σενάριο είναι το δεύτερο, το οποίο δίνει έμφαση στην ανάπτυξη εναλλακτικών μορφών τουρισμού και

στη βιολογική παραγωγή. Στη συνέχεια, παρατηρούμε ότι αν και θεωρήσαμε τα οικονομικά κριτήρια ως σημαντικότερα, και πάλι προέκυψε ως καταλληλότερο σενάριο το δεύτερο, καθώς αν και δίνει έμφαση στην προστασία του περιβάλλοντος, δεν παύει να έχει και πολλές προτάσεις οικονομικής ανάπτυξης. Τέλος, στην περίπτωση που υπερτερούν τα οικονομικά και περιβαλλοντικά κριτήρια έναντι των κοινωνικών, το δεύτερο σενάριο είναι το καταλληλότερο με μεγάλη διαφορά από τα άλλα δύο, καθώς είναι αυτό που συνδυάζει οικονομική ανάπτυξη και περιβαλλοντική προστασία.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση ασχοληθήκαμε με τον εντοπισμό της καταλληλότερης εναλλακτικής από ένα σύνολο τριών εναλλακτικών λύσεων. Ωστόσο, η Μέθοδος της Αναλυτικής Ιεράρχησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την κατάταξη κατά προτεραιότητα ορισμένων εναλλακτικών έναντι άλλων, ή ακόμα και την εύρεση του καλύτερου συνδυασμού εναλλακτικών, κάτω από ορισμένους περιορισμούς. Αυτή η δυνατότητα είναι πολύ σημαντική στην πράξη. Όταν ένας αριθμός επιστημόνων, διαφόρων ειδικοτήτων συνεργαστεί για την επίλυση ενός προβλήματος διαχείρισης παράκτιων ζωνών, τα εναλλακτικά σενάρια ανάπτυξης, που θα προκύψουν, θα είναι πολυάριθμα. Ο μεγάλος αυτός όγκος δεδομένων είναι δυνατό να δεχθεί επεξεργασία με την Αναλυτική Ιεραρχική Μέθοδο, με τον τρόπο που παρουσιάστηκε και τελικά, να προκύψει μία κατάταξη των εναλλακτικών λύσεων κατά σειρά προτεραιότητας.

Συνοψίζοντας, συμπεραίνουμε ότι η μέθοδος αυτή, με την απλότητα και την σαφήνειά της, αλλά και με τις πολλές δυνατότητες που προσφέρει στο χρήστη, αποτελεί ένα πολύτιμο εργαλείο για τη λήψη «ορθών» αποφάσεων και μπορεί να ανταποκριθεί σε ένα τέτοιο πολύπλοκο και σοβαρό ζήτημα, όπως αυτό της ολοκληρωμένης διαχείρισης παράκτιας ζώνης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Αγγελίδης, Μ. και Οικονόμου, Α. 2005. *Χρήσεις γης και επιπτώσεις στον παράκτιο χώρο της Ελλάδας*. Πρακτικά Συνεδρίου Heleco, TEE, Αθήνα.
- Badri, M. 1999. *Combining the analytic Hierarchy Process and goal programming for global facility location-allocation problem*. International Journal of Production Economics, 62: 237-248.
- Clark, J. R. 1996. *Coastal zone management handbook*. 243 pp.
- Δεσπότης, 2002. *Ιεραρχική ανάλυση αποφάσεων*. σημειώσεις διαλέξεων για το μάθημα «Υποστήριξη αποφάσεων», Πανεπιστήμιο Πειραιώς, 2 σελ.
- Fabbri, K. 1998. *A methodology for supporting decision making in integrated coastal zone management*. Ocean & Coastal Management, 39: 51-62.
- Kamal, M. Al-Subhi and Al-Harbi 2001. *Application of the AHP in project management*. International Journal of Project Management, 19: 19-27.
- Kok, J., Engelen, R., White R. and Herman, W. 2001. *Modeling land-use change in a decision-support system for coastal-zone management*. Environmental Modeling and Assessment, 6: 123-132.
- Liang, Gin-Shuh and Wang, Mao-Jiun 1991. *A fuzzy multi-criteria decision-making method for facility site selection*. International Journal of Production Research, 29(11): 2313-2330.
- Roy, B. 1996. *Multicriteria Methodology for Decision Aiding*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London, 120 pp.
- Saaty, T. 1986. *Axiomatic Foundation of the Analytic Hierarchy Process*. Management Science, 32(7): 841-855.
- Saaty, T. 1980. *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. McGraw-Hill, New York, 287 pp.

**ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΩΝ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΗΣ ΖΩΝΗΣ ΘΡΑΥΣΗΣ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ
ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ SPH**
Χρήστος Β. Μακρής, Γιάννης Ν. Κρεστενίτης

Εργαστήριο Θαλάσσιας Τεχνικής και Θαλάσσιων Έργων, Τομέας Υδραυλικής
και Τεχνικής Περιβάλλοντος, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνική
Σχολή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσ/νίκης, 54124 Θεσ/νίκη
cmakris@civil.auth.gr, ynkrest@civil.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία γίνεται διερεύνηση της θραύσης κυματισμών τύπου ασθενούς κατάδυσης (weak plunging), πάνω σε ήπιας κλίσης ακτές εργαστηριακής κλίμακας, μέσω υπολογιστικής προσομοίωσης. Ως αριθμητικό εργαλείο χρησιμοποιείται η σωματιδιακή μέθοδος Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) και συγκεκριμένα η πρόσφατα ενισχυμένη εκδοχή του ακαδημαϊκού ‘ανοιχτού’ πηγαίου κώδικα SPHysics v.2. Επιχειρείται ενδελεχής βαθμονόμηση, μέσω λεπτομερούς χωρικής διακριτοποίησης, με βάση πρόσφατα διεξοδικά εργαστηριακά δεδομένα. Στόχος είναι να ενισχυθεί η αποτελεσματικότητα του Υπο-Σωματιδιακής Κλίμακας μοντέλου για το ‘κλείσιμο’ της τύρβης τύπου Smagorinsky, το οποίο υπολογίζει την ενεργειακή σκέδαση των σχηματιζόμενων δινών στις μη επιλυόμενες από το μοντέλο χωρικές κλίμακες ροής. Η εξαιρετική οπτική αναπαραγωγή των έντονων παραμορφώσεων της ελεύθερης επιφάνειας συμπληρώνεται στην παρούσα εργασία με εξόχως ευλογοφανή αποτελέσματα, που αφορούν σε κλασσικά υδροδυναμικά και πολύπλοκα τυρβώδη χαρακτηριστικά της ροής εντός της ζώνης θραύσης των παράκτιων κυματισμών καθώς και σε εγκάρσια στην ακτή κυματογενή ρεύματα.

**NUMERICAL SIMULATION OF THE HYDRODYNAMIC
FEATURES OF NEAR-SHORE SURF ZONE WITH SPH METHOD**
Christos V. Makris, Yannis N. Krestenitis

Laboratory of Maritime Engineering and Maritime Works, Division of
Hydraulics and Environmental Engineering, Department of Civil Engineering,
Faculty of Engineering, Aristotle University of Thessaloniki, GR-54124
Thessaloniki, Greece

ABSTRACT

Computational modeling aspects of weak plunging wave breaking, over a relatively mild sloping laboratory beach, are investigated in the present paper. Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) method is implemented as a numerical tool and specifically the recently enhanced version of the academic ‘open source’ code SPHysics v.2 is used. Thorough calibration of the model is attempted through fine spatial resolution, based on recent elaborate experimental data. Basic goal is to enhance the effectiveness of the Sub-Particle Scale Smagorinsky-type turbulence closure model that treats energy dissipation of eddy formations for the unresolved flow scales. Fine visual reproduction of the violent free-surface deformations is supplemented with plausible results concerning classic wave dynamics characteristics and sophisticated turbulent surf-zone features as well as wave-induced cross-shore currents.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα φαινόμενα της θραύσης των κυματισμών στην παράκτια ζώνη, της συνακόλουθης τυρβώδους μεταφοράς σε αυτή και της τελικής διαμόρφωσης των παράκτιων κυματογενών ρευμάτων αποτελούσαν ανέκαθεν κρίσιμα ζητήματα για τους επιστήμονες και τους μηχανικούς που ασχολούνται με τις παράκτιες διεργασίες. Ειδικά μέσα στη Ζώνη Θραύσης (ΖΘ), το κυματικό πεδίο υπόκειται εξαιρετικά απότομων μεταβολών, ιδιαίτερα κατά τη θραύση τύπου κατάδυσης (plunging). Η φυσική προσομοίωση του φαινομένου, σε ήπιας κλίσης ακτές εργαστηριακής κλίμακας (Ting & Kirby, 1994), έχει θέσει τις βάσεις για τη βαθύτερη κατανόησή του. Παρ' όλα αυτά, οι πειραματικές προσπάθειες συνήθως σχετίζονται με αυστηρά υδραυλικά χαρακτηριστικά και περιοριστικές γεωμετρίες εφαρμογής. Στη σημερινή εποχή η χρήση προχωρημένων υπολογιστικών μοντέλων επιβάλλεται για λόγους ευελιξίας και οικονομίας. Συνεπώς η ενδελεχής αξιολόγησή τους, έναντι πειραματικών αποτελεσμάτων, ξεχωρίζει ανάμεσα στις ερευνητικές προσπάθειες στο πεδίο της παράκτιας υδροδυναμικής.

Σε αυτό το πλαίσιο, ποικίλες ερευνητικές προσπάθειες έχουν γίνει τα τελευταία χρόνια, οι οποίες αφορούν σε διάφορα μαθηματικά μοντέλα, όπως η Μέθοδος Οριακών Στοιχείων (BEM), η μέθοδος των ολοκληρωμένων κατά Reynolds εξισώσεων Navier-Stokes (RANS), η τεχνική Level Set Method, η Υπο-Πλεγματοκής Κλίμακας (SGS) προσέγγιση για την προσομοίωση των ανεπίλυτων από τα μοντέλα τυρβωδών δινών και τα συζυγή μοντέλα προσομοίωσης μεγάλων δινών (LES). Η πλειοψηφία των παραπάνω μεθόδων αποτελούν παραδοσιακές μεθόδους τύπου Euler που στηρίζονται στη χρήση υπολογιστικού πλέγματος ή καννάβου. Σε αυτές, η ακριβής προσομοίωση των έντονων παραμορφώσεων, που υπόκειται η υδάτινη ελεύθερη επιφάνεια (ΕΕ) κατά τη θραύση των παράκτιων κυματισμών, αποτελεί ιδιαίτερα δύσκολο πρόβλημα, απαιτητικό σε υπολογιστικούς πόρους. Στην παρούσα εργασία, ακολουθώντας προηγούμενες σχετικές ερευνητικές προσπάθειες (Makris et al, 2009, 2010a, 2010b, 2011) πάνω στο ζήτημα, επιχειρείται η βελτίωσή τους με την ενσωμάτωση νεότερων, πιο περίτεχνων εκδοχών ενός πρωτότυπου υπολογιστικού προσομοιώματος χωρίς τη χρήση υπολογιστικού πλέγματος (mesh-free). Η μέθοδος Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH), που επινοήθηκε και παρουσιάστηκε ενδελεχώς από τον Monaghan (2005), χρησιμοποιείται και βαθμονομείται με βάση εκλεπτυσμένη χωρική ανάλυση έναντι πειραματικών δεδομένων. Στόχος είναι η επικύρωση της ικανότητας της μεθόδου να προβλέπει τις λεπτομέρειες όλων των διεργασιών κατά τη θραύση των παράκτιων κυματισμών.

Στην πρόσφατη βιβλιογραφία, τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων SPH, παρόλο που είναι οπτικά εντυπωσιακά (Gómez-Gesteira et al, 2010b και Dalrymple & Rogers, 2006), στερούνται εκτενούς επιβεβαίωσης αναφορικά με τα υπολογιζόμενα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά της τυρβώδους ροής. Σε αυτό το πλαίσιο, οι Shao & Ji (2006) παρουσίασαν μία προσέγγιση τύπου LES για SPH, με τη χρήση Υπο-Σωματιδιακής Κλίμακας (SPS) μοντέλου για το 'κλείσιμο' της τύρβης. Τα αποτελέσματά τους ήταν αξιοσημείωτα, αλλά αφορούσαν μόνο σε μετακινήσεις της ΕΕ και τυρβώδεις εντάσεις. Οι Khayyer et al (2008) αναπαρήγαγαν μια διορθωμένη εκδοχή της μεθόδου για ασυμπιεστο ρευστό, με κύριο σκοπό την ακριβή απεικόνιση της παραμόρφωσης της ΕΕ. Επέμειναν μόνο στην εκλέπτυνση της χωρικής ανάλυσης και προσπάθησαν να δικαιολογήσουν τη σύγκλιση των αριθμητικών αποτελεσμάτων με αντίστοιχα πειραματικά, βασισμένοι μόνο στην τοπολογία της καταδύομενης φλέβας κατά τη θραύση. Συνεκδοχικά στην παρούσα εργασία παρέχονται πιο εκλεπτυσμένες αριθμητικές προσομοιώσεις, με τη χρήση ενός συζευγμένου μοντέλου SPH-SPS, για τη θραύση μονοχρωματικών μη γραμμικών κυμάτων υπό μορφή ασθενούς κατάδυσης. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα και διάφορα πολύπλοκα χαρακτηριστικά της τυρβώδους ροής εντός ΖΘ αναλύονται εκτενώς.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.1 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ SPH

Η SPH είναι μια σχετικά πρόσφατη αριθμητική μέθοδος τύπου Lagrange για την προσομοίωση υδροδυναμικών ροών. Λαμβάνει υπόψη σωματιδιακού τύπου χωρική διακριτοποίηση για το υπολογιστικό πεδίο και εφαρμόζει ολοκληρωτικούς τελεστές εξομάλυνσης για τον υπολογισμό των πλήρων εξισώσεων Navier-Stokes. Η τεχνική της σωματιδιακής διακριτοποίησης επιτρέπει την απρόσκοπτη προσομοίωση ροών με ΕΕ, οι οποίες υπόκεινται έντονων παραμορφώσεων και χαρακτηρίζονται ως βίαια φαινόμενα, χωρίς κάποιο ειδικό χειρισμό για την οριακή συνθήκη της ΕΕ (Dalrymple & Rogers, 2006 και Gómez-Gesteira et al, 2010b). Το χαρακτηριστικό γνώρισμα της μεθόδου είναι η αναλυτική αναπαράσταση οποιουδήποτε μεγέθους $A(\mathbf{r})$ (βαθμωτού ή διανυσματικού) και των οποιασδήποτε τάξης διαφορικών τελεστών του, σε ένα συγκεκριμένο κόμβο του υπολογιστικού πεδίου, μέσω ολοκληρωτικής παρεμβολής στους περιβάλλοντες κόμβους. Έτσι οποιαδήποτε συνάρτηση $A(\mathbf{r})$ των ιδιοτήτων του υπολογιστικού πεδίου αναπαράγεται αριθμητικά σε ολοκληρωτική (ασθενή) μορφή και εν τέλει σε διακριτοποιημένη μορφή τύπου αθροίσματος, ως εξής:

$$A(\mathbf{r}) = \int A(\mathbf{r}')W(\mathbf{r}-\mathbf{r}',h)d\mathbf{r}' \Rightarrow A(\mathbf{r}) = \sum_j A_j(m_j/\rho_j)W_j \quad (2.1)$$

όπου h είναι το μήκος εξομάλυνσης, \mathbf{r} και \mathbf{r}' είναι η θέση τυχαίου σωματιδίου και η απόσταση μεταξύ δύο τυχαίων σωματιδίων αντίστοιχα, $W(\mathbf{r},h)$ είναι μία συνάρτηση στάθμισης κωδωνοειδούς τύπου, εξαρτώμενη από την απόσταση \mathbf{r} και το μήκος εξομάλυνσης h , η οποία ονομάζεται kernel (W_j για σωματιδιακή διακριτοποίηση), m_j και ρ_j είναι η σταθερή μάζα και η πυκνότητα τυχαίου σωματιδίου j αντίστοιχα. Λεπτομερής ανάλυση της μεθόδου SPH παρουσιάζεται από τον Monaghan (2005). Κρίσιμες παραδοχές της αριθμητικής προσέγγισης, που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία παρέχονται από τους Makris et al (2009) και Gómez-Gesteira et al (2010b).

2.2 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ SPHysics - ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΥΡΒΗΣ SPS

Σε αυτό το πλαίσιο έχει επιλεχθεί εδώ και καιρό η χρήση του εύρωστου ακαδημαϊκού υπολογιστικού μοντέλου SPHysics με «ανοιχτό πηγαίο κώδικα». Ακολουθώντας την επιχειρηματολογία των Makris et al (2011), γίνεται χρήση της πρόσφατης εκδοχής v.2 (Gómez-Gesteira et al, 2010a). Εκτεταμένη βαθμονόμηση των παλαιότερων εκδοχών μπορούν να εντοπιστούν στα άρθρα των Makris et al (2010a, b) και οι αριθμητικές παραδοχές της παρούσας εργασίας παρέχονται από τους Makris et al (2011). Παρόμοια λεπτομερής χωρική ανάλυση εφαρμόζεται στην παρούσα ανάλυση, εμπλουτισμένη με περισσότερα ποσοτικά αποτελέσματα και σχολιασμό, ρίχνοντας περαιτέρω φως στα τυρβώδη χαρακτηριστικά της ΖΘ.

Η διαχείριση της συνεκτικότητας στην παρούσα ανάλυση βασίζεται στην SPS προσέγγιση των Gotoh et al (2001), η οποία είναι παρόμοια με τα διάφορα LES-SGS μοντέλα που χρησιμοποιούνται στις παραδοσιακές μεθόδους με χρήση υπολογιστικού καννάβου. Πρόκειται για ένα μοντέλο που αφορά στο 'κλείσιμο' της τύρβης, δηλ. στο χειρισμό των τυρβωδών δινών για τις μη επιλυόμενες από το μοντέλο SPH χωρικές κλίμακες, με τυπική διάσταση μικρότερη από το χωρικό βήμα διακριτοποίησης Δx . Ο τανυστής των τάσεων SPS υπολογίζεται με βάση την υπόθεση τυρβώδους κινηματικής συνεκτικότητας κατά Boussinesq, η οποία υποστηρίζεται από μία τεχνική τεχνητής συμπίεστότητας με τη χρήση μεσοστάθμισης τύπου Favre για την υπολογιζόμενη

πυκνότητα. Ένα μη-δυναμικό μοντέλο Smagorinsky εφαρμόζεται για τον υπολογισμό της τυρβώδους κινηματικής συνεκτικότητας ν_t , ως εξής:

$$\nu_t = \left[\min(C_s \Delta l) \right]^2 |\tilde{\mathbf{S}}_{ij}| \quad (2.2)$$

όπου ο συντελεστής Smagorinsky C_s κρατείται σταθερός σε όλο το υπολογιστικό πεδίο, Δl είναι η απόσταση μεταξύ των σωματιδίων και \mathbf{S}_{ij} είναι ο SPS τανυστής του ρυθμού μεταβολής της τροπής, για τον οποίο ισχύει η ακόλουθη σχέση:

$$|\tilde{\mathbf{S}}_{ij}| = (2\tilde{\mathbf{S}}_{ij}\tilde{\mathbf{S}}_{ij})^{1/2}, \tilde{\mathbf{S}}_{ij} = -\frac{1}{2} \left(\frac{\partial \tilde{\mathbf{u}}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{\mathbf{u}}_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.3)$$

όπου \mathbf{u} είναι το διανυσματικό πεδίο των ταχυτήτων και η περισπωμένη (\sim) υποδηλώνει μεσοστάθμιση τύπου Favre. Τα παραπάνω καλύπτονται εκτενέστατα από τους Gómez-Gesteira et al (2010a). Το μοντέλο επικουρείται από ένα αριθμητικό φίλτρο μεσοστάθμισης των πυκνοτήτων κατά Shepard, έτσι ώστε να εξασφαλιστεί φυσικά ευλογοφανής (ομαλή) αναπαράσταση της ανύψωσης της ΕΕ (Makris et al, 2009).

2.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ – ΔΙΑΚΡΙΤΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΕΛΕΓΧΟΥ

Τα πειραματικά δεδομένα, που χρησιμοποιούνται για συγκρίσεις με τα αντίστοιχα των αριθμητικών προσομοιώσεων, συγκεντρώθηκαν από τη μελέτη των Stansby & Feng (2005) [SF05]. Η έρευνά τους καλύπτει ποικιλοτρόπως τη θραύση τύπου ασθενούς κατάδυσης για παράκτιους μη γραμμικούς κυματισμούς και τη συνακόλουθη μεταφορά της τύρβης υπό αυτών εντός ΖΘ σε ακτή εργαστηριακής κλίμακας. Τα χαρακτηριστικά της πειραματικής διάταξης και τα εξαγόμενα της ανάλυσης, που χρησιμοποιήθηκαν ως βάση για τη διαμόρφωση του αριθμητικού καναλιού, στο οποίο έλαβαν χώρα οι προσομοιώσεις με τον κώδικα SPHysics v.2, έχουν παρουσιαστεί παλαιότερα από τους Makris et al (2009 και 2010a,b). Εκτεταμένη σχετική περιγραφή μπορεί να εντοπιστεί στη μελέτη των SF05.

Ακολουθώντας την παλαιότερη ανάλυση των Makris et al (2011), οι περιπτώσεις ελέγχου βασίζονται κυρίως στη χωρική ανάλυση του υπολογιστικού πεδίου και παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Η περίπτωση 6 αφορά σε μία χρονοβόρα προσπάθεια να καταγραφούν 50 προσομοιωμένες κυματικές περίοδοι, με σκοπό να εντοπιστεί η επιρροή της μακροπρόθεσμης καταγραφής στη φασματική ανάλυση κατά Fourier των τυρβωδών συνιστωσών των ταχυτήτων. Για να λειτουργήσει ορθά το μοντέλο SPS, πρέπει να προηγηθεί κατάλληλη βαθμονόμηση της χωρικής ανάλυσης του μοντέλου SPHysics v.2, ιδιαίτερα για την περιοχή έναρξης της θραύσης, όπου κυριαρχούν έντονα διατμητικά φαινόμενα. Συνεπώς η σωματιδιακή διακριτοποίηση Δx οφείλει να είναι ίση ή μικρότερη της ολοκληρωτικής (integral) κλίμακας μήκους της τύρβης της πραγματικής ροής. Οι περιπτώσεις 9 ως 11 αντιστοιχούν σε αυτήν την απαίτηση. Οι Cox et al (1994) έχουν εκτιμήσει ότι η ανωτέρω κλίμακα κυμαίνεται από 0.04 ως 0.18 του βάθους του νερού, στην περιοχή έναρξης της θραύσης και την περιοχή της εσώτερης ΖΘ αντίστοιχα. Υπολογίζεται ότι αυτές οι τιμές ποικίλουν από 5.92 ως 6.32 mm και από 1.35 ως 1.71 cm για την εξωτερική και την εσώτερη ΖΘ αντίστοιχα για τα στοιχεία του πειράματος των SF05. Για σχεδόν όλες τις περιπτώσεις προσομοίωσης (εκτός από τις πρώτες δύο) χρησιμοποιείται πιο λεπτομερής χωρική διακριτοποίηση, σε σχέση με την ολοκληρωτική κλίμακα μήκους της τύρβης στην εσώτερη ΖΘ. Οι

περιπτώσεις 1 και 2 περιλαμβάνουν περίπου $2 \cdot 10^4$ σωματίδια, ενώ οι περιπτώσεις ελέγχου 3 ως 13 αφορούν σε προσομοιώσεις από περίπου $5 \cdot 10^4$ έως $2 \cdot 10^5$ σωματίδια.

Πίνακας 1. Διακριτές περιπτώσεις προσομοίωσης βασισμένες στη χωρική διακριτοποίηση Δx και λοιπούς παράγοντες βαθμονόμησης

Περιπτώσεις Ελέγχου	Δx (m)	Παράγοντες Βαθμονόμησης	Περιπτώσεις Ελέγχου	Δx (m)	Παράγοντες Βαθμονόμησης
1	0.02	$\Delta x/h = 0.77$	7	0.005	$\Delta x/h = 0.77$
2	0.02	$\Delta x/h = 0.58$	8	0.006	$\Delta x/h = 0.77$
3	0.015	$\Delta x/h = 0.77$	9	0.00592	$\Delta x/h = 0.77$
4	0.01	$\Delta x/h = 0.77$	10	0.00632	$\Delta x/h = 0.77$
5	0.01	$\Delta x/h = 0.58$	11	0.0061	$\Delta x/h = 0.77$
6	0.01	t = 121 sec $\Delta x/h = 0.77$	12	0.004	$\Delta x/h = 0.77$
			13	0.003	$\Delta x/h = 0.77$

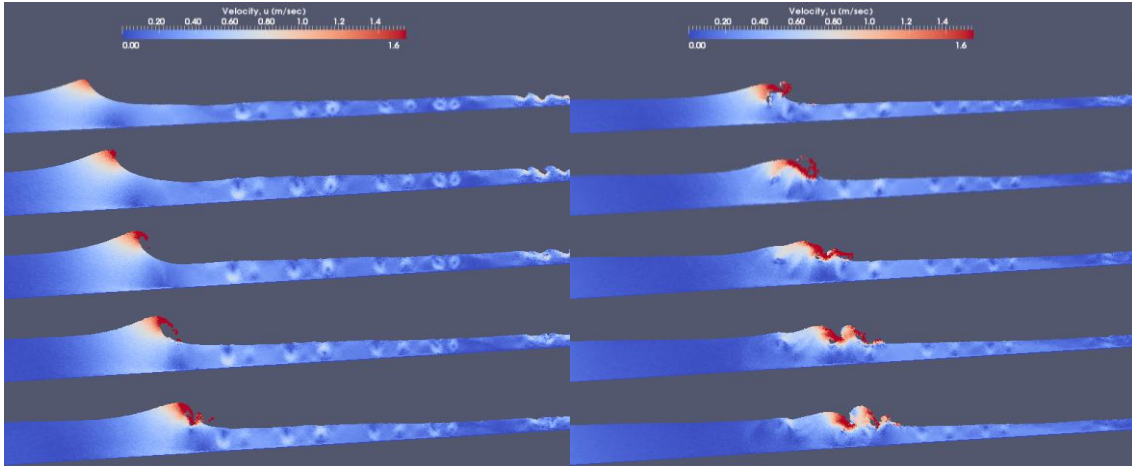
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

Στη συνέχεια παρουσιάζονται αριθμητικά αποτελέσματα, τα οποία ποικίλουν από απεικονίσεις της θραύσης τύπου κατάδυσης έως συγκριτικά κυματικά χαρακτηριστικά και αναπαραστάσεις εκλεπτυσμένων τυρβωδών γνωρισμάτων της ροής εντός ΖΘ.

3.1 ΟΠΤΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΘΡΑΥΣΗΣ ΤΥΠΟΥ ΚΑΤΑΔΥΣΗΣ

Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται η ακολουθία στιγμιαίων απεικονίσεων των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων με τον κώδικα SPHysics για λεπτομερή σωματιδιακή ανάλυση. Το χρονικό βήμα προβολής είναι 0.1 sec. Η ποιοτική συμφωνία μεταξύ πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων είναι επαρκής, καθώς το επεισόδιο της κυματικής θραύσης τύπου ασθενούς κατάδυσης (SF05) έχει αναπαραχθεί πιστά. Συγκεκριμένα, στην περιοχή της κορυφής του προελαύνοντος κύματος δημιουργείται ένας επιφανειακός στρόβιλος (surface roller), ο οποίος σταδιακά εμφανίζει λοξό μυτερό υδάτινο εξόγκωμα στην κορυφή του. Αυτό εξαναγκάζεται, από την περίσσεια ορμής, στο σχηματισμό μιας προεξέχουσας φλέβας νερού. Ακολούθως η τελευταία αναποδογυρίζει και καταδύεται στην εμπρόσθια κοιλία του κύματος, προσκρούοντας στην περιοχή του πόδα του επιφανειακού στροβίλου. Αυτό το φαινόμενο αποτελεί τον κυρίαρχο μηχανισμό δημιουργίας και ενίσχυσης του πεδίου της στροβιλότητας και παραγωγής της τύρβης στην περιοχή. Μετέπειτα εμφανίζεται παφλασμός που οδηγεί στη δημιουργία μιας μικρότερης υδάτινης γλώσσας, η οποία με τη σειρά της αναπηδά και καταδύεται ακριβώς μπροστά από τον εν τω μεταξύ δημιουργημένο επιφανειακό τυρβώδη στρόβιλο (turbulent bore). Ο τελευταίος έχει τη μορφή αντίστροφου υδραυλικού άλματος και μεταδίδεται ευσταθώς, δημιουργώντας ένα απότομο μέτωπο. Αυτό αναγκάζει τη μάζα του νερού, που βρίσκεται μπροστά του, στο σχηματισμό ενός δευτερεύοντος εξογκώματος μπροστά από τον θραυόμενο επιφανειακό στρόβιλο και προς την ακτή. Στη συνέχεια μια μικρότερη καταδύομενη φλέβα επανεμφανίζεται επί του νέου μετώπου. Διαδοχικές διακριτές κοιλότητες κάνουν την εμφάνισή τους, έως ότου το διπλό υδάτινο εξόγκωμα να καταλαγιάσει και να εκφυλιστεί σε ρυτιδώσεις στην παράκτια ζώνη διαβροχής. Η χρωματική κλίμακα στο Σχήμα 1 αναφέρεται σε τιμές ταχύτητας, οι οποίες φτάνουν στην προελαύνουσα κορυφή του θραυόμενου κύματος και το μέτωπο του τυρβώδους στροβίλου τη μέγιστη τιμή της 1.6 φορές της θεωρητικής φασικής ταχύτητας σε ρηγά νερά, $c_f = (g \cdot d)^{1/2}$. Αυτή η τιμή είναι ελαφρά μεγαλύτερη σε σύγκριση με την πειραματικά μετρημένη ταχύτητα,

1.32· c_t (SF05). Η τελευταία είναι παραδόξως κοντά στην τιμή που υπολογίστηκε από τον Stive (1984) για θραυόμενους κυματισμούς τύπου υπερχειλίσης και όχι κατάδυσης. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν για πιο αδρομερή χωρική ανάλυση αποκαλύπτουν καλύτερη συμφωνία πειραμάτων και προσομοιώσεων αναφορικά με αυτές τις τιμές. Παρ' όλα αυτά η λεπτομερής διακριτοποίηση παραπέμπει σε καλύτερη αναπαράσταση της μορφής των καταδυόμενων θραυόμενων κυμάτων. Ακόμα ένα ενδιαφέρον στοιχείο του Σχήματος 1 είναι η αναπαράσταση τεσσάρων ζευγών από αποσυνδεδεμένες κατακόρυφες περιδινήσεις αντι-ωρολογιακής φοράς στην περιοχή του απόρρου της θραύσης. Είναι σχετικά μεγάλης κλίμακας και μετακινούνται αβίαστα προς το επόμενο επερχόμενο θραυόμενο κύμα, ώσπου να αναμιχθούν με τις τυρβώδεις κινήσεις εκεί.

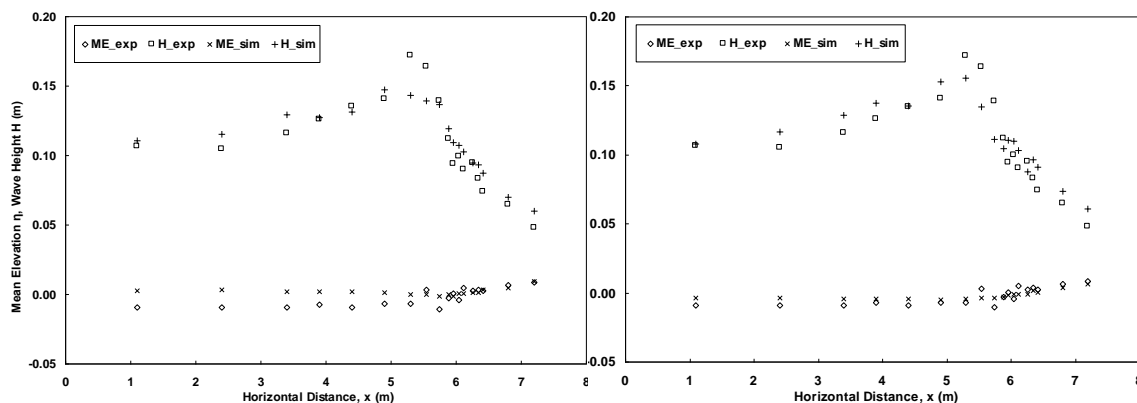


Σχήμα 1: Διαδοχικά ρεαλιστικά στιγμιότυπα των προσομοιώσεων του μοντέλου SPHysics με λεπτομερή χωρική διακριτοποίηση για τη θραύση κυματισμών τύπου ασθενούς κατάδυσης και την προέλαση του αντίστροφου υδραυλικού άλματος (bore). Η χρωματική κλίμακα αναφέρεται σε 'ακατέργαστες' τιμές ταχυτήτων.

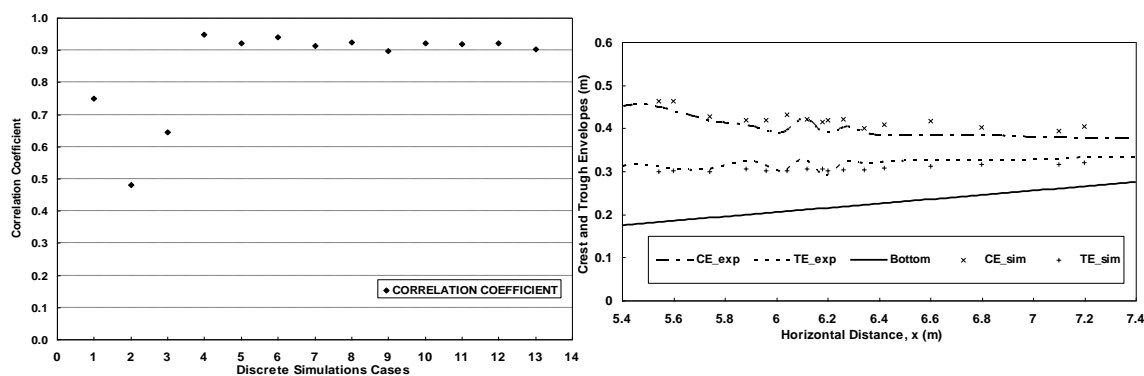
3.2 ΥΨΗ ΚΥΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΑΝΥΨΩΣΗ ΜΕΣΗΣ ΣΤΑΘΜΗΣ ΘΑΛΑΣΣΑΣ

Στο Σχήμα 2 επιχειρούνται συγκρίσεις των υψών κύματος και της κυματογενούς μέσης ανύψωσης της ΕΕ από πειράματα και προσομοιώσεις για μικρή (αριστερό γράφημα) και μεγάλη (δεξιό γράφημα) χωρική ανάλυση. Η συμφωνία μεταξύ των τιμών είναι αποδεκτή για όλες τις περιπτώσεις με $\Delta x \leq 1 \text{ cm}$. Αυτό τεκμηριώνεται από το ότι οι αντίστοιχοι συντελεστές συσχέτισης κατά Pearson (Σχήμα 3, αριστερό γράφημα), για την κατανομή των υψών κύματος σε όλο το υπολογιστικό πεδίο, είναι της τάξης του 0.9 και υψηλότεροι. Όσο πιο λεπτομερής γίνεται η χωρική ανάλυση, τόσο καλύτερα είναι τα αποτελέσματα για την πρόβλεψη των υψών κύματος στην περιοχή της αρχικής ΖΘ, όπου παρατηρούνται έντονα διατμητικά φαινόμενα. Αυτή η περιοχή ήταν προβληματική στις παλαιότερες προσομοιώσεις (Makris et al, 2009 & 2010a). Για τις άλλες περιοχές του πεδίου, διαφορετικές επιλογές διακριτοποίησης θα μπορούσαν να δώσουν εξίσου αποδεκτά αποτελέσματα βασισμένες σε βελτιστοποιημένες τιμές του αδιάστατου όρου χωρικού βήματος $\Delta x/h$. Ο τελευταίος χρήζει ιδιαίτερης προσοχής, γιατί όσο αυξάνεται (δηλ. συγκριτικά μικρό μήκος εξομάλυνσης), τόσο περισσότερες είναι οι παρατηρημένες υδροδυναμικές αστάθειες στο υπολογιστικό πεδίο και τόσο μεγαλύτερη η εξασθένιση των αριθμητικών οφελών της μεθόδου SPH. Από την άλλη πλευρά, χαμηλές τιμές $\Delta x/h$ (συγκριτικά μεγάλο μήκος εξομάλυνσης) οδηγούν σε υπέρμετρη εξομάλυνση των υπολογιζόμενων μεγεθών της ροής με αποτέλεσμα να παρατηρείται παράλογη αύξηση της ενεργειακής απόσβεσης στο σύστημα. Εντούτοις η μέση κυματογενής ανύψωση της ΕΕ εντός ΖΘ προβλέπεται με εντυπωσιακό τρόπο

ιδιαίτερα για τις περιπτώσεις με λεπτομερή χωρική ανάλυση. Στο Σχήμα 3 (δεξιό γράφημα), παρατίθενται οι περιβάλλουσες των κορυφών και των κοιλιών των κυματισμών εντός ΖΘ, για το πείραμα των SF05 και τις αντίστοιχες προσομοιώσεις με το μοντέλο SPHysics v.2. Αφορούν σε περίπτωση ελέγχου με λεπτομερή διακριτοποίηση και η σύμπτωση των κατανομών κρίνεται σχετικά ικανοποιητική.



Σχήμα 2: Συγκρίσεις κατανομών υψών κύματος ‘H’ και μέσης κυματογενούς ανύψωσης της ΕΕ ‘ME’ μεταξύ πειραμάτων (exp) και προσομοιώσεων (sim) για τις περιπτώσεις ελέγχου 4 [αριστερά] & 13 [δεξιά].



Σχήμα 3: Συντελεστές συσχέτισης Pearson για συγκρίσεις κατανομών υψών κύματος μεταξύ πειραμάτων και προσομοιώσεων για διακριτές περιπτώσεις ελέγχου [αριστερά]. Περιβάλλουσες κορυφών ‘CE’ και κοιλιών ‘TE’ των κυματισμών εντός ΖΘ για πειράματα (exp) και προσομοιώσεις (sim) και την περίπτωση ελέγχου 12 [δεξιά].

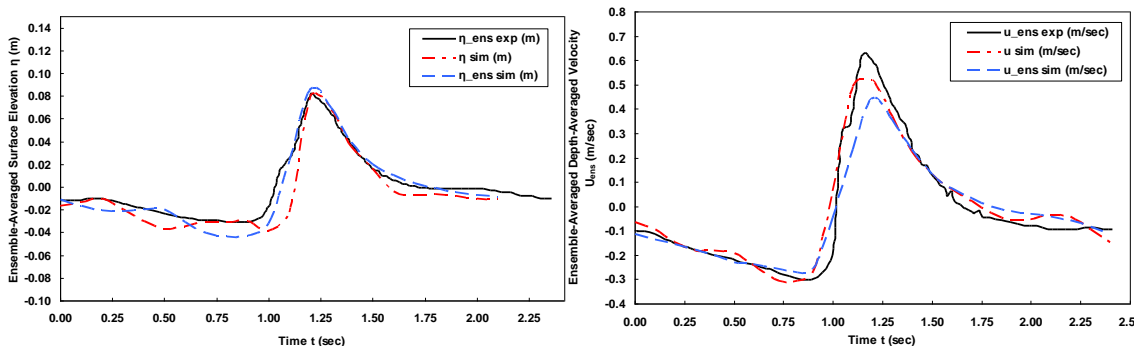
3.3 ΤΙΜΕΣ ΔΕΙΓΜΑΤΙΚΟΥ ΜΕΣΟΥ ΤΩΝ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ

Η ευρετική προσέγγιση για την ανάλυση των χαρακτηριστικών του πεδίου τυρβώδους ροής κάτω από θραυόμενους κυματισμούς, κατά Nadaoka et al (1989), χρησιμοποιείται για τον ορισμό της τιμής δειγματικού μέσου, όπως π.χ. της μέσης κατά το βάθος ταχύτητας U , $\langle U \rangle$ ως εξής:

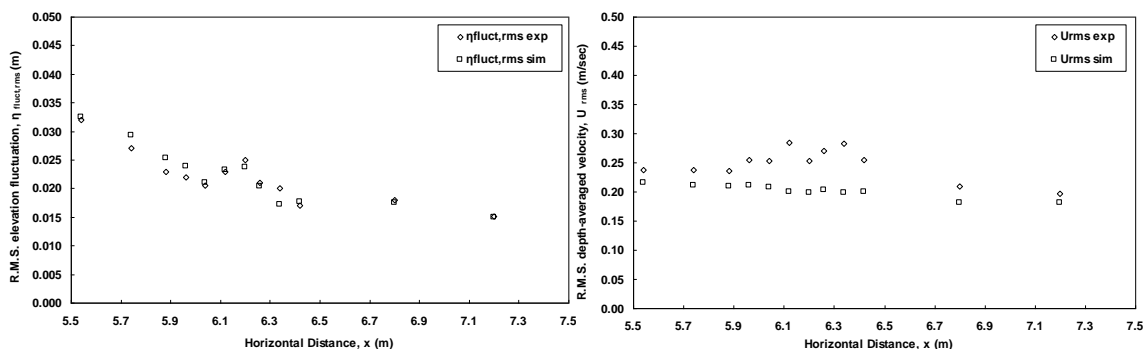
$$\langle U(\mathbf{x}, \zeta t) \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} U(\mathbf{x}, \zeta(t+iT)) \quad (3.1)$$

όπου $\langle \cdot \rangle$ είναι το σύμβολο του τελεστή μεσοστάθμισης κατά τη φάση του κύματος, N ο μέγιστος αριθμός του πλήθους του δείγματος παρόμοιος με το πλήθος των κυματικών κύκλων ($N \geq 10$), T η περίοδος του κύματος, ζ η γωνιακή συχνότητα του κύματος, \mathbf{x} το διάνυσμα θέσης και t ο χρόνος. Η ίδια σχέση (3.1) εφαρμόζεται επίσης για την

ανύψωση της ΕΕ, η . Στο Σχήμα 4 παρέχονται οι σχετικές τιμές, σε συγκεκριμένο μετρητή εντός της κορεσμένης ΖΘ, μαζί με ενδεικτικές ακατέργαστες τιμές της ταχύτητας. Ακολουθώντας τη λογική των Makris et al (2011), πολύ καλή συμφωνία έχει επιτευχθεί έναντι των πειραματικών αποτελεσμάτων των SF05, εκτός των άλλων περιοχών και στο μέσο της ΖΘ, πάντοτε με εκλεπτυσμένη χωρική ανάλυση. Στις περιοχές που κυριαρχούν τα έντονα διατμητικά φαινόμενα, η $\langle U \rangle$ έχει υποεκτιμηθεί σχετικά, πιθανότατα εξαιτίας έλλειψης κατάλληλης αντιμετώπισης της τριβής στο στερεό πυθμενικό όριο και στην οριακή στοιβάδα στις προσομοιώσεις τύπου SPH ή λόγω ανάγκης για πιο λεπτομερή χωρική διακριτοποίηση Δx , εγγύτερα στις κλίμακες Kolmogorov. Στο Σχήμα 5 δίνονται οι τιμές τετραγωνικού μέσου (rms) της διακυμαινόμενης ανύψωσης της ΕΕ, $\eta_{\text{fluct}} = \langle \eta \rangle - \eta_{\text{mean}}$ (η_{mean} είναι η μέση στο χρόνο ανύψωση της ΕΕ) και της U για την περίπτωση ελέγχου 12 κατά μήκος της ΖΘ. Οι συγκρίσεις έναντι πειραματικών δεδομένων (Σχήμα 5) και οι αντίστοιχοι συντελεστές συσχέτισης Pearson, με τιμές ~ 0.9 , παρέχουν αξιοσημείωτη σύμπτωση για τις τιμές $\eta_{\text{fluct,rms}}$ και τις περιπτώσεις εκλεπτυσμένης χωρικής ανάλυσης. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα για την U_{rms} , με συντελεστή συσχέτισης ~ 0.5 , είναι συζητήσιμα. Το τελευταίο ισχύει κυρίως στο μέσο της ΖΘ, όπου σχηματίζονται τα απότομα μέτωπα των επιφανειακών τυρβωδών στροβίλων και όχι στην περιοχή έναρξης της θραύσης ή την εσωτερική ΖΘ. Παρ' όλα αυτά ο κώδικας SPHysics v.2 αποδίδει εμφανέστατα πολύ καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με το μοντέλο τύπου RANS, των ολοκληρωμένων κατά το βάθος εξισώσεων ρηχών νερών, που χρησιμοποιήθηκε από τους SF05.



Σχήμα 4: Τιμές δειγματικού μέσου (κυανή τετμημένη γραμμή) και ακατέργαστες τιμές σε πραγματικό χρόνο (ερυθρή εστιγμένη-τετμημένη γραμμή) της ανύψωσης της ΕΕ ‘ η ’ [αριστερά] και της μέσης στο βάθος ταχύτητας ‘ U ’ [δεξιά] στο μέσο της ΖΘ, από πειράματα (exp) (μαύρη πλήρης γραμμή) και από προσομοιώσεις (sim).

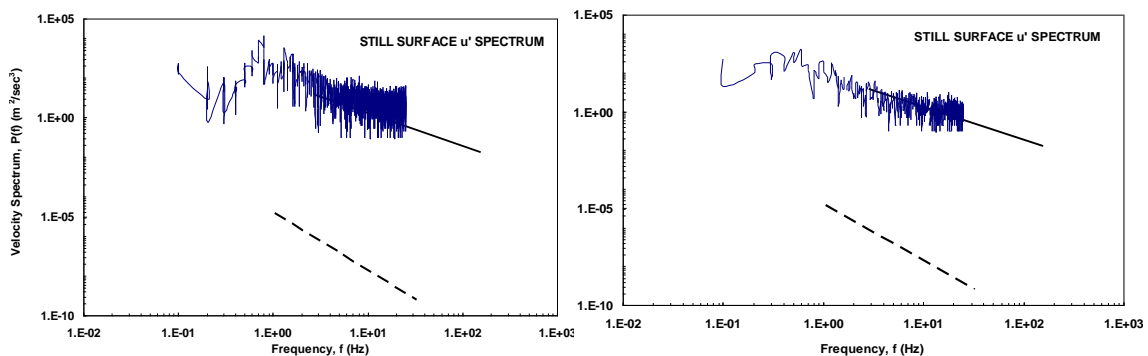


Σχήμα 5: Συγκρίσεις πειραματικών (exp) έναντι προσομοιωμένων (sim) τιμών τετραγωνικού μέσου (rms) για τη διακύμανση της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας ‘ $\eta_{\text{fluct,rms}}$ ’ [αριστερά] και την ολοκληρωμένη στο βάθος ταχύτητα ‘ U_{rms} ’ [δεξιά].

3.4 ΤΥΡΒΩΔΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΝΤΟΣ ΤΗΣ ΖΩΝΗΣ ΘΡΑΥΣΗΣ

3.4.1. Φάσματα Fourier των τυρβωδών διακυμάνσεων των ταχυτήτων

Στο Σχήμα 6 φαίνονται τα φάσματα Fourier $P_u(f)$ (f είναι η συχνότητα) των διακυμάνσεων των οριζόντιων συνιστωσών των ταχυτήτων $\mathbf{u}' = \mathbf{u} - \langle \mathbf{u} \rangle$ στο επίπεδο της Μέσης Στάθμης Ηρεμίας (ΜΣΗ). Αυτά έχουν εξαχθεί από το διανυσματικό πεδίο των ταχυτήτων για τις περιπτώσεις 6 (αριστερό γράφημα) και 13 (δεξιό γράφημα), στην περιοχή έναρξης της θραύσης και την εσωτερη ΖΘ αντίστοιχα. Όλα τα φάσματα ακολουθούν τάση με κλίση $-5/3$ σε διλογαριθμικό διάγραμμα, τυπική της ισοτροπικής τύρβης (αδρανειακής υπο-κλίμακας), μέχρι $f=10\text{Hz}$. Αυτή η τάση κατά κάποιο τρόπο συνεχίζει ως το όριο του φίλτρου Nyquist $f=25\text{Hz}$ για τις περιπτώσεις λεπτομερούς χωρικής ανάλυσης και αποκλίνει οριζοντίως για τις περιπτώσεις αδρομερούς χωρικής διακριτοποίησης. Οι τυχαίες τυρβώδεις διακυμάνσεις πάνω από το όριο Nyquist έχουν χαθεί στη διαδικασία της μεσοστάθμισης κατά Nadaoka et al (1989). Βελτίωση των προηγούμενων σχετικών αποτελεσμάτων (Makris et al, 2010b & 2011) είναι εμφανής για τις υψηλές μπάντες συχνοτήτων (χωρικές διαστάσεις της ροής SPS) ή για τις μικρότερες από τις μεγάλες δίνες, τις οποίες επιλύει το μοντέλο SPH. Η λεπτομερής χωρική ανάλυση και το απαραίτητο πλήθος των κυματικών περιόδων καταγραφής, σε σχέση με παλαιότερες προσομοιώσεις, συνεισφέρουν θετικά στην αναβάθμιση των αποτελεσμάτων. Η χαρακτηριστική κλίση -3 στο διλογαριθμικό διάγραμμα, τυπική της δισδιάστατης πάγιας τύρβης (Lessieur, 1990), απεικονίζεται επίσης όπως και στους SF05, παρόλο που δεν αναπαράγεται σε κανένα μετρητή και βάθος. Οι SF05 αναφέρουν, ότι οι τυρβώδεις ποσότητες που υπολογίζουν, είναι μόνο οι υπερτεθειμένες τιμές υπολοίπων, σχετικά υψηλών συχνοτήτων f , που δεν αντιπροσωπεύουν όλη την τυρβώδη ενέργεια. Για αυτό το λόγο, η μελλοντική ενδελεχής ανάλυση των ορθών και διατμητικών τάσεων Reynolds και της τυρβώδους κινητικής ενέργειας θα οριστικοποιήσει αν η υπολειμματική τύρβη πλησιάζει ή όχι στην ισοτροπία.

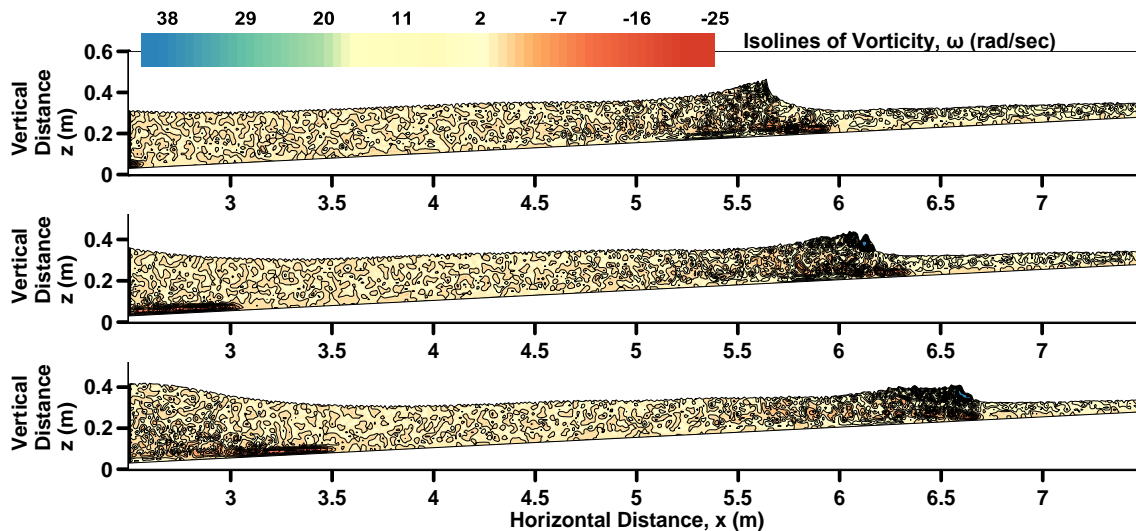


Σχήμα 6: Φάσματα Fourier των προσομοιωμένων τυρβωδών συνιστωσών των οριζόντιων ταχυτήτων u' για την περιοχή έναρξης της θραύσης της περίπτωσης 6 [αριστερό γράφημα]. Ίδιο μέγεθος για την εσωτερη ΖΘ της περίπτωσης 13 [δεξιό γράφημα]. Μετρήσεις στο επίπεδο της ΜΣΗ.

3.4.2. Συνεκτικές τυρβώδεις δομές

Στο Σχήμα 7 παρουσιάζονται, σε δισδιάστατες κατακόρυφες διατομές, τα μορφώματα της στροβιλότητας, η οποία εμφανίζεται περιοδικά με το πέρασμα των μονοχρωματικών κυμάτων. Αυτές οι διατάξεις αποτελούν συνεκτικές τυρβώδεις δομές, που εμπεριέχουν από μεγάλης κλίμακας στροβίλους μέχρι μέσης κλίμακας περιδινήσεις και μικρότερης κλίμακας δίνες. Η στροβιλότητα λαμβάνει αξιοπρόσεκτες τιμές στον

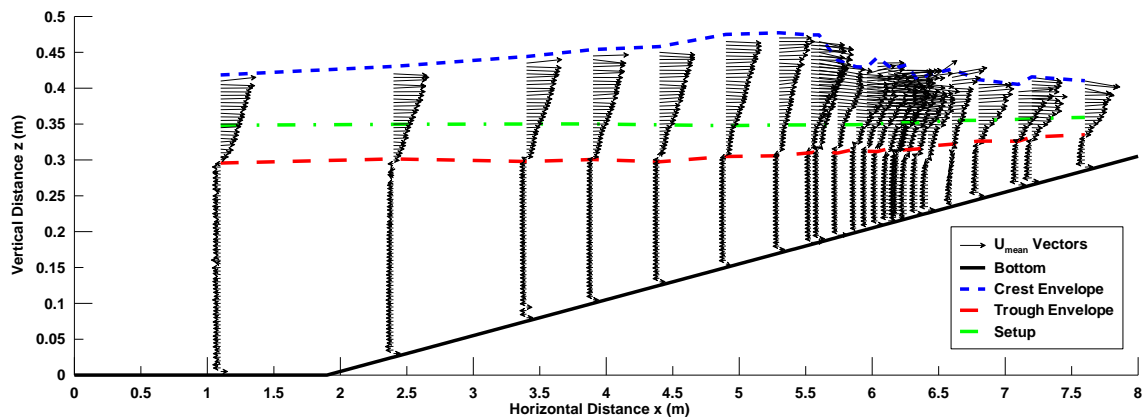
πόδα του επιφανειακού στροβίλου, όπως ακριβώς αναφέρεται και από τους Peregrine & Svendsen (1978). Ακολούθως η συγκεντρωμένη στροβιλότητα διασπείρεται σε όλη την περιοχή του επιφανειακού στροβίλου μέχρι την έναρξη της διεργασίας της θραύσης τύπου κατάδυσης. Κατά τη διάρκεια της τελευταίας, διακριτές πολλαπλές στροβιλώδεις δομές γίνονται εμφανείς. Πολύ γρήγορα αυτές απλώνονται και καταλαμβάνουν το χώρο κοντά και κατά μήκος της ΕΕ, καθώς ο σχηματισμός τύπου αντίστροφου υδραυλικού άλματος μορφοποιείται μετά τη θραύση. Στη συνέχεια οι εν λόγω δίνες εφελκούνται οριζόντια, όπως ακριβώς αναφέρεται και από τους SF05. Ταυτόχρονα εμφανίζεται ένα πυκνό και παχύ στρώμα θετικής στροβιλότητας (δηλ. ωρολογιακής φοράς περιδινήσεις), το οποίο εκτείνεται από την ΕΕ ως το επίπεδο της κοιλίας του κύματος. Παράλληλα ένα λεπτό στρώμα πυκνής αρνητικής στροβιλότητας (δηλ. αντι-ωρολογιακής φοράς περιδινήσεις) κυριαρχεί κοντά στον πυθμένα, όπως αναφέρεται από τους SF05 και Nadaoka et al (1989). Στην περιοχή έναρξης της θραύσης και τον πόδα του θραυόμενου κύματος, η μέγιστη προσομοιωμένη ακατέργαστη στροβιλότητα είναι διπλάσια σε σύγκριση με τη μέση στροβιλότητα (65 sec^{-1}) στα πειράματα των SF05. Αυτή απομειώνεται γρήγορα περίπου στο μισό και διατηρεί την τιμή της στην περιοχή προέλασης του αντίστροφου υδραυλικού άλματος, όπου οι συνεκτικές δίνες διασπείρονται αισθητά κατά μήκος της ΕΕ, όπως και στους SF05. Σε όλες τις υπόλοιπες περιοχές του υπολογιστικού πεδίου, η ροή είναι σχεδόν αστρόβιλη εκτός από την περιοχή ανάντι του θραυόμενου κύματος, όπου παρατηρούνται ποσότητες αργά μεταφερόμενης υπολειμματικής στροβιλότητας χαμηλών τιμών, λόγω του περάσματος των προηγούμενων κυματισμών (Σχήμα 1). Παραμένουσες διαμήκειες δομές αρνητικής στροβιλότητας, όμοιες με στρώμα ανάμιξης, παρατηρούνται κοντά στον πυθμένα μπροστά από τον επιφανειακό στρόβιλο (SF05 και Nadaoka et al, 1989). Η τοπολογία, τα ποιοτικά και τα ποσοτικά χαρακτηριστικά αυτών των συνεκτικών δομών εντός ΖΘ είναι πολύ σημαντικά για την ανακίνηση και την αώρηση του πυθμενικού ιζήματος. Οι εν λόγω δομές δρουν ως περικλειστοί θύλακες, οι οποίοι μεταφέρουν το ίζημα, διαμορφώνοντας έτσι τη στερεομεταφορά εγκάρσια στην ακτή.



Σχήμα 7: Στιγμιότυπα του πεδίου στροβιλότητας για τη θραύση παράκτιων κυματισμών τύπου κατάδυσης από τις προσομοιώσεις με το μοντέλο SPHysics. Συνεκτικές τυρβώδεις δομές για δίνες μεγάλης και μεσαίας κλίμακας.

3.5 ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΣΤΗΝ ΑΚΤΗ ΚΥΜΑΤΟΓΕΝΗ ΡΕΥΜΑΤΑ

Επιπρόσθετα γίνεται εστίαση στην προσομοίωση των κυματογενών μέσων στο χρόνο ροών εντός ΖΘ, συγκεκριμένα το εγκάρσιο στην ακτή ρεύμα επιστροφής (undertow) και την εγκάρσια προς την ακτή ροή μεταφοράς μάζας (ρεύμα Stokes). Στο Σχήμα 8 παρουσιάζονται τα μέσα στο χρόνο κινηματικά χαρακτηριστικά για όλο το υπολογιστικό πεδίο και την περίπτωση ελέγχου 11. Το ρεύμα Stokes πάνω από το επίπεδο της κοιλίας και το ρεύμα επιστροφής κάτω από αυτό, είναι ευκρινώς ορατά. Ακόμα και η αναστροφή της ροής στην οριακή στοιβάδα κοντά στον πυθμένα προς την ακτή αναπαράγεται ποιοτικά ευλογοφανώς. Η μεσοστάθμιση του διανυσματικού πεδίου των ταχυτήτων γίνεται για τη 'βρεγμένη' περίοδο (δηλ. το χρόνο για τον οποίο ένα σημείο είναι βυθισμένο στο νερό μέσα στη διάρκεια μιας κυματικής περιόδου) προκαλώντας έτσι την εμφάνιση των μέγιστων τιμών στο επίπεδο της περιβάλλουσας των κορυφών του κύματος ακριβώς όπως και στους SF05. Ολοκληρώνοντας κατά την πραγματική κυματική περίοδο οι κατακόρυφες κατανομές των μέσων ταχυτήτων συγκλίνουν σε μηδενικές τιμές στην περιβάλλουσα των κυματοκορυφών, όπως παρουσιάζεται και από τους Svendsen & Lorenz (1989). Οι μέγιστες τιμές για αυτές τις κατανομές εντοπίζονται κατά τη διάρκεια της έναρξης της θραύσης και διατηρούνται υψηλές κατά την προέλαση του αντίστροφου υδραυλικού άλματος. Τα μεγέθη τους ελαττώνονται σε πολύ μικρές τιμές στο επίπεδο της περιβάλλουσας των κοιλιών και κάτω από αυτήν, αφού η 'βρεγμένη' περίοδος καταγραφής ταυτίζεται με την πραγματική κυματική περίοδο T , σε αυτήν την περιοχή. Ακόμα μια θετική απόδοση του μοντέλου SPHysics είναι η αποτύπωση της προελαύνουσας μη γραμμικότητας των κυματισμών μέχρι το σημείο έναρξης της θραύσης. Το επίπεδο της μέσης παράκτιας κυματογενούς ανύψωσης της ΕΕ βρίσκεται σε αληθοφανές σημείο σε σχέση με τις περιβάλλουσες των κοιλιών και των κορυφών των κυματισμών για όλο το εύρος του πεδίου. Η περιοχή της ΖΘ στο Σχήμα 8 εμφανίζει πολύ μεγάλες ομοιότητες με την αντίστοιχη αναπαράσταση στο άρθρο των SF05.



Σχήμα 8: Κατακόρυφες κατανομές των διανυσμάτων των μέσων στο χρόνο 'βρεγόμενων' ταχυτήτων από διακριτούς μετρητές σε όλο το πεδίο. Διάκριση των ρευμάτων επιστροφής και Stokes, οριοθετημένων από τις περιβάλλουσες της κοιλίας (ερυθρή ευρεία τετμημένη γραμμή), της κορυφής (κυανή βραχεία τετμημένη γραμμή) και της κυματογενούς ανύψωσης της ΕΕ (πράσινη εστιγμένη-τετμημένη γραμμή).

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται ενδελεχώς η υδροδυναμική συμπεριφορά παράκτιων μη γραμμικών μονοχρωματικών κυματισμών, που θραύονται με μορφή ασθενούς κατάδυσης πάνω σε ήπια κεκλιμένη αδιαπέρατη επιφάνεια. Γίνεται χρήση της

μεθόδου αριθμητικής προσομοίωσης SPH σε συνδυασμό με ένα μοντέλο SPS για το 'κλείσιμο' της τύρβης, παρομοίως με τα μοντέλα τύπου LES-SGS. Επιχειρείται βαθμονόμηση, μέσω λεπτομερούς χωρικής διακριτοποίησης, της πιο πρόσφατης εκδοχής του μοντέλου SPHysics v.2 έναντι των πειραματικών δεδομένων των Stansby & Feng (2005). Επιτυγχάνεται συμφωνία αναφορικά με την κατανομή των υψών κύματος, τη μέση κυματογενή ανύψωση της ΕΕ, τις περιβάλλουσες των κορυφών και των κοιλίων των κυμάτων, τις τιμές δειγματικού και τετραγωνικού μέσου της ανύψωσης της ΕΕ και των μέσων στο βάθος ταχυτήτων. Επιπρόσθετα διερευνώνται τα τυρβώδη χαρακτηριστικά της υδροδυναμικής ροής εντός της ΖΘ. Τα φάσματα Fourier των τυρβωδών συνιστωσών των ταχυτήτων αποκαλύπτουν ιστροπική συμπεριφορά της τύρβης για σχετικά υψηλές συχνότητες μόνο σε περιοχές με έντονα διατμητικά φαινόμενα, όπως η ΕΕ στην περιοχή έναρξης της θραύσης. Συνεκτικές τυρβώδεις δομές και επαναλαμβανόμενα μορφώματα στροβιλότητας αναπαράγονται με πολύ ικανοποιητικό τρόπο σε σύγκριση με αντίστοιχες πειραματικές μελέτες (Nadaoka et al, 1989 και Stansby & Feng, 2005). Επιπλέον οι μέσες στο χρόνο τιμές των αριθμητικών κινηματικών χαρακτηριστικών της ροής δείχνουν, ότι οι μέσες κυματογενείς ροές (ρεύμα Stokes και επιστροφής) προσομοιώνονται ικανοποιητικά, αφού αποδίδονται παρόμοια αποτελέσματα με τα αντίστοιχα πειραματικά των Stansby & Feng (2005).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Cox, D.T., Kobayashi, N. and Okayasu, A., 1994. *Vertical Variations of Fluid Velocities and Shear Stress in Surf Zones*. Proc. 24th ICCE, Kobe, ASCE, pp. 98-112.
- Dalrymple, R.A. and Rogers, B.D., 2006. *Numerical Modeling of Water Waves with the SPH Method*. Coast. Eng., Vol. 53, pp. 141-147.
- Gómez-Gesteira, M., Rogers, B.D., Dalrymple, R.A., Crespo, A.J.C. and Narayanaswamy, M., 2010a. *User Guide for the SPHysics Code v2.0*.
- Gómez-Gesteira, M., Rogers, B.D., Dalrymple, R.A. and Crespo, A.J.C., 2010b. *State-of-the-art of Classical SPH for Free-Surface Flows*. J. Hydr. Res., Vol. 48, pp. 6-27.
- Khayyer, A., Gotoh, H. and Shao, S.D., 2005. *Corrected Incompressible SPH Method for Accurate Water-Surface Tracking in Breaking Waves*. Coast. Eng., Vol. 55, pp. 236-250.
- Lesieur, M., 1990. *Turbulence in Fluids*, 2nd Ed., Kluwer.
- Makris, C.V., Memos, C.D. and Krestenitis, Y.N., 2009. *Numerical Simulation of Near-Shore Wave Breaking Using SPH Method*. Proc. 4th Int. Short Conf. on Applied Coast. Res. (SCACR), Barcelona, pp. 241-252.
- Makris, C.V., Krestenitis, Y.N. and Memos, C.D., 2010a. *SPH Numerical Simulation of Surf Zone Characteristics*. Proc. 6th Int. Symp. on Env. Hydr., Athens, Vol. 1, pp. 445-450.
- Makris, C.V., Krestenitis, Y.N. and Memos, C.D., 2010b. *SPHysics Code Validation Against a Near-shore Wave Breaking Experiment*. Proc. 5th Int. SPH Eur. Res. Interest Community Workshop, Manchester, pp. 245-252.
- Makris, C.V., Memos, C.D. and Krestenitis, Y.N., 2011. *Modeling of Breaking Wave Dynamics, Surf Zone Turbulence and Wave-Induced Mean Flows with the SPH Numerical Method*. Proc. 5th Int. Short Conf. on Applied Coast. Res., Aachen, pp. 507-514.
- Monaghan, J.J., 2005. *Smoothed Particle Hydrodynamics*. Rep. Prog. Phys., Vol. 68, pp. 1703-1759.

- Nadaoka, K., Hino, M. and Koyano, Y., 1989. *Structure of the Turbulent Flow Field Under Breaking Waves in the Surf Zone*. J. Fluid Mech., 204: 359-387.
- Peregrine, D.H. and Svendsen, I.A., 1978. *Spilling Breakers, Bores and Hydraulic Jumps*. Proc. 16th Int. Conf. Coastal Eng., Hamburg, ASCE, pp. 540-550.
- Shao, S. and Ji, C., 2006. *SPH Computation of Plunging Waves Using a 2-D Sub-Particle Scale (SPS) Turbulence Model*. Int. J. Numer. Meth. Fluids, Vol. 51, pp. 913-936.
- Stansby, P.K. and Feng, T., 2005. *Kinematics and Depth-Integrated Terms in Surf Zone Waves from Laboratory Measurement*. J. Fluid Mech., Vol. 529, pp. 279-310.
- Stive, M.J.F., 1984. *Energy Dissipation in Waves Breaking on Gentle Slopes*. Coast. Eng., Vol. 8, pp. 99-127.
- Svendsen, I.A. and Lorenz, R.S., 1989. *Velocities in Combined Undertow and Longshore Currents*. Coast. Eng., Vol. 13, pp. 55-79.
- Ting, F.C.K. and Kirby, J.T., 1994. *Observation of Undertow and Turbulence in a Laboratory Surf Zone*. Coast. Eng., Vol. 24, pp. 51-80.

ΜΕΛΕΤΗ ΘΡΑΥΣΗΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ ΜΕ ΜΟΝΤΕΛΟ BOUSSINESQ ΣΕ ΔΥΟ ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ

Ευστράτιος Ν. Φονιάς^{1*}, Κωνσταντίνος Δ. Μέμος², Θεοφάνης Β. Καραμπάς³

¹Μεταπτυχιακός Φοιτητής, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών
Μηχανικών, 15780, Ζωγράφος, Ελλάδα

*stratos.fonias@gmail.com

²Καθηγητής, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, 15780,
Ζωγράφος, Ελλάδα

³Αναπληρωτής Καθηγητής, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα
Πολιτικών Μηχανικών, 54006, Θεσσαλονίκη, Ελλάδα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία αναλύεται το τροποποιημένο μοντέλο Boussinesq των Memos et al. (2005) σε δύο οριζόντιες διαστάσεις με χαρακτηριστικά βελτιωμένης διασποράς και ήπιας μη γραμμικότητας, παραγόμενο από τις εξισώσεις των Beji και Nadaoka (1996). Το μοντέλο προσομοιώνει κυματικά φαινόμενα λόγω μεταβολής του πυθμένα. Για την αριθμητική επίλυση επιστρατεύεται ένα σχήμα τέταρτης τάξης πρόβλεψης-διόρθωσης απλοποιώντας την αριθμητική διαδικασία. Βασικός στόχος είναι η μελέτη θραύσης κυματισμών λόγω επίδρασης πυθμένα, μέσω μοντέλου θραύσης τυρβώδους συνεκτικότητας. Το μοντέλο εξετάζεται έναντι διάδοσης απλών και σύνθετων κυματισμών και δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα, σε σχέση με πειραματικά δεδομένα των Beji και Battjes (1993, 1994) και το λογισμικό MIKE21 BW.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Κυματική θραύση, διδιάστατη διάδοση, τυρβώδης συνεκτικότητα, MIKE 21.

STUDY OF WAVE BREAKING THROUGH A BOUSSINESQ MODEL IN TWO HORIZONTAL DIMENSIONS

Efstratios N. Fonias^{1*}, Constantine D. Memos², Theofanis V. Karambas³

¹Postgraduate Student, National Technical University of Athens, School of Civil
Engineering, 15780, Zografos, Greece

*stratos.fonias@gmail.com

²Professor, National Technical University of Athens, School of Civil Engineering,
15780, Zografos, Greece

³Associate Professor, Aristotle University of Thessaloniki, Department of Civil
Engineering, 54006, Thessaloniki, Greece

ABSTRACT

In the present paper, the modified Boussinesq model by Memos et al. (2005) in two horizontal dimensions with improved dispersion and weakly nonlinear characteristics is analysed. The model, based on the equations of Beji and Nadaoka (1996), is capable of simulating wave phenomena due to bathymetric changes. A fourth-order predictor-corrector numerical scheme is employed to simplify the numerical implementation. The study of wave breaking due to variations in bottom depth, through an eddy viscosity breaking model is the keystone of the present study. The model is verified against regular and random wave propagation. The results are satisfactory compared against experimental data of Beji and Battjes (1993, 1994) and software MIKE21 BW.

KEY WORDS: Wave-breaking, two-dimensional, eddy viscosity, MIKE 21.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μελέτη και ποσοτικοποίηση της διάδοσης των κυματισμών στην ανοικτή θάλασσα αλλά και σε αβαθή ύδατα θεωρείται ως το πιο θεμελιώδες στοιχείο όχι μόνο για τον σχεδιασμό τεχνικών έργων, αλλά και για την κατανόηση φαινομένων που εμφανίζονται στην παράκτια ζώνη. Τα κύματα που διαδίδονται προς την ακτή υπόκεινται σε μεγάλο αριθμό μεταβολών που οφείλονται στη ρήγωση και τη διάθλαση, λόγω βαθυμετρικών μεταβολών, περιθλαση και ανάκλαση (μερική ή ολική) λόγω αλληλεπίδρασης με εμπόδια που παρεμβάλλονται μεταξύ κυμάτων και ακτής, κτλ. Οι επιστήμονες έχουν αναπτύξει πλήθος θεωριών και μοντέλων για την περιγραφή των κυματικών μετασχηματισμών, μεταξύ των οποίων τα μοντέλα Boussinesq δύνανται να προσομοιώσουν ικανοποιητικά την κυματική διάδοση κυρίως στα αβαθή νερά. Τα πιο πρόσφατα μοντέλα έχουν δυνατότητες ακριβούς προσομοίωσης κυματισμών πλήρους διασποράς και εντόνως μη γραμμικούς. Ωστόσο, πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή καθώς τα μοντέλα αυτά συνήθως δεν προσομοιώνουν την κυματική θραύση και την προκύπτουσα διάχυση ενέργειας. Η θραύση των κυματισμών αποτελεί τη σημαντικότερη διεργασία στη ζώνη θραύσης και άρα ένα πλήρες μοντέλο θα πρέπει να δύναται να προσμετρήσει τη συνεισφορά του φαινομένου αυτού.

Πλήθος προσπαθειών έχουν συντελεσθεί προκειμένου να περιλάβουν σε μοντέλα την κυματική θραύση. Η πρώτη επιτυχημένη από αυτές ήταν το μοντέλο θραύσης του επιφανειακού κυλίνδρου που προτάθηκε ως αρχική σύλληψη από τον Svendsen (1984) και εφαρμόστηκε από την εργασία των Schäffer et al. (1993). Η προσέγγιση αυτή προβλέπει την προσθήκη επιπλέον όρου στις εξισώσεις διατήρησης της ορμής συνδεδεμένου με το πάχος του επιφανειακού κυλίνδρου, το οποίο με τη σειρά του σχετίζεται με την κλίση του κυματικού μετώπου. Η εργασία των Madsen et al. (1997a) επέκτεινε την προσέγγιση του μοντέλου επιφανειακού κυλίνδρου σε δύο οριζόντιες διαστάσεις και έλεγξε φασματικούς κυματισμούς (1997b).

Μία πιο πρόσφατη προσέγγιση, που προτάθηκε από τους Svendsen et al. (1996), περιλαμβάνει προσθήκη επιπλέον όρου και στην εξίσωση διατήρησης μάζας και στις εξισώσεις διατήρησης ορμής. Στην μελέτη τους, η οποία εμφανίζει ομοιότητες με το μοντέλο του επιφανειακού κυλίνδρου, η ροή δε θεωρείται πλέον αστρόβιλη όπως στην προηγούμενη θεώρηση. Συγκεκριμένα θεωρείται ένα σύνθετο προφίλ ροής, διαχωρίζοντας την υδάτινη στήλη σε ένα αστρόβιλο τμήμα υποκείμενο ενός τμήματος με στροβιλότητα το οποίο σχετίζεται με τον επιφανειακό κύλινδρο που παράγει τύρβη. Η θεωρία αυτή εισήγαγε μία παράμετρο στροβιλότητας η οποία θα πρέπει να προσδιορισθεί. Οι Veeramony και Svendsen (2000) διαχώρισαν τις δύο μορφές ροής, εισάγοντας δύο διαφορετικές οριζόντιες ταχύτητες, μία για το αστρόβιλο τμήμα ροής και μία για το στροβιλό τμήμα.

Μία διαφορετική προσέγγιση έγινε από τον Zelt (1991), που πρότεινε μία θεώρηση τυρβώδους συνεκτικότητας για την περιγραφή της κυματικής θραύσης με την εισαγωγή ενός όρου διάχυσης ενέργειας στις εξισώσεις διατήρησης ορμής. Το μοντέλο θραύσης τυρβώδους συνεκτικότητας αναπτύχθηκε περαιτέρω από τους Kennedy et al. (1999), το οποίο συνδυαζόμενο με ένα μοντέλο Boussinesq σε μία οριζόντια διάσταση, παρουσιάζει ένα πιο ρεαλιστικό τρόπο έναρξης και εξέλιξης της θραύσης απλών κυματισμών πάνω από πυθμένα ήπιας κλίσης. Το μοντέλο επεκτάθηκε από τους Chen et al. (2000) σε δύο οριζόντιες διαστάσεις.

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στη χρήση ενός τροποποιημένου μοντέλου τύπου Boussinesq (Memos et al. (2005)) προερχόμενο από τις εργασίες των Beji και Nadaoka (1996) και των Li και Zhan (2001). Το μοντέλο αυτό δύναται να προσομοιώσει την διάδοση κυμάτων με βελτιωμένα χαρακτηριστικά διασποράς και ελαφρώς μη γραμμικό μέσω ενός αριθμητικού σχήματος ακρίβειας τέταρτης τάξης πρόβλεψης – διόρθωσης για τη διακριτοποίηση των εξισώσεων. Αρχικά παρουσιάζεται το κυματικό μοντέλο και οι προσθήκες που εισήχθησαν για την προσομοίωση της κυματικής θραύσης λόγω επίδρασης

πυθμένα. Στη συνέχεια το μοντέλο παραμετροποιείται και επιβεβαιώνεται μέσω πειραματικών δεδομένων και αποτελεσμάτων εφαρμογής του μοντέλου MIKE21 BW. Οι έλεγχοι αφορούν κυματική διάδοση απλών και σύνθετων κυματισμών πάνω από αδιαπέρατο ύφαλο τραπεζοειδούς διατομής.

2. ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Το προτεινόμενο μοντέλο παράγεται από τις εξισώσεις που παρουσίασαν αρχικά οι Beji και Nadaoka (1996) για ήπια μεταβαλλόμενο πυθμένα. Η ολοκληρωμένη κατά την έννοια του βάθους εξίσωση διατήρησης μάζας δίνεται από τη σχέση:

$$\zeta_t + \nabla[(d + \zeta)\mathbf{u}] = 0 \quad (2.1)$$

όπου ζ είναι η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας, d είναι το βάθος ύδατος, $\mathbf{u} = (u, v)$ το μέσο κατά βάθος διάνυσμα ταχύτητας και t είναι ο χρόνος. Η εξίσωση συνέχειας ισχύει για κάθε βάθος ύδατος χωρίς περιορισμούς στη μη γραμμικότητα.

Η εξίσωση διατήρησης ορμής για την περίπτωση δύο οριζοντίων διαστάσεων γράφεται:

$$\begin{aligned} & \mathbf{u}_t + (\mathbf{u}\nabla)\mathbf{u} + g\nabla\zeta \\ & = (1 + \beta)\frac{d}{2}\nabla[\nabla(d\mathbf{u}_t)] + \beta\frac{gd}{2}\nabla[\nabla(d\nabla\zeta)] - (1 + \beta)\frac{d^2}{6}\nabla(\nabla\mathbf{u}_t) - \beta\frac{gd^2}{6}\nabla(\nabla^2\zeta) \end{aligned} \quad (2.2)$$

όπου g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας ενώ β είναι μία παράμετρος. Το σύστημα των εξισώσεων έχει ισχύ έως το όριο των βαθέων υδάτων εάν $\beta = 1/5$ ($d/L_0 < 0.50$, L_0 το μήκος κύματος στην περιοχή βαθέων υδάτων).

Εκφράζοντας την εξίσωση διατήρησης ορμής χρησιμοποιώντας τις δύο οριζόντιες διαστάσεις x και y λαμβάνουμε μία μορφή των εξισώσεων όμοια με εκείνη που δόθηκε από τους Li και Zhan (2001):

$$\begin{aligned} u_t + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + g\frac{\partial \zeta}{\partial x} & = (1 + \beta)\left(\frac{d^2}{3}u_{xxt} + dd_xu_{xt}\right) \\ & + (1 + \beta)\frac{1}{3}d^2v_{xyt} + (1 + \beta)\frac{1}{2}(dd_xv_{yt} + dd_yv_{xt}) + \beta gd \cdot \left(d_x \cdot \zeta_{xx} + \frac{1}{2}d_y \cdot \zeta_{xy} + \frac{1}{2}d_x \cdot \zeta_{yy}\right) \\ & + \beta\frac{gd^2}{3} \cdot (\zeta_{xxx} + \zeta_{xyy}) \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} v_t + u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} + g\frac{\partial \zeta}{\partial y} & = (1 + \beta)\left(\frac{d^2}{3}v_{yyt} + dd_yv_{yt}\right) \\ & + (1 + \beta)\frac{1}{3}d^2u_{xyt} + (1 + \beta)\frac{1}{2}(dd_xu_{yt} + dd_yu_{xt}) + \beta gd \cdot \left(d_y \cdot \zeta_{yy} + \frac{1}{2}d_x \cdot \zeta_{xy} + \frac{1}{2}d_y \cdot \zeta_{xx}\right) \\ & + \beta\frac{gd^2}{3} \cdot (\zeta_{yyy} + \zeta_{xxy}) \end{aligned} \quad (2.4)$$

3. ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΠΙΛΥΣΗΣ

3.1 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΣΧΗΜΑ

Οι εξισώσεις (2.1), (2.3) και (2.4) διακριτοποιούνται κατά τρόπο ώστε να εφαρμοσθεί το γνωστό αριθμητικό μοντέλο πρόβλεψης – διόρθωσης.

Αρχικά, οι εξισώσεις διακριτοποιούνται μέσω του ακρίβειας 3^{ns} τάξης ρητού σχήματος Adams – Bashforth (Press et al. 1989; Wei and Kirby 1995). Οι τιμές των μεγεθών ζ , u και v στο χρονικό βήμα $n + 1$ προβλέπονται από τις αντίστοιχες τιμές τους στις χρονικές στάθμες n , $n - 1$ και $n - 2$:

$$\zeta_{i,j}^{n+1} = \zeta_{i,j}^n + \frac{dt}{12} \cdot (23 \cdot E_{i,j}^n - 16 \cdot E_{i,j}^{n-1} + 5 \cdot E_{i,j}^{n-2}) \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} u_{i,j}^{n+1} - (1 + \beta)d_{i,j}d_{x_{i,j}}(u_{x_{i,j}}^n - u_{x_{i,j}}^{n-1}) - (1 + \beta)\frac{d_{i,j}^2}{3}(u_{xx_{i,j}}^{n+1} - u_{xx_{i,j}}^n) \\ = u_{i,j}^n + \frac{dt}{12} \cdot (23 \cdot F'_{i,j}^n - 16 \cdot F'_{i,j}^{n-1} + 5 \cdot F'_{i,j}^{n-2}) \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} v_{i,j}^{n+1} - (1 + \beta)d_{i,j}d_{y_{i,j}}(v_{y_{i,j}}^n - v_{y_{i,j}}^{n-1}) - (1 + \beta)\frac{d_{i,j}^2}{3}(v_{yy_{i,j}}^{n+1} - v_{yy_{i,j}}^n) \\ = v_{i,j}^n + \frac{dt}{12} \cdot (23 \cdot G'_{i,j}^n - 16 \cdot G'_{i,j}^{n-1} + 5 \cdot G'_{i,j}^{n-2}) \end{aligned} \quad (3.3)$$

όπου:

$$E(\zeta, u, v) = [(d + \zeta)u]_x + [(d + \zeta)u]_y \quad (3.4)$$

$$F' = F + F_1 + Z3x \quad (3.5)$$

$$F = uu_x + vu_x + g\zeta_x \quad (3.6)$$

$$F_1 = (1 + \beta)\frac{d^2}{3}v_{xyt} + \frac{1}{2}(1 + \beta)\left(dd_x\frac{\partial v_t}{\partial y} + dd_y\frac{\partial v_t}{\partial x}\right) \quad (3.7)$$

$$Z3x = \beta\frac{gd^2}{3}(\zeta_{xxx} + \zeta_{xyy}) + \beta gd\left(d_x\zeta_{xx} + \frac{1}{2}d_y\zeta_{xy} + \frac{1}{2}d_x\zeta_{yy}\right) \quad (3.8)$$

$$G' = G + G_1 + Z3y \quad (3.9)$$

$$G = vv_x + uv_x + g\zeta_y \quad (3.10)$$

$$G_1 = (1 + \beta)\frac{d^2}{3}u_{xyt} + \frac{1}{2}(1 + \beta)\left(dd_y\frac{\partial u_t}{\partial x} + dd_x\frac{\partial u_t}{\partial y}\right) \quad (3.11)$$

$$Z3y = \beta\frac{gd^2}{3}(\zeta_{yyy} + \zeta_{xxy}) + \beta gd\left(d_y\zeta_{yy} + \frac{1}{2}d_x\zeta_{xy} + \frac{1}{2}d_y\zeta_{xx}\right) \quad (3.12)$$

Η παραπάνω έκφραση των σχέσεων (3.1)-(3.3) αποτελεί γενική έκφραση τριδιαγώνιου συστήματος γραμμικού ως προς τους αγνώστους στη χρονική στάθμη $n + 1$ (ή $k + 1$).

Το σχήμα διόρθωσης είναι η 4^{ns} τάξης μέθοδος Adams-Moulton που δίνεται μέσω των εκφράσεων:

$$\zeta_{i,j}^{n+1} = \zeta_{i,j}^n + \frac{dt}{24} \cdot (9 \cdot E_{i,j}^{n+1} + 19 \cdot E_{i,j}^n - 5 \cdot E_{i,j}^{n-1} + E_{i,j}^{n-2}) \quad (3.13)$$

$$u_{i,j}^{n+1} = u_{i,j}^n + \frac{dt}{24} \cdot (9 \cdot F'_{i,j}{}^{n+1} + 19 \cdot F'_{i,j}{}^n - 5 \cdot F'_{i,j}{}^{n-1} + F'_{i,j}{}^{n-2}) \quad (3.14)$$

$$v_{i,j}^{n+1} = v_{i,j}^n + \frac{dt}{24} \cdot (9 \cdot G'_{i,j}{}^{n+1} + 19 \cdot G'_{i,j}{}^n - 5 \cdot G'_{i,j}{}^{n-1} + G'_{i,j}{}^{n-2}) \quad (3.15)$$

Οι $n + 1$ τιμές διορθώνονται μέσω μίας επαναληπτικής διαδικασίας όπου οι ταχύτητες επαναυπολογίζονται από τις παλαιότερες της k επανάληψης μέσω της σχέσης:

$$\begin{aligned} u_t^{k+1} - (1 + \beta) \left(\frac{d^2}{3} \frac{\partial^2 u_t^{k+1}}{\partial x^2} + dd_x \frac{\partial u_t^{k+1}}{\partial x} \right) &= -u^k \frac{\partial u^k}{\partial x} - v^k \frac{\partial u^k}{\partial y} - g \frac{\partial \zeta^k}{\partial x} \\ + (1 + \beta) \left[\frac{1}{3} d^2 \frac{\partial^2 v_t^k}{\partial x \partial y} + \frac{1}{2} \left(dd_x \frac{\partial v_t^k}{\partial y} + dd_y \frac{\partial v_t^k}{\partial x} \right) \right] \\ + \beta g d \cdot \left(d_x \cdot \zeta_{xx}^k + \frac{1}{2} d_y \cdot \zeta_{xy}^k + \frac{1}{2} d_x \cdot \zeta_{yy}^k \right) &+ \beta \frac{gd^2}{3} \cdot (\zeta_{xxx}^k + \zeta_{xyy}^k) \end{aligned} \quad (3.16)$$

για τις συνιστώσες της ταχύτητας u και v .

Το απλό επαναληπτικό κριτήριο για τη διόρθωση των αποτελεσμάτων του σχήματος διόρθωσης εφαρμόζεται έως ότου η απόκλιση μεταξύ δύο διαδοχικών αποτελεσμάτων των παραμέτρων ζ , u και v γίνει μικρότερο από μία προκαθορισμένη τιμή που εκφράζεται με τη σχέση:

$$\Delta f = \frac{\sum_{i=1,j=1}^{i=M,j=N} |f_{i,j}^{n+1} - f_{i,j}^*|}{\sum_{i=1,j=1}^{i=M,j=N} |f_{i,j}^{n+1}|} \quad (3.17)$$

όπου f είναι μία εκ των προαναφερθεισών μεταβλητών και Δf είναι η απόκλιση μεταξύ δύο διαδοχικών αποτελεσμάτων η οποία ελήφθη ότι δεν μπορεί να υπερβεί το 1%.

3.2 ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

3.2.1 Απορροφητικά όρια

Στα όρια του υπολογιστικού πεδίου εφαρμόζουμε στοιβάδες απορρόφησης για τους εξερχόμενους κυματισμούς σύμφωνα με τη μελέτη των Wei and Kirby (1995). Εκεί επιβάλλεται απομείωση των μεταβλητών ζ , u και v μέσω μίας παραμέτρου rm η οποία συνιστά τον παράγοντα απορρόφησης που δίνεται (σε δύο διαστάσεις) από τις εκφράσεις:

$$rm_x = 1 + dks(i, j) = 1 + 0.25 \cdot f(x) \quad \text{ή} \quad rm_y = 1 + 0.25 \cdot f(y) \quad (3.18)$$

όπου για τον x άξονα (και όμοια για τον άξονα y) έχουμε:

$$f(x) = \frac{\exp\left(\frac{x - x_s}{x_m - x_s}\right)^2 - 1}{\exp(1) - 1} \quad (3.19)$$

και x_s είναι η τετμημένη της αρχής της απορροφητικής στοιβάδας (για τη x διεύθυνση το υπολογιστικό μοντέλο εκτείνεται από $x = 0$ έως $x = x_m$ και το απορροφητικό όριο από

$x = x_s$ έως $x = x_m$). Συνιστάται η εφαρμογή στοιβάδων απορρόφησης με εύρος ίσο με δύο ή τρεις φορές το δημιουργούμενο μήκος κύματος.

3.2.2 Εσωτερική πηγή κυματισμών

Στην παρούσα μελέτη, χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση παραγωγής κυματισμών εντός του υπολογιστικού πεδίου που προτάθηκε από την εργασία των Memos et al. (2005) εισάγοντας την κατά μήκος του άξονα y (Σχήμα 1) σύμφωνα με την έκφραση:

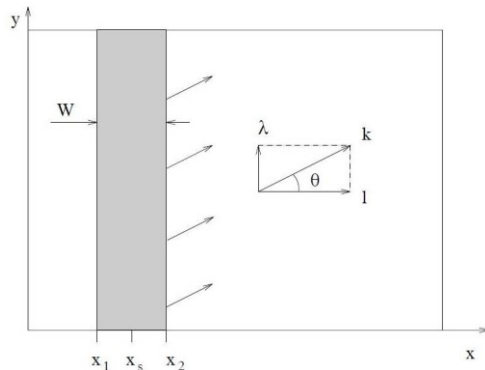
$$f(x, y, t) = g(x) \cdot s(y, t) \quad (3.20)$$

όπου $g(x)$ είναι μία συνάρτηση κατανομής γκαουσιανού τύπου και $s(y, t)$ είναι συνάρτηση των χρονοσειρών των ανυψώσεων που εισέρχονται στο υπολογιστικό πεδίο. Οι εξισώσεις εκφράζονται μέσω των σχέσεων:

$$g(x) = \exp[-b(x - x_{sf})^2] \quad (3.21)$$

$$s(y, t) = D \sin(\lambda y - \omega t) \quad (3.22)$$

όπου b είναι παράμετρος σχήματος για τη συνάρτηση πηγής, x_{sf} είναι η τετμημένη του κέντρου (κατά x) της γραμμικής πηγής, D είναι το μέγεθος της συνάρτησης πηγής και $\lambda = k \sin(\theta)$ είναι ο κυματαριθμός κατά τον άξονα y , όπου k ο κυματαριθμός σύμφωνα με τη γραμμική θεωρία.



Σχήμα 1: Ορισμός της συνάρτησης πηγής εντός του υπολογιστικού πεδίου.

Για την εισαγωγή ενός απλού κυματισμού στο υπολογιστικό πεδίο, το μέγεθος D δίνεται από την έκφραση:

$$D = \frac{2\alpha_0(1 + B_1(kd)^2)(\omega^2 + B_1gk^4d^3)\cos\theta}{\omega I_1 k \left[1 + \left(B_1 + \frac{1}{3} \right) (kd)^2 \right]} \quad (3.23)$$

όπου $B_1 = 1/15$ και η παράμετρος I_1 ορίζεται από τη σχέση:

$$I_1 = \sqrt{\frac{\pi}{b}} \cdot \exp(-l^2/4b) \quad (3.24)$$

Στην παραπάνω εξίσωση $l = k \cos(\theta)$ είναι ο κυματαριθμός κατά τον άξονα x , ενώ όσο μεγαλύτερη τιμή λαμβάνει η παράμετρος b , τόσο λιγότερο πλάτος καταλαμβάνει η

συνάρτηση πηγής. Το πλάτος της συνάρτησης W (Σχήμα 1) είναι ίσο με την απόλυτη τιμή της διαφοράς των συντεταγμένων x_1 και x_2 όπου τα κυματικά ύψη είναι ίσα με $\exp(-5) = 0.0067$ φορές το μέγιστο μέγεθος D . Σαν αποτέλεσμα, οι τιμές x_1 και x_2 πρέπει να ικανοποιούν την εξίσωση:

$$b(x - x_{sf})^2 = 5 \quad (3.25)$$

από την οποία το πλάτος της συνάρτησης πηγής ισούται με:

$$W = |x_2 - x_1| = 2 \sqrt{\frac{5}{b}} \quad (3.26)$$

Δεδομένου ότι L είναι το μήκος κύματος, λαμβάνουμε αποδεκτά αποτελέσματα από την εφαρμογή της συνάρτησης πηγής, όταν το πλάτος είναι ίσο με σχεδόν το μισό μήκος κύματος:

$$W = \delta \frac{L}{2} \quad (3.27)$$

Η παράμετρος δ είναι της τάξεως της μονάδας, ενώ μία τιμή $\delta = 0.3$ δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Συνδυάζοντας τις τελευταίες δύο εξισώσεις έχουμε:

$$b = \frac{80}{\delta^2 L^2} \quad (3.28)$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι στους φασματικούς κυματισμούς η παράμετρος b ορίζεται από τη συχνότητα κορυφής των συνιστωσών της κυματοσειράς.

4. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΘΡΑΥΣΗΣ

Ο κύριος στόχος της παρούσας εργασίας είναι η ποσοτικοποίηση της διάχυσης ενέργειας λόγω θραύσης μέσω της επίδρασης πυθμένα, ώστε το παρόν κυματικό μοντέλο να μπορεί να εφαρμοστεί στη ζώνη θραύσης. Το εγχείρημα αυτό είναι εφικτό με την προσθήκη ενός σχηματισμού τυρβώδους συνεκτικότητας που προτάθηκε από τους Chen et al. (2000), οι οποίοι πρόσθεσαν ένα επιπλέον όρο στις εξισώσεις διατήρησης ορμής (στις δύο οριζόντιες διαστάσεις) που δίνονται μέσω των εκφράσεων:

$$\mathbf{R}_{bx} = \frac{1}{d + \zeta} \cdot \left\{ \left[\mathbf{v}((d + \zeta)u_\alpha)_x \right]_x + \frac{1}{2} \left[\mathbf{v}((d + \zeta)u_\alpha)_y + \mathbf{v}((d + \zeta)v_\alpha)_x \right]_y \right\} \quad (4.1)$$

$$\mathbf{R}_{by} = \frac{1}{d + \zeta} \cdot \left\{ \left[\mathbf{v}((d + \zeta)v_\alpha)_y \right]_y + \frac{1}{2} \left[\mathbf{v}((d + \zeta)u_\alpha)_y + \mathbf{v}((d + \zeta)v_\alpha)_x \right]_x \right\} \quad (4.2)$$

όπου \mathbf{v} είναι η τυρβώδης τοπική συνεκτικότητα στο εμπροσθεν τμήμα της διατομής του κύματος και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\mathbf{v} = B \cdot \delta_b^2 \cdot (d + \zeta) \cdot \zeta_t \quad (4.3)$$

στην οποία, δ_b είναι μία παράμετρος μήκους μείξης που λαμβάνει μία δεδομένη αδιάστατη τιμή ίση με 1.2, ενώ η ποσότητα B μεταβάλλεται από 0 έως 1 και ελέγχει την εμφάνιση διάχυσης ενέργειας:

$$B = \begin{cases} 1, & \zeta_t \geq 2\zeta_t^* \\ \frac{\zeta_t}{\zeta_t^*} - 1, & \zeta_t^* < \zeta_t < 2\zeta_t^* \\ 0, & \zeta_t \leq \zeta_t^* \end{cases} \quad (4.4)$$

Στην παραπάνω έκφραση, η παράμετρος ζ_t^* ορίζει την έναρξη και την παύση της θραύσης μέσω της σχέσης:

$$\zeta_t^* = \begin{cases} \zeta_t^{(F)}, & t \geq T^* \\ \zeta_t^{(I)} + \frac{t - t_0}{T^*} \cdot (\zeta_t^{(F)} - \zeta_t^{(I)}), & 0 \leq t - t_0 < T^* \end{cases} \quad (4.5)$$

στην οποία $T^* = 5\sqrt{d/g}$ είναι ο χρόνος μετάβασης, t_0 είναι ο χρόνος έναρξης θραύσης ($t - t_0$ είναι η «ηλικία» ενός γεγονότος θραύσης), $\zeta_t^{(I)}$ είναι παράμετρος ίση με $0.65\sqrt{gd}$ για ήπια μεταβαλλόμενους πυθμένες και $0.35\sqrt{gd}$ για πυθμένες απότομης κλίσης, ενώ $\zeta_t^{(F)}$ είναι ίση με $0.15\sqrt{gd}$. Σε κάθε γεγονός θραύσης η τυρβώδης συνεκτικότητα φιλτράρεται για λόγους ευστάθειας μέσω ενός φίλτρου τριών σημείων προτού εισαχθεί για τον υπολογισμό της έκφρασης \mathbf{R}_b .

Στη μελέτη του φαινομένου σε δύο οριζόντιες διαστάσεις (2DH), πρέπει να ορισθεί η κυματική κατεύθυνση για τον υπολογισμό της «ηλικίας» του γεγονότος θραύσης. Η κατεύθυνση οριζόμενη από μία γωνία θ , δίνεται από τη σχέση:

$$\theta = \arctan\left(\frac{\zeta_y}{\zeta_x}\right) \quad (4.6)$$

4.1 ΠΡΟΣΘΕΤΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ – ΤΥΡΒΩΔΗΣ ΜΙΞΗ ΕΝΤΟΣ ΥΠΟΚΑΝΑΒΟΥ

Για τον υπολογισμό φαινομένων της ροής σε μικρή κλίμακα και συγκεκριμένα τις τυρβώδεις διεργασίες, χρησιμοποιείται μία προσθήκη υποκανάβου τύπου Smagorinsky (Chen et al., 2000; Kirby et al., 1998), η οποία εισάγει ακόμα έναν όρο \mathbf{F}_{bs} στις εξισώσεις διατήρησης ορμής σύμφωνα με τις σχέσεις:

$$\mathbf{F}_{bsx} = \frac{1}{d + \zeta} \cdot \left\{ \left[v_s((d + \zeta)u_\alpha)_x \right]_x + \frac{1}{2} \left[v_s((d + \zeta)u_\alpha)_y + v_s((d + \zeta)v_\alpha)_x \right]_y \right\} \quad (4.7)$$

$$\mathbf{F}_{bsy} = \frac{1}{d + \zeta} \cdot \left\{ \left[v_s((d + \zeta)v_\alpha)_y \right]_y + \frac{1}{2} \left[v_s((d + \zeta)u_\alpha)_y + v_s((d + \zeta)v_\alpha)_x \right]_x \right\} \quad (4.8)$$

στην οποία v_s είναι η τυρβώδης συνεκτικότητα λόγω της τυρβώδους ροής εντός του υποκανάβου και υπολογίζεται από τη σχέση (Kirby et al., 1998):

$$v_s = c_m \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \left[(U_x)^2 + (V_y)^2 + \frac{1}{2} \cdot (U_y + V_x)^2 \right]^{1/2} \quad (4.9)$$

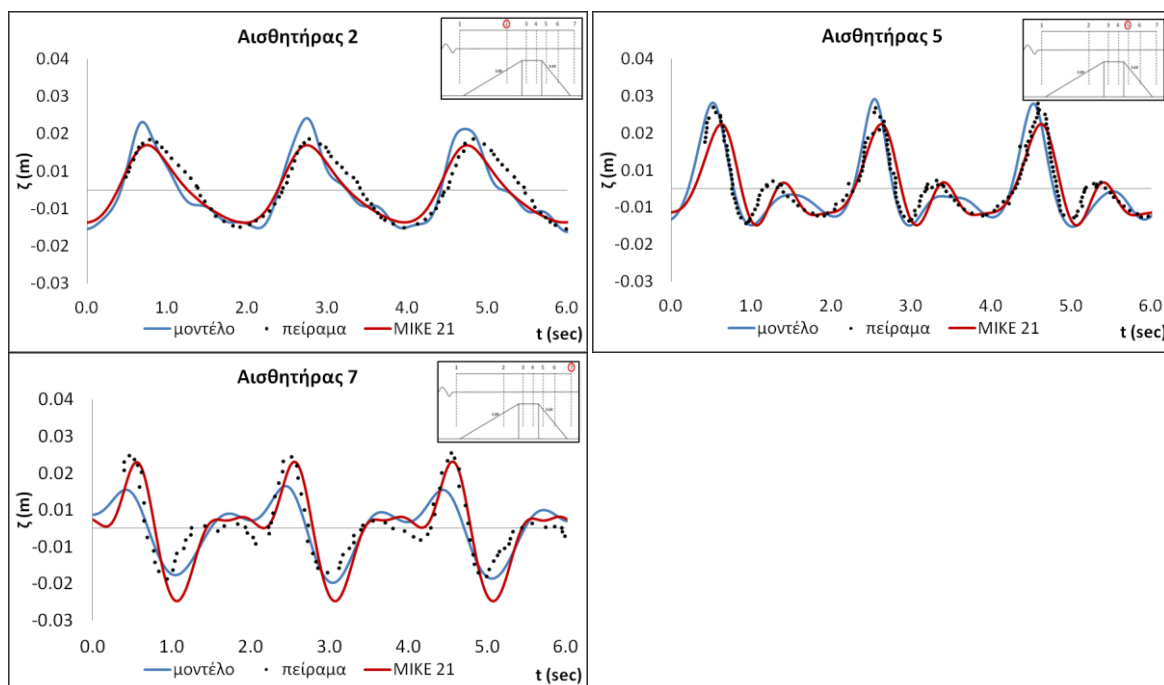
Στην έκφραση αυτή U και V είναι οι μέσες χρονικά ταχύτητες του κυματικού πεδίου, Δx και Δy οι πεπερασμένες διαστάσεις του υποκανάβου κατά τις οριζόντιες διαστάσεις x και y , αντίστοιχα, ενώ c_m είναι μία παράμετρος μίξης ίση με 0.2.

5. ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Το τελικό σύστημα εξισώσεων Boussinesq θα επιβεβαιωθεί έναντι των πειραματικών μονοδιάστατων (1DH) πειραμάτων των Beji και Battjes (1993). Παρόλο που τα πειράματα εκτελέστηκαν σε κυματικό κανάλι και συνεπώς δε δίνουν πληροφορίες σχετικά με διάδοση στη δεύτερη οριζόντια διάσταση, το υπολογιστικό πεδίο διαμορφώνεται ως ψευδο-διδιάστατο δίνοντας δεύτερη ευρεία οριζόντια διάσταση. Τα αριθμητικά αποτελέσματα θα συγκριθούν με τα πειραματικά δεδομένα και λαμβάνονται στο μέσον της δεύτερης ευρείας οριζόντιας διάστασης. Η ίδια υπολογιστική τακτική εφαρμόζεται και στο λογισμικό MIKE 21.

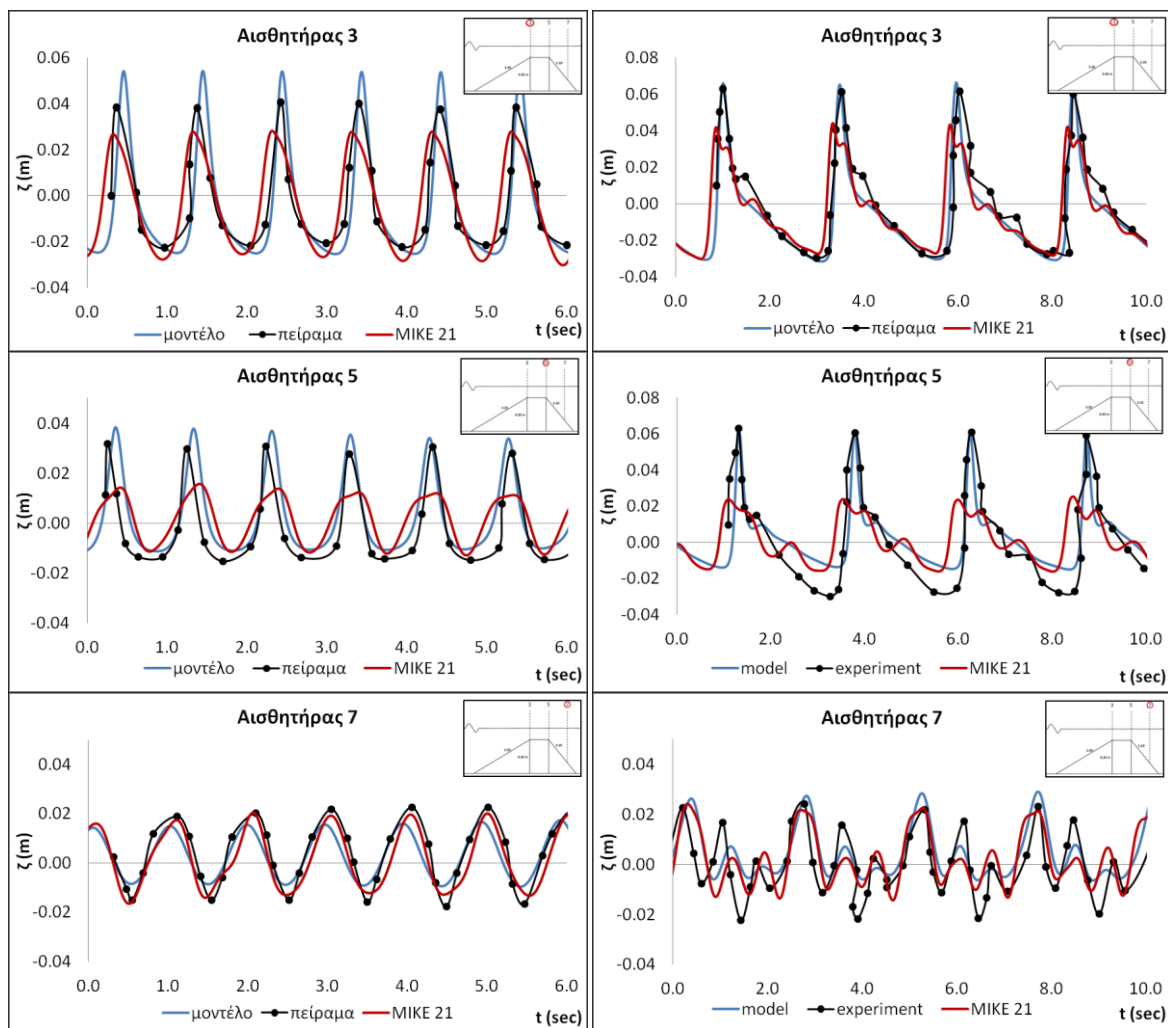
Τα αριθμητικά αποτελέσματα για προσομοίωση και θραύση απλών και σύνθετων κυματισμών που διαδίδονται πάνω από πυθμένα τραπεζοειδούς διατομής παρουσιάζονται στη συνέχεια. Για το διαχωρισμό των φαινομένων διάδοσης μη θραυόμενων κυματισμών πάνω από ύψαλο εμπόδιο, από αυτά που οφείλονται στην κυματική θραύση, το προτεινόμενο μοντέλο εφαρμόζεται αρχικά για μη θραυόμενους μονοχρωματικούς κυματισμούς με ύψος 2.0cm και συχνότητα 0.5Hz.

Τα αποτελέσματα των χρονοσειρών στους αισθητήρες 5 (έναρξη καθοδικής κλίσης του υφάλου) και 7 (πέρας καθοδικής κλίσης του υφάλου) εμφανίζονται στο Σχήμα 2. Τα αποτελέσματα παρουσιάζουν ικανοποιητική σύγκλιση με τα πειραματικά δεδομένα μέχρι την έναρξη της καθοδικής κλίσης, όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα στον αισθητήρα 2. Στους αισθητήρες της περιοχής καθοδικής κλίσης, όπου εμφανίζεται έντονη μη γραμμικότητα, η ικανότητα των υπολογιστικών μοντέλων δεν είναι στο ίδιο επίπεδο με πριν λόγω του ότι αυτά έχουν χαρακτηριστικά ήπιας μη γραμμικότητας.



Σχήμα 2: Χρονοσειρές ανύψωσης ελεύθερης επιφάνειας σε αισθητήρες τοποθετημένους σε ύψαλο κυματοθραύστη για μη θραυόμενους μονοχρωματικούς κυματισμούς ($H=2.0$ cm και $T=2.0$ sec) – σύγκριση με πειραματικές μετρήσεις (τελείες: πειραματικά δεδομένα, μπλε γραμμή: αποτελέσματα μοντέλου, κόκκινη γραμμή: αποτελέσματα MIKE 21).

Όπως έχει αναφερθεί, ο κύριος στόχος της μελέτης ήταν η εκτίμηση της ικανότητας του τροποποιημένου μοντέλου Boussinesq των Memos et al. (2005) να προσμετρήσει την κυματική θραύση λόγω μεταβολής βαθυμετρίας. Για το λόγο αυτό εκτελέστηκε σειρά από αναλύσεις για μονοχρωματικούς βραχείς και μακρούς κυματισμούς, με θραύση τύπου κυλίσεως (spilling) και εκτινάξεως (plunging). Στο επόμενο σχήμα, δίνονται τα αποτελέσματα για το πείραμα των Beji και Battjes (1992) που περιλαμβάνουν βραχείς κυματισμούς με θραύση τύπου κυλίσεως μονοχρωματικών κυματισμών, με ύψος κύματος 5.9cm και συχνότητα 1.0Hz καθώς και μακρείς κυματισμούς με θραύση τύπου εκτινάξεως, με ύψος κύματος 5.4cm και συχνότητα 0.4Hz (Σχήμα 3). Για το προτεινόμενο μοντέλο και το MIKE 21 γίνεται χρήση των προτεινόμενων παραμέτρων θραύσης για το μοντέλο τυρβώδους συνεκτικότητας και το μοντέλο του επιφανειακού κυλίνδρου που χρησιμοποιούν τα προγράμματα, αντίστοιχα.

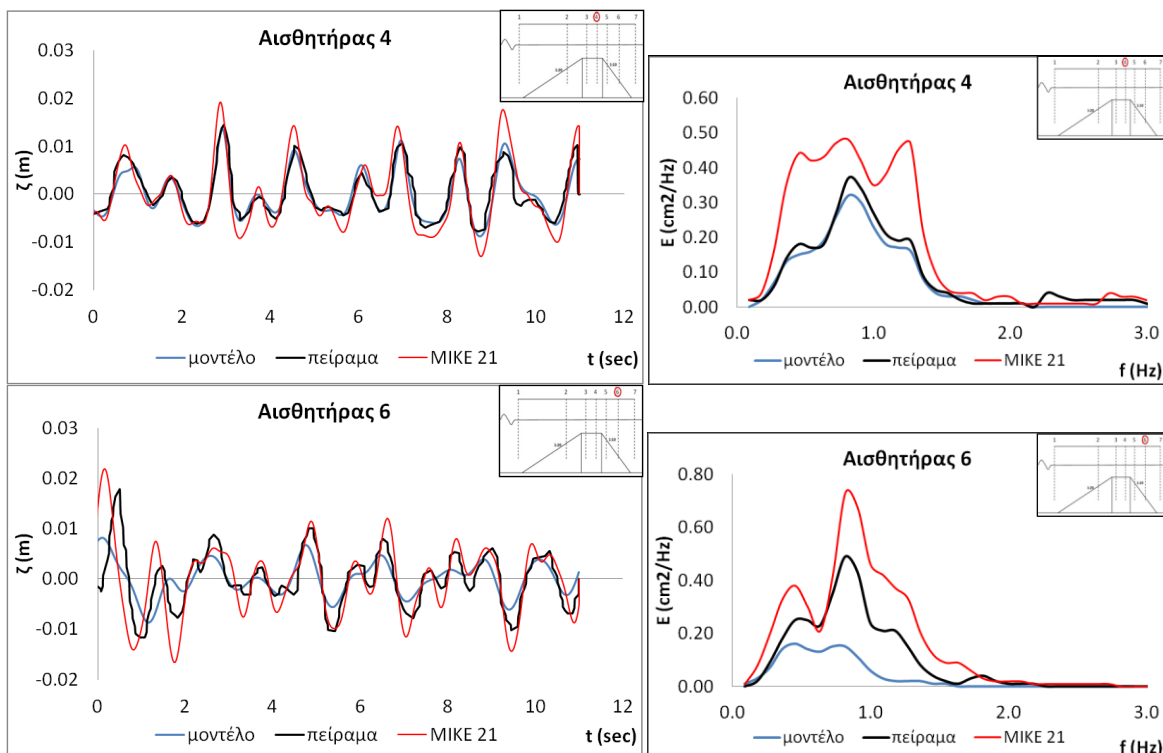


Σχήμα 3: Χρονοσειρές ανύψωσης ελεύθερης επιφάνειας σε αισθητήρες τοποθετημένους σε ύψαλο κυματοθραύστη για θραυόμενους μονοχρωματικούς κυματισμούς τύπου κυλίσεως με $H=5.9$ cm και $T=1.0$ sec (δεξιά) και τύπου εκτινάξεως με $H=5.4$ cm and $T=2.5$ sec (αριστερά) – σύγκριση με πειραματικές μετρήσεις (τελείες: πειραματικά δεδομένα, μπλε γραμμή: αποτελέσματα μοντέλου, κόκκινη γραμμή: αποτελέσματα MIKE 21).

Στα αποτελέσματα που παρουσιάζονται παραπάνω, είναι εμφανές ότι το προτεινόμενο μοντέλο δύναται να προβλέψει αποτελεσματικότερα την κυματική θραύση (με $\zeta_t^{(I)}=0.35(gd)^{1/2}$ για πυθμένα μορφής υφάλου κυματοθραύστη και $\zeta_t^{(F)}=0.15(gd)^{1/2}$), ενώ το

MIKE 21 για τις προτεινόμενες τιμές κατά Schäffer et al. (1993) (γωνίες θραύσης $(\phi_B, \phi_0) = (14^\circ, 7^\circ)$) η κυματομορφή απομειώνεται βίαια. Έτσι, το προτεινόμενο μοντέλο μπορεί εν γένει να αποδώσει ακριβέστερα τις πειραματικές χρονοσειρές.

Το τροποποιημένο μοντέλο Boussinesq επιβεβαιώθηκε περαιτέρω για φασματικούς μη θραυόμενους κυματισμούς που περιελάμβαναν ένα φάσμα τύπου JONSWAP με χαρακτηριστικό ύψος κύματος ίσο με 1.8cm και συχνότητα κορυφής 0.5Hz. Η ίδια πειραματική διάταξη επιστρατεύτηκε, όπου οι αισθητήρες τοποθετήθηκαν κατά τον ίδιο τρόπο με την περίπτωση απλών μη θραυόμενων κυματισμών. Η χρονοσειρά ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας στον αισθητήρα 2 χρησιμοποιήθηκε ως χρονοσειρά εισόδου για τα μοντέλα. Στις ακόλουθες εικόνες (Σχήμα 4), οι χρονοσειρές ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας δίνονται για τους αισθητήρες 4 (πέρασ της στέψης του υφάλου) και 6 (μέσον της καθοδικής κλίσης του υφάλου), μαζί με τα προκύπτοντα φάσματα από τις αντίστοιχες καταγραφές.

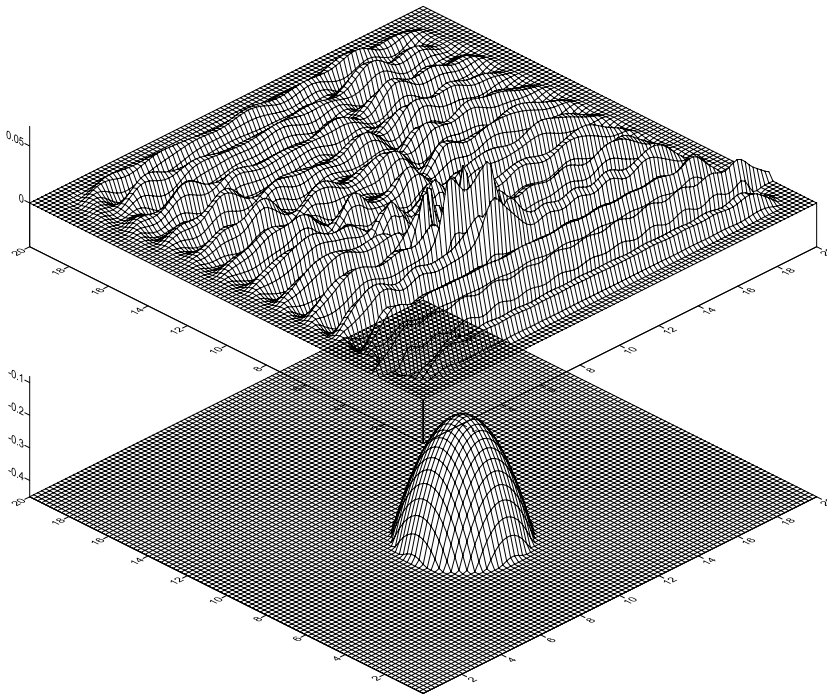


Σχήμα 4: Υπολογισμένες χρονοσειρές (αριστερά) και φάσματα (δεξιά) ανύψωσης ελεύθερης επιφάνειας στους αισθητήρες 4 (πέρασ της στέψης του υφάλου) και 6 (μέσον της καθοδικής κλίσης του υφάλου) για φασματικούς κυματισμούς ($H_s=1.8$ cm και $T_p=2.0$ sec) – συγκριση με πειραματικές μετρήσεις (μαύρη γραμμή: πειραματικά δεδομένα, μπλε γραμμή: αποτελέσματα μοντέλου, κόκκινη γραμμή: αποτελέσματα MIKE 21).

Από τα παραπάνω διαγράμματα συμπεραίνεται ότι, όμοια με την περίπτωση των απλών μη θραυόμενων κυματισμών, το προτεινόμενο μοντέλο Boussinesq δύναται να προβλέψει με ακρίβεια την ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας στους αισθητήρες πάνω από την ύφαλη κατασκευή μέχρι την αρχή της καθοδικής κλίσης, όπου η κυματοσειρά υπόκειται σε υψηλά μη γραμμικά φαινόμενα που επηρεάζουν την κυματική μορφή. Επιπλέον, παρατηρήθηκε διαφοροποίηση στους αισθητήρες 5, 6 και 7 όπου οι χρονοσειρές φαίνεται να παρουσιάζουν υστέρηση περίπου ίση με δύο φορές την περίοδο κορυφής σε σχέση με τα πειραματικά δεδομένα, προτού επιτευχθούν οι μόνιμες συνθήκες. Το φαινόμενο αυτό επηρεάζει τα προκύπτοντα φάσματα καθώς αποκλίσεις στις ανυψώσεις ελεύθερης επιφάνειας οδηγεί σε ενεργειακές αποκλίσεις και άρα σε αποκλίσεις στο σχήμα του φάσματος.

6. ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του προηγούμενου κεφαλαίου φαίνεται ότι το προτεινόμενο μοντέλο μπορεί να περιγράψει την κυματική διάδοση με ακρίβεια εντός της ζώνης θραύσης και να προσεγγίσει αποτελεσματικά την κυματική θραύση λόγω μεταβολής βάθους πυθμένα, η οποία ενδέχεται να επηρεάσει βίαια την κυματική μορφή. Στην ακόλουθη εικόνα (Σχήμα 5) απεικονίζεται ένα στιγμιότυπο διάδοσης απλού κυματισμού (ύψος κύματος 4.5 cm και περίοδος 1.0 sec) καθώς διέρχεται πάνω από εμπόδιο ημισφαιρικής μορφής, έτσι ώστε να δειχθεί η δυνατότητα απόκρισής του σε γνήσια 2DH συνθήκες.



Σχήμα 5: Στιγμιότυπο κυματικής διάδοσης πάνω από ημισφαιρικό εμπόδιο με εφαρμογή του τροποποιημένου μοντέλου Boussinesq των Memos et al. (2005).

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Παρουσιάστηκε ένα προηγμένο μοντέλο προσομοίωσης κυματικής διάδοσης, ικανό να περιγράψει την κυματική θραύση λόγω μεταβολής πυθμένα σε δύο οριζόντιες διαστάσεις. Εφαρμόστηκε κριτήριο θραύσης τυρβώδους συνεκτικότητας, το οποίο λειτουργεί ομαλά εντός του βασικού μοντέλου των Memos et al. (2005). Οι εξισώσεις που περιγράφουν τη ροή περιλαμβάνουν βελτιωμένα χαρακτηριστικά διασποράς και ήπιας μη γραμμικότητας. Η προσθήκη τυρβώδους συνεκτικότητας δεν παράγει αστάθειες συνδυαζόμενη με το ακρίβειας 4^{ης} τάξης αριθμητικό σχήμα πρόβλεψης – διόρθωσης. Εξετάστηκαν απλοί βραχείς και μακροί κυματισμοί, θραυόμενοι και μη, καθώς και φασματικοί μη θραυόμενοι κυματισμοί. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν δείχνουν εν γένει καλή συμφωνία με τις πειραματικές μετρήσεις και συνολικά ελαφρώς καλύτερη συμπεριφορά από το λογισμικό MIKE 21, κυρίως σε πειράματα για θραυόμενους κυματισμούς με θραύση τύπου εκτινάξεως.

Μελλοντικές διερευνήσεις που θα ενισχύσουν τις παραπάνω, θα πρέπει να συμπεριλάβουν την προσθήκη μη γραμμικών όρων υψηλότερης τάξης στις βασικές εξισώσεις, ώστε το μοντέλο να μπορεί να περιγράψει ακριβέστερα τα μη γραμμικά φαινόμενα λόγω διέλευσης κυμάτων πάνω από ύψαλη κατασκευή, που οδηγεί στην απελευθέρωση αρμονικών υψηλής τάξης στην καθοδική κλίση του κυματοθραύστη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Beji, S. and Battjes, J.A. 1993. *Experimental investigation of wave propagation over a bar*. Coastal Engineering, 19, 1-2: 151-162.
- Beji, S. and Battjes, J.A. 1994. *Numerical simulation of nonlinear wave propagation over a bar*. Coastal Engineering, 23, 1-2: 1-16.
- Beji, S. and Nadaoka, K. 1996. *A formal derivation and numerical modeling of the improved Boussinesq equations for varying depth*. Ocean Engineering, 23, 8: 691-704.
- Chen, Q., Kirby, J.T., Dalrymple, R.A., Kennedy, A.B. and Chawla, A. 2000. *Boussinesq modeling of wave transformation, breaking and runup. II: 2D*. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 126, 1: 48-56.
- DHI Software (2007). MIKE 21 BW, Boussinesq Waves Module – User Guide. Danish Hydraulic Institute.
- Kennedy, A.B., Chen, Q., Kirby, J.T. and Dalrymple, R.A. 1999. *Boussinesq modeling of wave transformation, breaking and runup. I: 1D*. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 126, 1: 39-47.
- Kirby, J.T., Wei, G., Chen, Q., Kennedy, A.B. and Dalrymple, R.A. 1998. *Fully nonlinear Boussinesq wave model, Documentation and user's manual*. Center for Applied Coastal Research, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Delaware, Research Report no. CACR-98-06.
- Li, Y.S. and Zhan, J.M. 2001. *Boussinesq-type model with boundary-fitted coordinate system*. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 127, 3: 152-160.
- Madsen, P.A., Sørensen, O.R. and Schäffer, H.A. 1997a. *Surf zone dynamics simulated by a Boussinesq-type model. Part I: model description and cross-shore motion of regular waves*. Coastal Engineering, 32, 4: 255-287.
- Madsen, P.A., Sørensen, O.R. and Schäffer, H.A. 1997b. *Surf zone dynamics simulated by a Boussinesq-type model. Part II: surf beat and swash oscillations for wave groups and irregular waves*. Coastal Engineering, 32, 4: 289-319.
- Memos, C.D., Karambas, Th. V. and Avgeris, I. 2005. *Irregular wave transformation in the nearshore zone: experimental investigations and comparisons with a higher order Boussinesq model*. Ocean Engineering, 32, 11-12: 1465-1485.
- Press, W.H., Flannery, B.P., Teukolsky, S.S., Vetterling, W.T. 1986. *Numerical recipes*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Schäffer, H.A., Madsen, P.A. and Deigaard, R. 1993. *A Boussinesq model for waves breaking in shallow water*. Coastal Engineering, 20, 3-4: 185-202.
- Svendsen, I.A. 1984. *Wave heights and set-up in a surf zone*. Coastal Engineering, 8, 4: 303-329.
- Svendsen, I.A., Yu, K. and Veeramony, J. 1996. *A Boussinesq breaking wave model with vorticity*. Proceedings of the 25th International Conference on Coastal Engineering, Orlando, 1192-1204.
- Veeramony, J. and Svendsen, I.A. 2000. *The flow in surf-zone waves*. Coastal Engineering, 39, 2-4: 93-122.
- Wei, G. and Kirby, J.T. 1994. *A high order time-dependent numerical model for the extended Boussinesq equations*. Proceedings of the International Symposium: Waves-Physical and Numerical Modeling, Vancouver, 544-553.
- Wei, G. and Kirby, J.T. 1995. *Time-dependent numerical code for extended Boussinesq equations*. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 121, 5: 251-261.
- Zelt, J.A. 1991. *The run-up of nonbreaking and breaking solitary waves*. Coastal Engineering, 15: 205-246.

**ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΡΓΩΝ ΓΙΑ ΑΝΑΠΤΥΞΗ
ΚΑΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΠΑΡΑΚΤΙΑΣ ΖΩΝΗΣ
ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ**

A. Χατζηρόδου¹, Β.Κ. Τσουκαλά²

¹Πολιτικός Μηχανικός (ΕΜΠ), E-mail: hatzant_@hotmail.com

²Επίκουρος Καθηγήτρια, Εργαστήριο Λιμενικών Έργων
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ)
Ηρώων Πολυτεχνείου 5, Ζωγράφου Τ.Κ. 15773
E-mail: V.Tsoukala@hydro.civil.ntua.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία αξιολογούνται με χρήση πολυκριτηριακής ανάλυσης οι λύσεις που προσφέρονται για την προστασία παράκτιων ζωνών. Εισάγονται βασικοί περιβαλλοντικοί, οικονομικοί και κοινωνικοί δείκτες με χρήση του πλαισίου DPSIR, βάσει των οποίων αξιολογείται ένα γενικότερο σχέδιο διαχείρισης της ζώνης. Ειδικότερα, με την αξιολόγηση των συγκεκριμένων δεικτών οι οποίοι εντάσσονται σε ένα πολυκριτηριακό μοντέλο λήψης αποφάσεων, αναζητείται με υπολογισμό του Δείκτη Κατάστασης Περιβάλλοντος (ΔΚΠ) και με τη βοήθεια του λογισμικού λήψης αποφάσεων MindDecider, η ελκυστικότερη λύση προστασίας και βελτίωσης του παραλιακού μετώπου Λάρνακας – Δεκέλειας – Ορόκλινης στην Κύπρο.

**INVESTIGATION OF POSSIBLE SOLUTIONS FOR INTEGRATED
COASTAL ZONE MANAGEMENT WITH THE USE OF MULTI-
CRITERIA ANALYSIS**

A. Chatzirodou¹, V.K. Tsoukala²

¹Civil Engineer (NTUA), E-mail: hatzant_@hotmail.com

²Assistant Professor, Harbour Works Laboratory
School of Civil Engineering, National Technical University of Athens (NTUA)
5, Iroon Polytechniou, Zografou 15773
E-mail: V.Tsoukala@hydro.civil.ntua.gr

ABSTRACT

In the present paper possible solutions in order to protect coastal zones, mainly from the erosion which degrades the study area in terms of both environmental and socio-economic point of view, are investigated. Environmental, economic and social indicators are used within the framework DPSIR. On the basis of those specific indicators a general plan of sustainable coastal zone management is assessed. In particular, indicators, which are considered as a part of a multi-criteria decision making method, are estimated with the help of a calculated Environmental Condition Index (ECI) and the help of Mind Decider (Project Management and decision making software), in order to evaluate the proposed alternative solutions (coastal defense works are included) for the sustainable management of the Oroklini Coastal Zone in Larnaka (Cyprus).

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο παράκτιος χώρος αποτελούσε ανέκαθεν πόλο έλξης και εξάσκησης πολλών δραστηριοτήτων του ανθρώπου καθώς προσφέρεται τόσο για οικιστική όσο και για οικονομική και τουριστική ανάπτυξη. Σε μια κρίσιμη ωστόσο ζώνη λίγων χιλιομέτρων, όπου συγκεντρώνεται πλήθος ανθρώπινων δραστηριοτήτων και σημαντικό μέρος των υποδομών, των μεταφορών και των συγκοινωνιών, είναι φυσικό να απειλείται όλο και περισσότερο η παραγωγική και η περιβαλλοντική ισορροπία των παράκτιων ζωνών. Οι έντονες πιέσεις που δέχονται οι συγκεκριμένες περιοχές σε συνδυασμό με το γεγονός ότι το περιβάλλον τους ανήκει στα «ευαίσθητα οικοσυστήματα», επιβάλλουν την ολοκληρωμένη ορθολογική και βιώσιμη διαχείρισή τους και την προστασία τους.

Με στόχο συνεπώς την προστασία της ζώνης, κατά βάση από τον ανεξέλεγκτο μηχανισμό της διάβρωσης και τη σταθεροποίησή της, κατασκευάζονται παράκτια έργα τα οποία μπορούν να διακριθούν στις συμβατικές κατασκευές (πρόβολοι, παράλληλοι κυματοθραύστες κ.α.) και στα έργα που παρέχουν ήπια προστασία (ίσαλοι κυματοθραύστες, αναπλήρωση ακτής, τεχνητή φυτοκάλυψη κ.ά.) (Tsoukala et al., 2009).

Στην παρούσα εργασία εισάγονται οι βασικοί περιβαλλοντικοί, οικονομικοί και κοινωνικοί δείκτες με χρήση του πλαισίου DPSIR, βάσει των οποίων αξιολογείται ένα γενικότερο σχέδιο διαχείρισης της παράκτιας ζώνης. Ειδικότερα, με την αξιολόγηση των συγκεκριμένων δεικτών οι οποίοι εντάσσονται σε ένα πολυκριτηριακό μοντέλο λήψης αποφάσεων, αναζητείται με υπολογισμό του Δείκτη Κατάστασης Περιβάλλοντος (ΔΚΠ) και με τη βοήθεια του λογισμικού λήψης αποφάσεων MindDecider, η ελκυστικότερη λύση προστασίας και βελτίωσης του παραλιακού μετώπου Λάρνακας – Δεκέλειας – Ορόκλινης στην Κύπρο.

2. ΔΕΙΚΤΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΡΓΩΝ ΠΑΡΑΚΤΙΑΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

Σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση των Storksdieck και Otto-Zimmermann (1994) οι περιβαλλοντικοί δείκτες μπορούν να ανήκουν σε τρεις ομάδες:

- 1) στους δείκτες οι οποίοι διαφέρουν ανάλογα με την κατηγορία στην οποία αναφέρονται και χρησιμοποιούνται για να μετρήσουν εκείνα τα περιβαλλοντικά συστατικά που θεωρούνται σημαντικά λόγω της σπανιότητας και των επιπτώσεών τους ή επειδή μπορούν να θεωρηθούν ενδεικτικοί της συνολικής ποιότητας του περιβαλλοντικού πόρου. Ως παραδείγματα ανάλογων δεικτών αναφέρονται η μέτρηση του SO₂ (ατμοσφαιρική ρύπανση) και του CO₂ κλιματική αλλαγή).
- 2) στους **δείκτες βιωσιμότητας** οι οποίοι βασίζονται στο συνδυασμό των περιβαλλοντικών, οικονομικών και κοινωνικών στοιχείων με αποτέλεσμα οι προαναφερθέντες δείκτες του κλασικού μοντέλου να εμπλουτίζονται από άλλους, όπως η μέση απόσταση των οικοδομικών τετραγώνων από χώρους πρασίνου.
- 3) στους **δείκτες συνολικής ποιότητας** που παρακολουθούν έμμεσα την ποιότητα του περιβάλλοντος. Στη συγκεκριμένη περίπτωση αντί να παρακολουθούνται συγκεκριμένα περιβαλλοντικά συστατικά (δείκτες του κλασικού μοντέλου) ή να προσδιορίζεται το επίπεδο βιωσιμότητας (δείκτες βιωσιμότητας), ελέγχεται η απόδοση έμμεσων στοιχείων, όπως η επίτευξη συγκεκριμένων στόχων ή η πρόοδος που συντελέστηκε.

Ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη δεικτών αποτελεί μία σύνθετη διαδικασία. Πρωτίστως όμως, κρίνεται απαραίτητος ο καθορισμός του πλαισίου εντός του οποίου πραγματοποιείται η χρήση τους, με σκοπό να διευκρινιστεί τι πρόκειται να μετρηθεί και τι αναμένεται από αυτή τη μέτρηση. Ορίζονται κατά συνέπεια εννοιολογικά μοντέλα που θα καθορίσουν τι πρέπει να μετρηθεί. Στην παρούσα εργασία οι επιλεγμένοι δείκτες εντάσσονται στο πλαίσιο Κινητήριων δυνάμεων – Πίεσης – Κατάστασης –

Επίπτωσης –Αντίδρασης (DPSIR, Driving Force – Pressure – State – Impact – Response) (*Jensinghaus, 1999*), που έχει αναπτυχθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση, ως επέκταση του μοντέλου Πίεσης – Κατάστασης – Αντίδρασης (PSR, Pressure – State – Response), που αναπτύχθηκε από τον Οργανισμό Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης (Ο.Ο.Σ.Α.) (*OECD, 1991*).

Όπως ήδη αναφέρθηκε, αναζητούνται κατάλληλοι δείκτες για την αξιολόγηση έργων προστασίας στην παράκτια ζώνη (τοπικό επίπεδο). Τα παράκτια έργα είναι έργα αναπτυξιακού χαρακτήρα και εντάσσονται ως επί το πλείστον σε σχέδιο που στόχο έχει την ολοκληρωμένη διαχείριση της ζώνης. Γι' αυτό το λόγο δεν αντιμετωπίζονται ως μεμονωμένες κατασκευές. Διερευνώνται δηλαδή, τόσο οι επιπτώσεις της λειτουργίας τους στο φυσικό και ανθρωπογενές περιβάλλον, όσο και οι επιπτώσεις στο περιβάλλον των δραστηριοτήτων που συνοδεύουν αυτά τα έργα. Οι δείκτες που καθορίζονται ανά περίπτωση εντάσσονται στην ουσία σε ένα πολυκριτηριακό μοντέλο λήψης αποφάσεων. Οι μέθοδοι «πολυκριτηριακής» ανάλυσης προτιμώνται στην εκτίμηση των επιπτώσεων που προκαλούνται στις παράκτιες ζώνες καθώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε περιβάλλον που μπορεί να μην είναι στατικό και βέβαιο και είναι δυνατό να ενσωματωθούν σε αυτές κριτήρια, με διαφορετικά ειδικά βάρη, δίνοντας ταυτόχρονα τη δυνατότητα χειρισμού ποιοτικών δεδομένων (*Μανούρης κ.α., 2005*).

Για την επιλογή των κατάλληλων δεικτών, το σημαντικό κριτήριο στην υπό μελέτη περιοχή, αποτελούν τα προβλήματα που αναμένεται να προκύψουν καθώς και οι κοινωνικές, οικονομικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις (θετικές ή αρνητικές) από την κατασκευή των παράκτιων έργων και των συνοδών δραστηριοτήτων τους (π.χ. βελτίωση οδικού δικτύου, τουριστική ανάπτυξη). Εξίσου σημαντικό κριτήριο για την επιλογή δεικτών, αποτελεί η δυνατότητα μέτρησης και ενημέρωσής τους ανά τακτά χρονικά διαστήματα ώστε να είναι δυνατός ο συγκριτικός έλεγχος και η παρακολούθηση της εξέλιξης της κατάστασής τους. Πρέπει να είναι εύκολα αντιληπτοί από το ευρύ κοινό και η επιλογή τους να γίνεται βάσει της διαθεσιμότητας και προσβασιμότητας σε δεδομένα και της επιστημονικής ορθότητάς τους.

Ως προς τον τρόπο παρουσίασης των δεικτών στην παρούσα εργασία, επιλέγεται η παρουσίαση με χρήση πινάκων ώστε να γίνονται εύκολα αντιληπτοί από το ευρύ κοινό. Επιπρόσθετα αναφέρεται ότι για την αξιολόγηση ενός έργου ή ακόμα μίας υφιστάμενης κατάστασης σε μία περιοχή, δεν υπάρχει ένα ενιαίο και συγκεκριμένο σύνολο δεικτών που μπορούν να αναπτυχθούν και να εφαρμοστούν σε κάθε περίπτωση. Πρέπει πρωτίστως να διερευνηθούν τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της υπό μελέτη περιοχής και με βάση αυτά να αξιολογηθούν τα προτεινόμενα έργα. Ως περιοχή μελέτης έχει επιλεγεί η παράκτια ζώνη *Λιμανιού Λάρνακας Διωλιστηρίων - Ορόκλινης* στην Κύπρο. Πρόκειται για μία μελέτη προστασίας της ακτής και βελτίωσης της ποιότητας της παραλίας, ούτως ώστε να είναι συμβατή με τις τουριστικές χρήσεις και τις χρήσεις αναψυχής. Τα προτεινόμενα μέτρα και έργα θα πρέπει να επιφέρουν τις ελάχιστες δυνατές επιπτώσεις στο περιβάλλον και να βρίσκονται μέσα στα πλαίσια των αρχών της αειφόρου ανάπτυξης.

3. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

3.1 ΑΚΤΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η υπό μελέτη παράκτια ζώνη, με συνολικό μήκος ακτογραμμής περίπου 5,5 Km, βρίσκεται στο βορειοδυτικό τμήμα του κόλπου Λάρνακας, βόρεια - βορειοανατολικά του λιμένα Λάρνακας. Τμήμα της ακτής emπίπτει στη Λάρνακα και τμήμα της ακτής υπάγεται στην Κοινότητα Ορόκλινη, η οποία γειτονεύει με τις κοινότητες: Λιβάδια, Κελλιά και Πύλα (Σχήμα 1).



Σχήμα 1: Ακτή μελέτης

Ο κόλπος της Λάρνακας υπέφερε ανέκαθεν από διάβρωση. Βασικές αιτίες που προκάλεσαν σημαντικές αλλαγές στη μορφολογία και εξέλιξη της ακτογραμμής, αποτέλεσαν οι ανθρώπινες παρεμβάσεις στην παράκτια ζώνη του κόλπου κατά τις δεκαετίες του 1970 και 1980. Από την άποψη των υφισταμένων θαλασσιών έργων και των χρήσεων, η ακτή μελέτης μπορεί να διακριθεί όπως φαίνεται στο Σχήμα 2 σε τρεις υποπεριοχές:

- **Υποπεριοχή 1:** Σε συνολικό μήκος ακτογραμμής περίπου 2,9 Km, κατασκευάστηκαν χωρίς άδεια από την Αρμόδια Αρχή, τα εξής κατά σειρά παράκτια έργα:

1. Θωρακίσεις με ογκολίθους προ των υπαρχουσών στην περιοχή εγκαταστάσεων πετρελαιοειδών και
2. Κάθετα στην ακτή έργα τύπου προβόλου, σε απόσταση μεταξύ τους, κατά μήκος της ακτογραμμής.

Στην υποπεριοχή 1 αναπτύσσεται κυρίως βιομηχανική δραστηριότητα, λόγω των εγκαταστάσεων του Κυπριακού Διυλιστηρίου καθώς και δραστηριότητες αναψυχής και ναυταθλητισμού λόγω της παρουσίας του Ναυτικού Ομίλου Λάρνακας.

- **Υποπεριοχή 2:** Κατά τα τελευταία έτη, σε μήκος ακτογραμμής περίπου 1,1 Km, αναπτύσσονται έντονες χρήσεις παραθαλάσσιας αναψυχής και σημειώνεται τουριστική και οικιστική ανάπτυξη. Η περιοχή παρουσιάζει σημαντικότατο δυναμικό ανάπτυξεως σε όλο το μήκος της και λόγω της ύπαρξης κενών χώρων μπορούν άμεσα να διαμορφωθούν οι χώροι αυτοί, κατάλληλα, για δημόσιες χρήσεις. Στο ανατολικότερο τμήμα της περιοχής, αμέσως στα δυτικά του υπάρχοντος προβόλου, παρατηρείται έντονη απόθεση ιζήματος λόγω της επιδράσεως του έργου αυτού.

- **Υποπεριοχή 3:** Αποτελεί την ανατολικότερη ακτή μελέτης με μήκος 1,5 Km και παρουσιάζει έντονη οικιστική ανάπτυξη και τουριστική κίνηση. Ιδιαίτερα κατά τα τελευταία έτη, κατασκευάστηκαν ξενοδοχειακά συγκροτήματα, εστιατόρια και το τουριστικό περίπτερο Ορόκλινης. Η περιοχή διαθέτει δυναμικό για περαιτέρω ανάπτυξη και προσέλκυση δραστηριοτήτων αναψυχής. Κατά μήκος του συγκεκριμένου τμήματος ακτής έχουν κατασκευαστεί 13 έξαλοι κυματοθραύστες.



Σχήμα 2: Διαχωρισμός ακτής μελέτης σε υποπεριοχές

3.2 ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΦΥΣΙΚΟΥ ΚΑΙ ΑΝΘΡΩΠΟΓΕΝΟΥΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Η κύρια πηγή αέριων ρύπων και θορύβου στην περιοχή μπορεί να θεωρηθεί η διακίνηση οχημάτων στην παραλιακή οδό Λάρνακας – Δεκέλειας. Στην ευρύτερη ζώνη οι υπάρχουσες εγκαταστάσεις θεωρούνται πηγές αέριων ρύπων με σχετικά υψηλά επίπεδα σε σχέση με τις κανονικές συγκεντρώσεις. Εντός της περιοχής ενδιαφέροντος, δεν παρατηρούνται επιφανειακά υδάτινα σώματα, εκτός από την παρουσία αριθμού καναλιών και οχετών τα οποία μεταφέρουν τα όμβρια ύδατα της πόλης στη θάλασσα. Τα όμβρια ύδατα που διοχετεύονται στο θαλάσσιο περιβάλλον, αποτελούν σημαντική πηγή ρύπανσης καθώς μεταφέρουν μεγάλες ποσότητες στερεών αστικών απορριμμάτων. Όσον αφορά στο χερσαίο βιολογικό περιβάλλον, παρουσιάζεται εμφανώς υποβαθμισμένο, λόγω της έντονης βιομηχανικής, τουριστικής και οικιστικής ανάπτυξης καθώς και της παρουσίας των εγκαταστάσεων αποθήκευσης πετρελαϊκών προϊόντων. Ιδιαίτερο και μοναδικό οικολογικό ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι τα αποδημητικά πουλιά χρησιμοποιούν τη λίμνη Ορόκλινης για ξεκούραση και αναπαραγωγή. Ως προς την ποιότητα του θαλάσσιου νερού αναφέρεται ότι υπάρχουν ενδείξεις ρύπανσης, με πιθανές πηγές την πετρελαϊκή ρύπανση και τη ρύπανση από τα αδρανή στερεά απορρίμματα. Σημειώνεται ότι για την προστασία της θαλάσσιας βιοποικιλότητας, ιδιαίτερη προσοχή κατά το σχεδιασμό των έργων, πρέπει να δοθεί στα εκτεταμένα λιβάδια Ποσειδωνίας που εντοπίζονται στην περιοχή σε πολύ καλή κατάσταση (*Εργαστήριο Λιμενικών Έργων ΕΜΠ, 2009*).

Στην υπό μελέτη ακτή έχουν άμεση πρόσβαση οι κάτοικοι του Δήμου Λάρνακας, της Κοινότητας Λιβαδιών και της Κοινότητας Ορόκλινης. Με βάση τα δημογραφικά δεδομένα της περιοχής, αναφέρεται ότι η εξέλιξη της κατανομής των ηλικιών ήταν ομαλή, ενώ παράλληλα καταγράφεται η σταδιακή αύξηση του μέσου όρου ηλικίας, η γήρανση του πληθυσμού και η υπογεννητικότητα. Ταυτόχρονα παρατηρήθηκε αύξηση του ποσοστού ανεργίας και μείωση του οικονομικά ενεργού πληθυσμού, γεγονός που υποδεικνύει επιβράδυνση των ρυθμών τοπικής ανάπτυξης.

4. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΔΕΙΚΤΩΝ

Προκειμένου να αξιολογηθεί η υφιστάμενη κατάσταση περιβάλλοντος καθώς και η αποτελεσματικότητα και η αναγκαιότητα των προτεινόμενων έργων στην περιοχή, αναπτύχθηκε ένα σύστημα κατάλληλων δεικτών (περιβαλλοντικών, οικονομικών και κοινωνικών), λαμβάνοντας υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της υπό μελέτη παράκτιας ζώνης.

Πίνακας 1: Συγκεντρωτική αξιολόγηση της υφιστάμενης κατάστασης περιβάλλοντος

	Δείκτες		DPSIR	Τιμή	
	Κατηγορία	Περιγραφή			
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΙ ΔΕΙΚΤΕΣ	Ατμόσφαιρα	A1. Μέση ετήσια συγκέντρωση NO ₂	P	3	
		A2. Μέση ετήσια συγκέντρωση C ₆ H ₆	P	3	
		A3. Μέση ετήσια συγκέντρωση PM ₁₀ *	P	2	
		A4. Leq (dB(A)) (δείκτης μέτρησης θορύβου) *	P	2	
		A5. Αριθμός πηγών ηχορύπανσης*	P	2	
	Ποιότητα θαλάσσιου νερού	ΘN1. Ποιότητα νερών κολύμβησης *	S	3	
		ΘN2. Παρουσία στερεών επιπλεόντων απορριμμάτων	P	2	
		ΘN3. Παρουσία πετρελαίου*	P	4	
		ΘN4. Συγκέντρωση χλωροφύλλης-α (μg/l)	S	5	
	Θαλάσσια οικολογία	ΘO1. Κατάσταση Ποσειδωνίας*	S	5	
		ΘO2. Ποικιλότητα βενθικής χλωρίδας	S	1	
		ΘO3. Ποικιλότητα βενθικής πανίδας	S	2	
	Χερσαία οικολογία	XO1. Αριθμός ειδών χλωρίδας και πανίδας	S	1	
		XO2. Κατάσταση σημαντικού υδροβιότοπου*	S	3	
	Τοπίο	T1. Φυσικότητα του τοπίου *	S	1	
T2. Τύπος παράκτιων έργων προστασίας*		P	1		
T3. Προσβασιμότητα παραλιών*		S	2		
Έδαφος	E1. Παράκτια διαβρωση*	I	2		
	E2. Παρουσία στερεών απορριμμάτων	P	2		
ΚΟΙΝΩΝΙΚΟΙ ΔΕΙΚΤΕΣ	Μεταφορές	K1. Επάρκεια παρκινγκ*	P	3	
		K2. Επάρκεια οδικού δικτύου *	P	3	
	Δημογραφικά δεδομένα	K3. Δείκτης γήρανσης	P	2	
		K4. Δείκτης ανικατάστασης	P	2	
		K5. Αύξηση αριθμού και μεγέθους νοικοκυριών*	P	2	
	Διατήρηση του πολιτισμού	K6. Συντήρηση τοπίων πολιτιστικής αξίας	S	3	
	Ενίσχυση κοινωνικής συνοχής	K7. Ασυμβίβαστες χρήσεις*	S	1	
		K8. Αποδοχή υφιστάμενης κατάστασης ή προγραμματιζόμενων αναπτύξεων από την κοινωνία	D	3	
	ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟΙ ΔΕΙΚΤΕΣ	Τουρισμός	O1. Συμβολή τουρισμού στην τοπική οικονομία*	D	4
			O2. Επιπλέον δυνατότητες τουριστικής ανάπτυξης*	D	5
O3. Βιώσιμος τουρισμός			I	1	
Κυκλοφορία στο λιμένα		O4. Συνολικός αριθμός εισερχόμενων και εξερχόμενων επιβατών στο Λιμένα Λάρνακας*	D	1	
		O5. Συνολικός όγκος διακινούμενων εμπορευματοκιβωτίων (TEUs) στο Λιμένα Λάρνακας	P	5	
Απασχόληση		O6. Ποσοστό ανεργίας*	D	1	
		O7. Ποσοστό οικονομικά ενεργού πληθυσμού	D	1	
Κόστος έργων		O8. Κόστος κατασκευής και συντήρησης υφιστάμενων ή προγραμματιζόμενων έργων*	D	5	

Κάνοντας χρήση του πλαισίου DPSIR, επιλέχθηκαν συνολικά 35 δείκτες. Με βάση ποιοτικά και ποσοτικά δεδομένα οι δείκτες αξιολογήθηκαν σε μία κλίμακα από την τιμή 1 έως την τιμή 5 όπως φαίνεται στον Πίνακα 1.

Η τιμή του κάθε δείκτη που δίνεται στον Πίνακα 1 υποδεικνύει την υφιστάμενη κατάσταση περιβάλλοντος. Όσο αυξημένη είναι η αντίστοιχη τιμή τόσο πιο αναβαθμισμένη θεωρείται η κατάσταση του περιβάλλοντος. Αναφέρεται ότι με κόκκινη σήμανση παρουσιάζονται οι δείκτες για τους οποίους η παρακολούθησή τους, κρίνεται ιδιαίτερα σημαντική για την αξιολόγηση της υφιστάμενης κατάστασης.

5. ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΑ ΣΕΝΑΡΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΗΣ ΠΑΡΑΚΤΙΑΣ ΖΩΝΗΣ

Καθορίστηκαν και στη συνέχεια αξιολογήθηκαν συνολικά έξι εναλλακτικά σενάρια, με στόχο τη μελλοντική διαχείριση της υπό μελέτη παράκτιας ζώνης. Το 1^ο σενάριο στην ουσία αφορά τη λύση της μηδενικής παρέμβασης. Με βάση το 2^ο εναλλακτικό σενάριο, τίθεται στόχος η υλοποίηση όλων των έργων που προβλέπονται από το αναπτυξιακό σχέδιο, με στόχο την αναβάθμιση του φυσικού και ανθρωπογενούς περιβάλλοντος καθώς και η κατασκευή όλων των έργων παράκτιας προστασίας που έχουν προταθεί (ΕΛΕ, 2009). Συνοπτικά τα προγραμματιζόμενα έργα για το 2^ο σενάριο παρουσιάζονται στον ακόλουθο Πίνακα 2.

Πίνακας 2. Εναλλακτικό σενάριο – Προτεινόμενα έργα

ΕΡΓΑ ΠΑΡΑΚΤΙΑΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ	
ΥΠΟΠΕΡΙΟΧΗ 1	<ul style="list-style-type: none"> • Δυτικό τμήμα: Αναπλήρωση ακτής και θωράκιση του μετώπου με ογκολίθους • Ανατολικό τμήμα: Κατασκευή 5 ίσαλων κυματοθραυστών από φυσικούς ογκολίθους, παράλληλα και σε απόσταση από την ακτή
ΥΠΟΠΕΡΙΟΧΗ 2	<ul style="list-style-type: none"> • Κατασκευή 7 ίσαλων κυματοθραυστών από φυσικούς ογκολίθους, παράλληλα και σε απόσταση από την ακτή
ΥΠΟΠΕΡΙΟΧΗ 3	<ul style="list-style-type: none"> • Αποξήλωση τμήματος του υπάρχοντος προβόλου • Ανύψωση της στάθμης υπαρχόντων κυματοθραυστών
ΣΥΝΟΛΑ ΕΡΓΑ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΕΙΣ	
ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΟΥ ΠΑΡΑΛΙΑΚΟΥ ΜΕΤΩΠΟΥ	<ul style="list-style-type: none"> • Δημιουργία επαρκών χώρων στάθμευσης στην περιοχή • Βελτίωση της δημόσιας συγκοινωνίας, για σύνδεση της παραλιακής περιοχής με το κέντρο της Λάρνακας.
	<ul style="list-style-type: none"> • Τοποτεχνήσεις υψηλών προδιαγραφών εκατέρωθεν των οδοστρωμάτων
	<ul style="list-style-type: none"> • Δημιουργία παραλιακού πεζοδρόμου Ορόκληνης
	<ul style="list-style-type: none"> • Αναδιαμόρφωση και επέκταση του τμήματος του παραλιακού δρόμου Λάρνακας-Δεκέλειας
	<ul style="list-style-type: none"> • Τερματισμός της λειτουργίας του Κυπριακού Δωλιστηρίου Πετρελαίου στον υφιστάμενο χώρο, αποξήλωση όλων των εγκαταστάσεων και περιβαλλοντική αποκατάσταση του χώρου με στόχο την αναβάθμιση της περιοχής.
	<ul style="list-style-type: none"> • Αλλαγή χρήσεων με βασικότερη τη μετατροπή της βιομηχανικής ζώνης σε οικιστική –τουριστική
	<ul style="list-style-type: none"> • Ενιαία ανάπτυξη του λιμένα και της μαρίνας της Λάρνακας
	<ul style="list-style-type: none"> • Έργα βασικής τουριστικής και συνεδριακής υποδομής

Με βάση το 3^ο εναλλακτικό σενάριο τίθεται στόχος να κατασκευαστεί το σύνολο των προτεινόμενων έργων παράκτιας προστασίας καθώς και να τερματιστεί η λειτουργία του Κυπριακού Δωλιστηρίου Πετρελαίου. Όσον αφορά στο 4^ο σενάριο, προγραμματίζεται η κατασκευή των παράκτιων έργων, η επέκταση του οδικού δικτύου και η βελτίωση της δημόσιας συγκοινωνίας. Με βάση το 5^ο εναλλακτικό σενάριο, ως μοναδική παρέμβαση προτείνεται η κατασκευή των παράκτιων έργων.

Επιπρόσθετα, με βασικό στόχο τη μείωση του κόστους κατασκευής που προκύπτει στην περίπτωση κατασκευής σειράς ίσων κυματοθραυστών και έργων θωράκισης ακτής (Πίνακας 2) στα προαναφερθέντα σενάρια, προτείνεται και αξιολογείται ως 6^ο εναλλακτικό σενάριο, η αντικατάσταση των παραπάνω προτεινόμενων έργων παράκτιας προστασίας από ένα σύστημα κάθετων προβόλων σε όλο το μήκος της ακτής, χωρίς καμία επιπλέον παρέμβαση. Για κάθε σενάριο υπολογίζεται ο Δείκτης Ποιότητας της κάθε Επίπτωσης i ($\Delta\text{ΠΕ}_i$) και ο Δείκτης Κατάστασης του Περιβάλλοντος ($\Delta\text{ΚΠ}$).

Ο Δείκτης Ποιότητας για την κάθε κατηγορία επίπτωσης i ($\Delta\text{ΠΕ}_i$) (ατμόσφαιρα, θαλάσσια οικολογία, τοπίο, όπως δίνεται στον Πίνακας 1) υπολογίζεται με χρήση της:

$$\Delta\text{ΠΕ}_i = (Y_1 * Y_2 * \dots * Y_j) (Y_1 * Y_2 * \dots * Y_j)^{\frac{1}{n}} \quad (5.1)$$

όπου: Y_j = τιμή δείκτη j^* βάρους j ,

i = 1,...,14, ο αριθμός των επιπτώσεων

j = 1,..., n ο αριθμός των επιλεγμένων δεικτών για την κάθε επίπτωση i .

Ο Δείκτης Κατάστασης Περιβάλλοντος ($\Delta\text{ΚΠ}$) χρησιμοποιείται για την τελική αποτίμηση της κατάστασης του περιβάλλοντος του παραλιακού μετώπου Λάρνακας – Δεκέλειας – Ορόκλινης ανά προτεινόμενο σενάριο και προκύπτει από την εξίσωση:

$$\Delta\text{ΚΠ} = (\Delta\text{ΠΕ}_1 * \Delta\text{ΠΕ}_2 * \dots * \Delta\text{ΠΕ}_i)^{\frac{1}{n}} \quad (5.2)$$

όπου: $\Delta\text{ΠΕ}_i$ = η τιμή του Δείκτη Ποιότητας της Επίπτωσης i
 n = ο αριθμός των επιπτώσεων

Οι τιμές και τα βάρη των δεικτών επιλέγονται από τον αναλυτή για το εκάστοτε σενάριο, ανάλογα με το πόσο σημαντική ή όχι, ενδέχεται να είναι η επίδρασή τους στην ισορροπία του περιβάλλοντος στη χρονική διάρκεια ζωής των έργων (25 έτη). Το άθροισμα των βαρών των δεικτών δίνει σε κάθε περίπτωση σύνολο 100%. Στην ουσία, για κάθε παρέμβαση εξετάζεται η ρεαλιστική υπόθεση, σύμφωνα με την οποία όλοι οι δείκτες που επιλέχθηκαν για την αποτίμηση της κατάστασης του φυσικού και του ανθρωπογενούς περιβάλλοντος της περιοχής μελέτης, χαρακτηρίζονται από διαφορετικές βαρύτητες λόγω της διαφορετικής σημαντικότητάς τους που κρίθηκε από τον αναλυτή ανά επίπτωση. Βάσει αυτής της υπόθεσης, η κατάσταση για κάθε μια από τις επιπτώσεις οι οποίες ερευνηθήκαν και για τις οποίες επιλέχθηκαν οι αντίστοιχοι δείκτες, επηρεάζει ανισοβαρώς τη συνολική ποιότητα της κατάστασης του περιβάλλοντος. Στον ακόλουθο Πίνακα 3, παρουσιάζεται το σύνολο των προτεινόμενων σεναρίων καθώς και ο $\Delta\text{ΚΠ}$ που υπολογίστηκε ανά περίπτωση.

Αξιολογώντας το συγκεντρωτικό Πίνακα 3 με βάση το $\Delta\text{ΚΠ}$, προκύπτει, όπως άλλωστε ήταν αναμενόμενο, ως ελκυστικότερη επιλογή το 2^ο σενάριο, όπου υλοποιείται το σύνολο των προγραμματιζόμενων αναπτυξιακών έργων. Στην ουσία όσο υψηλότερη είναι η τιμή του $\Delta\text{ΚΠ}$ τόσο πιο αναβαθμισμένη θεωρείται η κατάσταση του περιβάλλοντος και τόσο περισσότερο προτιμητέο θεωρείται ακολούθως το εκάστοτε σενάριο. Θεωρώντας συνεπώς ότι με $\Delta\text{ΚΠ} = 9.23$, το 2^ο σενάριο καταλαμβάνει σε ποσοστό, το $100\% = \left(\frac{9.23}{9.23}\right) \times 100$ της καλύτερης δυνατής επιλογής, μπορεί να

υπολογιστεί το ποσοστό με το οποίο συμμετέχουν τα υπόλοιπα σενάρια στη λήψη της τελικής απόφασης (*μέγεθος % of the best*).

Για παράδειγμα:

- το 1^ο σενάριο συμμετέχει με ποσοστό $\left(\frac{4.68}{9.23}\right) \times 100 = 50.7\%$
- το 3^ο σενάριο συμμετέχει με ποσοστό $\left(\frac{7.31}{9.23}\right) \times 100 = 79\%$
- το 4^ο, 5^ο και 6^ο με ποσοστά 83%, 71% και 64% αντίστοιχα.

Πίνακας 3: Παρουσίαση και αξιολόγηση εναλλακτικών σεναρίων με βάση το μέγεθος ΔΚΠ

A/ΑΣενάριο	Εναλλακτικά σενάρια	ΔΚΠ
2 ^ο	Υλοποίηση του συνόλου των προγραμματιζόμενων αναπτύξεων	ΔΚΠ2=9,23
4 ^ο	Κατασκευή παράκτιων έργων προστασίας και επέκταση οδικού δικτύου	ΔΚΠ4=7,62
3 ^ο	Κατασκευή παράκτιων έργων προστασίας και αποξήλωση εγκαταστάσεων πετρελαιοειδών	ΔΚΠ3=7,31
5 ^ο	Κατασκευή προτεινόμενων παράκτιων έργων προστασίας	ΔΚΠ5=6,58
6 ^ο	Κατασκευή συστήματος προβόλων σε όλο το μήκος του παραλιακού μετώπου	ΔΚΠ6=5,84
1 ^ο	Μηδενική παρέμβαση	ΔΚΠ1=4,68

Το συγκεκριμένο μέγεθος στην ουσία δείχνει πόσο πολύ απέχουν τα διάφορα εναλλακτικά σενάρια από την καλύτερη δυνατή επιλογή (δηλαδή το 2^ο σενάριο με βάση το ΔΚΠ).

- Το 1^ο σενάριο (μηδενική παρέμβαση) απέχει από το βέλτιστο στόχο:

$$100\% - 50.7\% = 49.3\%$$

- Καταλήγοντας όμως στο 4^ο σενάριο (επέκταση δικτύου και παράκτια έργα), αυτό απέχει από την καλύτερη δυνατή επιλογή:

$$100\% - 83\% = 17\%$$

Όσο μειώνεται δηλαδή η απόσταση από το 100%, τόσο ευκολότερη γίνεται η επιλογή μίας απόφασης, η οποία σαφώς δεν είναι η καλύτερη δυνατή αλλά μπορεί να αντικαταστήσει τη βέλτιστη, μειώνοντας έτσι σημαντικά το κόστος ή το χρόνο κατασκευής των έργων.

6. ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ “MindDecider”

Το MindDecider (www.minddecider.com) αποτελεί λογισμικό λήψης αποφάσεων και διαχείρισης ενός έργου και βασίζεται στην Πολυκριτηριακή Ανάλυση Αποφάσεων (multi-criteria decision analysis-MCDA). Στο λογισμικό εισάγονται οι δείκτες, βάσει των οποίων θα γίνει η επιλογή του βέλτιστου σεναρίου και ομαδοποιούνται σύμφωνα

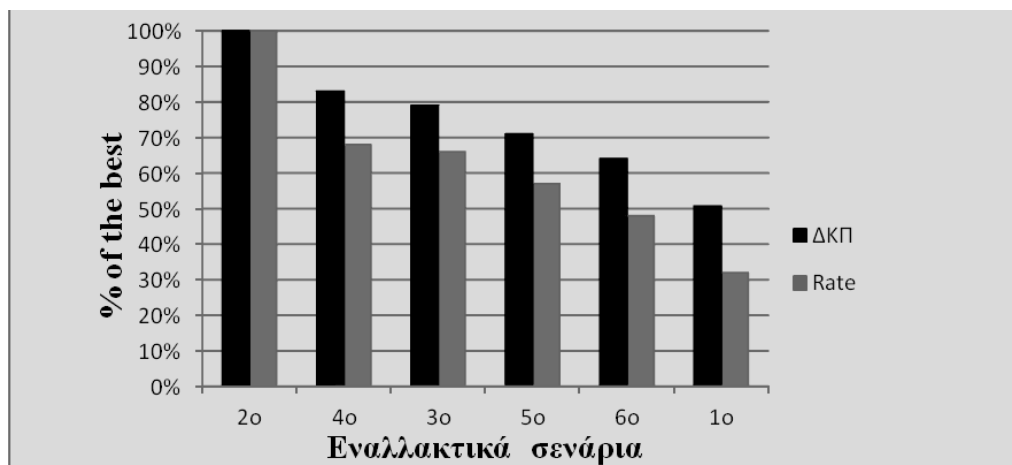
με τις βασικές κατηγορίες επιπτώσεων που δημιουργήθηκαν. Με χρήση του λογισμικού λήψης αποφάσεων MindDecider επιχειρείται η πολυκριτηριακή αξιολόγηση των έξι προτεινόμενων εναλλακτικών σεναρίων. Για κάθε σενάριο εξετάζεται η υπόθεση, σύμφωνα με την οποία όλες οι επιπτώσεις και οι επιλεγμένοι δείκτες ανά επίπτωση συνεισφέρουν με την ίδια σημαντικότητα +1 (significance) στο βαθμό προτίμησης «Rate» του εκάστοτε σεναρίου όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.

Significance	Criterion name	Units	Min input estimate	Max input estimate
+1.0	Ατμόσφαιρα	points	0 points	5 points
+1.0	Θαλάσσια οικολογία	points	0	3
+1.0	Τοπίο			
+1.0	Ποιότητα θαλάσσιου νερού			
+1.0	Έδαφος			
+1.0	Χερσαία οικολογία			

Significance	Criterion name	Units	Min input estimate	Max input estimate
+1.0	Κατάσταση Ποσειδωνίας	points	4 points	5 points
+1.0	Ποικιλότητα Βενθικής Χλωρίδας	points	1 points	2 points
+1.0	Ποικιλότητα βενθικής πανίδας	points	1 points	3 points

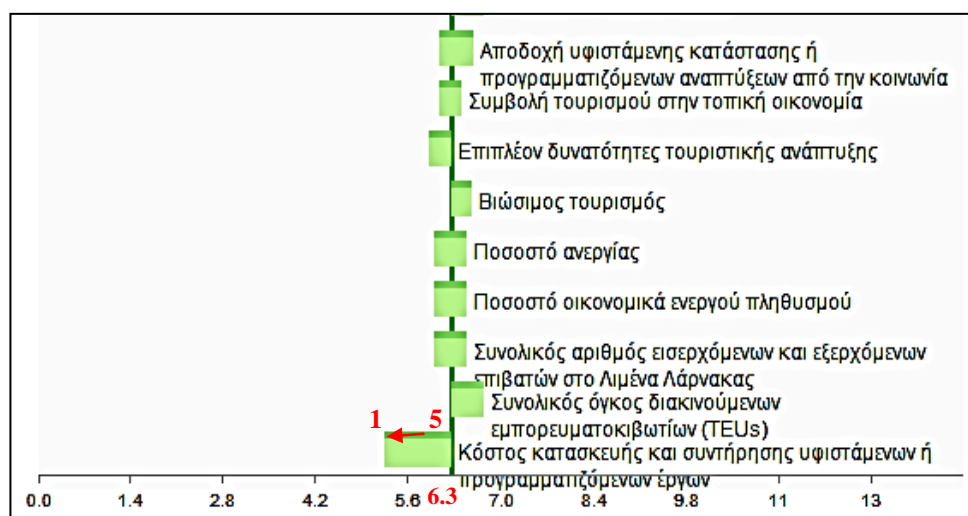
Σχήμα 3: Απόδοση τιμών σημαντικότητας +1 (significance) στις κατηγορίες των επιπτώσεων και στους επιλεγμένους ανά επίπτωση δείκτες

Με χρήση του λογισμικού τα εναλλακτικά σενάρια προτείνονται με την ίδια κατάταξη με βέλτιστο το 2^ο, όπως και στην περίπτωση χρήσης του μεγέθους ΔΚΠ, παρατηρείται όμως η εξής σημαντική διαφοροποίηση. Στην περίπτωση υπολογισμού του βαθμού προτίμησης Rate με χρήση του λογισμικού, το μέγεθος % of the best παρουσιάζεται σημαντικά μειωμένο όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4. Η διαπίστωση αυτή εξηγείται από το γεγονός ότι τόσο οι δείκτες όσο και οι επιπτώσεις συμμετέχουν στη λήψη μίας απόφασης με την ίδια σημαντικότητα (+1) και τα μοναδικά μεγέθη που επηρεάζουν την τελική επιλογή είναι οι τιμές που λαμβάνουν οι δείκτες ανά σενάριο. Οι αντίστοιχοι δηλαδή δείκτες και το σύνολο των επιπτώσεων επηρεάζουν ισοβαρώς τη συνολική ποιότητα της κατάστασης του περιβάλλοντος ανεξαρτήτως σεναρίου. Δεν αξιολογείται για παράδειγμα, όπως αξιολογείται στην περίπτωση υπολογισμού του ΔΚΠ, ικανοποιητικά το γεγονός, ότι βελτιώνοντας στο 4^ο σενάριο το οδικό δίκτυο, αναβαθμίζεται η ποιότητα της ατμόσφαιρας και η λύση καθίσταται ελκυστικότερη, προσεγγίζοντας κατά αυτό τον τρόπο περισσότερο το βέλτιστο σενάριο (2^ο σενάριο). Επιπρόσθετα για κάθε προτεινόμενο σενάριο, πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας των αποτελεσμάτων με χρήση των διαγραμμάτων Tornado. Το ευμετάβλητο στοιχείο, που χρήζει ανάλυσης ευαισθησίας, είναι η βαθμολογία των δεικτών.



Σχήμα 4: Σύγκριση του μεγέθους «% of the best» στην περίπτωση υπολογισμού του μεγέθους ΔΚΠ και Rate αντίστοιχα

Τα διαγράμματα Tornado (*Imperial College - Department of Computing, 2004*) δίνουν τη δυνατότητα ταυτόχρονης παρουσίασης των αποτελεσμάτων ανάλυσης ευαισθησίας για πολλές μεταβλητές, στη συγκεκριμένη περίπτωση οι 35 δείκτες και για μια μεταβλητή εξόδου, στη συγκεκριμένη περίπτωση ο βαθμός προτίμησης Rate, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5. Στην ουσία, για κάθε διάγραμμα και ανά σενάριο, παρουσιάζεται το πώς μεταβάλλεται ο βαθμός προτίμησης (Rate) όταν αλλάζουν οι τιμές των δεικτών. Η ονομασία των διαγραμμάτων tornado προκύπτει από το γεγονός ότι η τελική τους μορφή μπορεί να παρομοιαστεί με την εικόνα ενός ανεμοστρόβιλου (*Wikipedia, 2007*).



Σχήμα 5: Ανάλυση ευαισθησίας για υποσύνολο των δεικτών για το 5^ο εναλλακτικό σενάριο

Στο Σχήμα 5 παρουσιάζεται η μεταβολή της τιμής του βαθμού προτίμησης Rate για το σενάριο 5, καθώς μεταβάλλεται η βαθμολόγηση των δεικτών. Στον οριζόντιο άξονα φαίνεται ο βαθμός προτίμησης του συγκεκριμένου σεναρίου ο οποίος είναι 6,3 (τομή οριζόντιου με κάθετο άξονα). Οι πράσινες ράβδοι δείχνουν πως μεταβάλλεται η βαθμολογία κάθε δείκτη σε όλο το φάσμα της κλίμακας του (1 – 5) και στον οριζόντιο άξονα φαίνεται η αντίστοιχη τιμή του «Rate» στις αυξομειώσεις της βαθμολόγησης. Για βαθμό προτίμησης 6,3 ο δείκτης κόστος έργων έχει λάβει τη μέγιστη δυνατή τιμή του 5. Το διάγραμμα δίνει τη δυνατότητα επισκόπησης της μεταβολής του βαθμού προτίμησης του σεναρίου στην περίπτωση που αλλάξει η τιμή του παραπάνω δείκτη, στην

περίπτωση δηλαδή που μειωθεί η τιμή του. Παρατηρείται ότι μείωση της τιμής του δείκτη οδηγεί σε σημαντική μείωση του βαθμού προτίμησης. Στην ουσία για κάθε σενάριο το διάγραμμα tornado υποδεικνύει τους δείκτες για τους οποίους, πιθανές μεταβολές των τιμών τους, μεταβάλλουν σημαντικά ή όχι το βαθμό προτίμησης, καθιστώντας το σενάριο περισσότερο ή λιγότερο ελκυστικό.

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία εισάγονται βασικοί περιβαλλοντικοί, οικονομικοί και κοινωνικοί δείκτες με χρήση του πλαισίου DPSIR, βάσει των οποίων αξιολογείται ένα γενικότερο σχέδιο διαχείρισης της παράκτιας ζώνης. Ειδικότερα, με την αξιολόγηση των συγκεκριμένων δεικτών αναζητείται με τον υπολογισμό του Δείκτη Κατάστασης Περιβάλλοντος (ΔΚΠ) και με τη βοήθεια του λογισμικού λήψης αποφάσεων MindDecider, το ελκυστικότερο προτεινόμενο σενάριο με στόχο την προστασία και βελτίωση του παραλιακού μετώπου Λάρνακας – Δεκέλειας – Ορόκλινης στην Κύπρο. Τα αποτελέσματα των μεθόδων που χρησιμοποιούνται, βασίζονται τόσο στα διαθέσιμα από τη μελέτη δεδομένα όσο και στην υποκειμενικότητα του αναλυτή. Στην ουσία επιχειρείται η ολοκληρωμένη διαχείριση της παράκτιας ζώνης με χρήση πολυκριτηριακής ανάλυσης. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρέχουν σημαντικές πληροφορίες σχετικά με το βέλτιστο προτεινόμενο σενάριο όμως προτείνεται τόσο η περαιτέρω εισαγωγή και χρήση δεικτών, με στόχο να παρέχεται μία περισσότερο ολοκληρωμένη εικόνα της κατάστασης του περιβάλλοντος, όσο και η υιοθέτηση μεθοδολογίας για τη διαχρονική σύγκριση των τιμών των δεικτών ώστε να παρακολουθείται συστηματικά η εξέλιξη της κατάστασης των μεταβλητών που συνθέτουν το περιβάλλον της υπό μελέτη περιοχής.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Εργαστήριο Λιμενικών Έργων (ΕΛΕ) , Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, 2009. Μελέτη προστασίας και βελτίωσης της ακτής του παραλιακού μετώπου Λιμανιού Λάρνακας – Δυλιστηρίων – Ορόκλινης. Φάση Ι: Προμελέτη – Φάση ΙΙ: Υπαλλακτικές λύσεις.
- Μανούρης, Γ.Κ., Γιούτσου, Α. και Κασσιός, Κ., 2005. *Εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων και παράκτιες ζώνες*, Heleco 05, ΤΕΕ, Αθήνα.
- Imperial College - Department of Computing, 2004. *Sensitivity Analysis*. London.
- Jesinghaus, J., 1999. *A European System of Environmental pressure Indices: First Volume of the Environmental Pressure Indices Handbook*.
- MindDecider, <http://www.minddecider.com/>
- Organization for Economic Cooperation and Development (OECD), 1991. *Environmental indicators: a preliminary set.*, (OECD), Paris.
- Storksdieck, M. and Otto-Zimmermann, K., 1994. *Advanced Environmental Management Tools and Environmental Budgeting at the Local Level*.
- Tsoukala, V.K., Anastasaki, E.N., Moutzouris, C.I., Iakovou, N. and Zervos, S., 2009. *Beach Rehabilitation in Cyprus using Environmentally Friendly Structures*. *Journal of Marine Environmental Engineering.*, 9: 123-143.
- Wikipedia, 2007. *Tornado Diagrams*.

I

**ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ
ΒΑΣΕΙΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ
ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ**

ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΜΕΙΩΣΗΣ ΤΟΥ ΜΗ ΑΝΤΑΠΟΔΟΤΙΚΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΥΔΡΕΥΣΗΣ

Β. Κανακούδης¹, Σ. Τσιτσιφλή¹, Π. Σαμαράς², Α. Ζουμπούλης³

¹Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Πεδίον Άρεως, Βόλος

²Τμήμα Τεχνολογίας Τροφίμων, Αλεξάνδρειο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Θεσσαλονίκης, Σίνδος, Θεσσαλονίκη

³Τμήμα Χημείας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Πανεπιστημιούπολη, Θεσσαλονίκη

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι εταιρείες παροχής νερού αντιμετωπίζουν το πρόβλημα των μεγάλων ποσοτήτων μη ανταποδοτικού νερού που ξεπερνά ακόμα και το 50% του εισερχόμενου νερού στα δίκτυα. Ειδικά σε περιοχές που επικρατούν συνθήκες έλλειψης νερού όπως οι χώρες της Μεσογείου είναι επιτακτική η ανάγκη λήψης μέτρων μείωσης του μη ανταποδοτικού νερού. Η εργασία παρουσιάζει μία ολοκληρωμένη προσέγγιση προς αυτήν την κατεύθυνση. Αυτή περιλαμβάνει την καταγραφή του δικτύου, την αξιολόγηση του επιπέδου λειτουργίας του, την υδραυλική του προσομοίωση, τον εντοπισμό των προβλημάτων και των αιτιών τους και τη διαμόρφωση προτάσεων αντιμετώπισής τους. Στην εργασία παρουσιάζονται τα βήματα ανάπτυξης ενός εργαλείου λήψης αποφάσεων που στοχεύει στην επιλογή της βέλτιστης στρατηγικής μείωσης του μη ανταποδοτικού νερού λαμβάνοντας υπόψη οικονομικά κριτήρια.

AN INTEGRATED APPROACH FOR THE NON REVENUE WATER REDUCTION IN WATER DISTRIBUTION NETWORKS

V. Kanakoudis¹, S. Tsitsifli¹, P. Samaras², A. Zouboulis³

¹Civil Engineering dept., University of Thessaly, Pedion Areos, Volos

²Food Technology dept., Technological Educational Institute of Thessaloniki, Sindos, Thessaloniki

³Chemistry dept., Aristotle University of Thessaloniki, Thessaloniki

ABSTRACT

One of the major problems water utilities are facing today is the high levels of Non Revenue Water (NRW), exceeding 50% of the water entering water distribution networks. NRW reduction measures must be taken especially in areas facing water scarcity conditions, such as the countries of the Mediterranean. The present study presents an integrated methodology towards NRW reduction. This methodology includes the network's monitoring, its performance evaluation, its hydraulic simulation, the problems and the related causes' identification and finally the proposals formation. The present study presents the implementation steps of a Decision Support System, aiming at selecting the most appropriate NRW reduction strategy based on economic criteria.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το πρόβλημα του Μη Ανταποδοτικού Νερού (νερό που δεν αποφέρει έσοδα στην εταιρεία ύδρευσης) είναι πολύ σοβαρό ειδικά για τις εταιρείες ύδρευσης που βρίσκονται σε περιοχές με προβλήματα λειψυδρίας, που πλήττονται και από την κλιματική αλλαγή. Τέτοιες περιοχές είναι οι χώρες της Νότιας Ευρώπης και της Μεσογείου. Μελέτη της Παγκόσμιας Τράπεζας αναφέρει ότι πάνω από 45 δισεκατομμύρια κυβικά μέτρα νερού χάνονται από διαρροές σε δίκτυα ύδρευσης, ποσότητα που αντιστοιχεί στο 35% του συνολικού νερού που παρέχεται στα δίκτυα (Liemberger et al., 2007). Αν η μισή από την ποσότητα του νερού που χάνεται εξοικονομούταν, περίπου 200 εκατομμύρια άνθρωποι θα είχαν πρόσβαση σε καθαρό πόσιμο νερό χωρίς καμία άλλη επένδυση. Το μη ανταποδοτικό νερό έχει και οικονομικές επιπτώσεις αφού οι εταιρείες ύδρευσης χάνουν έσοδα. Σε παγκόσμιο επίπεδο το Μη Ανταποδοτικό νερό εκτιμάται σε 10 δισεκατομμύρια ευρώ (Liemberger et al., 2007). Υπάρχουν όμως και περιβαλλοντικές επιπτώσεις που σχετίζονται με το ανθρακικό αποτύπωμα των απωλειών νερού. Το νερό για να φτάσει στον καταναλωτή έχει αντληθεί, επεξεργαστεί, διανεμηθεί και έχει υποστεί διαρροές. Στην περίπτωση που έχει χρησιμοποιηθεί και αφαλάτωση το ανθρακικό αποτύπωμα είναι ακόμη μεγαλύτερο. Έτσι το μη ανταποδοτικό νερό έχει και αυτό το δικό του ανθρακικό αποτύπωμα. Επιπλέον η Οδηγία Πλαίσιο για τα νερά WFD 2000/60/EK απαιτεί οι εταιρείες ύδρευσης όλων των κρατών μελών να εφαρμόσουν αποτελεσματικές στρατηγικές μείωσης του μη ανταποδοτικού νερού και να εγγραφούν στην ανάκτηση του πλήρους κόστους του νερού που χρησιμοποιείται (αρχή ανάκτησης του πλήρους κόστους του νερού).

Για να αντιμετωπίσουν οι εταιρείες ύδρευσης το πρόβλημα του μη ανταποδοτικού νερού εφαρμόζουν διάφορες μεθοδολογίες για τον έλεγχο των απωλειών. Φορείς όπως η International Water Association και η American Water Works Association έχουν προτείνει τέτοιου είδους μεθοδολογίες και έχουν καταλήξει σε μία κοινή μεθοδολογία ώστε να υπάρξει κοινή γλώσσα αναφοράς. Η μεθοδολογία αυτή περιλαμβάνει την αξιολόγηση με την χρήση του Υδατικού Ισοζυγίου και των 170 δεικτών απόδοσης, για τον υπολογισμό των οποίων χρησιμοποιούνται 232 μεταβλητές. Η χρήση αυτής της μεθοδολογίας είναι παγκόσμια αναγνωρισμένη. Η εφαρμογή όμως αυτής της μεθοδολογίας σε περιοχές όπως η Μεσόγειος έχει αναδείξει προβλήματα εφαρμογής, όπως αναξιόπιστα ή ανύπαρκτα στοιχεία και τοπικές συνθήκες. Μία ολοκληρωμένη προσέγγιση αντιμετώπισης του μη ανταποδοτικού νερού απουσιάζει. Μία τέτοια προσέγγιση θα χρησιμοποιήσει ποσοτικοποιημένους και ζυγισμένους δείκτες απόδοσης που να αναφέρονται στις τοπικές συνθήκες και μία ρουτίνα βελτιστοποίησης για την ταξινόμηση των δράσεων που θα εφαρμόσουν οι εταιρείες ύδρευσης για να μειώσουν το μη ανταποδοτικό νερό. Αυτός είναι ο στόχος του Ευρωπαϊκού Προγράμματος MED “WATERLOSS-Διαχείριση των απωλειών νερού σε δίκτυα ύδρευσης” (Project 2G-MED09-445 - www.waterloss-project.eu), συγχρηματοδοτούμενου από το ΕΤΠΑ, που συμπληρώνει τον 2^ο χρόνο υλοποίησής του. Στόχος του είναι η δημιουργία ενός συστήματος υποστήριξης λήψης αποφάσεων το οποίο αφού αξιολογεί την απόδοση ενός συστήματος παροχής νερού χρησιμοποιώντας το υδατικό ισοζύγιο και επιλεγμένους δείκτες απόδοσης, θα προτείνει μέτρα μείωσης του μη ανταποδοτικού νερού έχοντας κάνει ανάλυση κόστους οφέλους.

2. ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΤΟΥ ΜΗ ΑΝΤΑΠΟΔΟΤΙΚΟΥ ΝΕΡΟΥ

2.1. ΑΝΑΓΚΑΙΑ ΒΗΜΑΤΑ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ

Τα βασικότερα προβλήματα που αντιμετωπίζουν τα δίκτυα ύδρευσης είναι: α) Απώλειες νερού (water losses), β) προβλήματα Φυσικής Ακεραιότητας του δικτύου (structural failures), γ) προβλήματα Παροχτευτικής Ικανότητας του δικτύου (carrying capacity failures), και δ) προβληματική Ποιότητα Νερού (poor water quality) Οι κυριότερες αιτίες των προβλημάτων αυτών είναι: α) Διάβρωση μεταλλικών αγωγών (corrosion of metallic pipes), β) η Μείωση της παροχτευτικής Ικανότητας (low carrying capacity), γ) Διαρροές & Θραύσεις (leaks & breaks), δ) η Υποβάθμιση της Ποιότητας του Νερού Δικτύου (water quality degradation), και ε) άλλες Αιτίες (miscellaneous). Τα αναγκαία βήματα προς την κατεύθυνση της αντιμετώπισης των προβλημάτων που παρουσιάζονται στα δίκτυα ύδρευσης είναι: α) Αναγνώριση του Δικτύου με την χαρτογράφηση, χρησιμοποιώντας κατάλληλα εργαλεία (π.χ. ΓΣΠ), β) Κατανόηση του Δικτύου μέσω της παρακολούθησης της λειτουργίας του (monitoring), χρησιμοποιώντας συστήματα τηλεμετρίας/τηλεχειρισμού (SCADA) και η υδραυλική προσομοίωση της λειτουργίας του (simulation), γ) Αναγνώριση των προβλημάτων διερευνώντας τα συμπτώματα που εμφανίζουν, δ) Κατανόηση των προβλημάτων βρίσκοντας τις πιθανές αιτίες που τα προκάλεσαν, ε) Σύνδεση των συμπτωμάτων με κύριες και πιθανές αιτίες και στ) Σύνδεση των αιτιών με κύριες και δευτερεύουσες ενέργειες αντιμετώπισης (Kanakoudis and Tolikas, 2001, Kanakoudis, 2004). Σε όλη αυτή τη διαδικασία είναι εξαιρετικά χρήσιμη η εμπειρία που υπάρχει σε παγκόσμιο επίπεδο μέσα από έρευνες συγκριτικής αξιολόγησης και την διερεύνηση των βέλτιστων πρακτικών.

2.2. ΤΟ ΥΔΑΤΙΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ

Μία ολοκληρωμένη μεθοδολογία έχει σαν στόχο την εξοικονόμηση νερού μέσα από την μείωση των διαφόρων ειδών απωλειών και την μείωση της σπατάλης από τον καταναλωτή. Τα βήματα μιας ολοκληρωμένης μεθοδολογίας περιλαμβάνουν: α) αναγνώριση, παρακολούθηση, διάγνωση, εντοπισμός, επέμβαση, επαλήθευση επιλογής, β) προσδιορισμό του Υδατικού Ισοζυγίου του δικτύου, και γ) αξιολόγηση της λειτουργίας του.

Το πρώτο κρίσιμο βήμα είναι η αξιόπιστη αξιολόγηση της υφιστάμενης κατάστασης του δικτύου ύδρευσης και της βέλτιστης λύσης επέμβασης. Αυτό μπορεί να γίνει με την χρήση αναγνωρισμένων μεθοδολογιών υπολογισμού του Υδατικού Ισοζυγίου του δικτύου, την χρήση αναγνωρισμένων δεικτών αξιολόγησης του επιπέδου λειτουργίας όλου του συστήματος και την γνώση των πλέον εξελιγμένων τεχνικών/τεχνολογιών. Η πλέον αναγνωρισμένη για την αξία της μεθοδολογία αξιολόγησης των δικτύων ύδρευσης είναι το Πρότυπο Διεθνές Υδατικό Ισοζύγιο της IWA και η χρήση των 170 δεικτών απόδοσης. Το Πρότυπο Διεθνές Υδατικό Ισοζύγιο χρησιμοποιείται σε παγκόσμιο επίπεδο για τον προσδιορισμό του μη ανταποδοτικού νερού και των πραγματικών απωλειών (Lambert et al., 1999) (Σχήμα 1). Το μη ανταποδοτικό νερό είναι ένας κρίσιμος δείκτης για την εκτίμηση της απόδοσης των δικτύων ύδρευσης, αφού δείχνει το νερό που χρησιμοποιείται ή χάνεται και δεν αποφέρει έσοδα στην εταιρεία. Αποτελείται από την Μη Τιμολογούμενη μετρούμενη ή μη κατανάλωση, τις φαινόμενες και τις πραγματικές απώλειες. Οι πραγματικές (ή φυσικές) απώλειες αντιπροσωπεύουν τις φυσικές απώλειες νερού εξαιτίας διαρροών σε κύριους αγωγούς, στις μονάδες επεξεργασίας νερού, στους αγωγούς διανομής, στις δεξαμενές αποθήκευσης (και υπερχειλίσεις) και στους αγωγούς συνδέσεων με τους

καταναλωτές μέχρι τον μετρητή του καταναλωτή. Οι φαινόμενες (ή εμπορικές) απώλειες που είναι ποσότητα νερού που χρησιμοποιείται αλλά δεν αποφέρει έσοδα στην εταιρεία ύδρευσης. Αποτελούνται από την μη εξουσιοδοτημένη χρήση εξαιτίας κλοπής, και παράνομης χρήσης, από τις ανακρίβειες των μετρητών και των μετρήσεων συμπεριλαμβανομένης της υπομέτρησης/υπερ-μέτρησης, εσφαλμένων εκτιμήσεων σταματημένων μετρητών και σφαλμάτων στην διαδικασία μεταφοράς της καταγραφής του μετρητή στο τελικό πληροφοριακό σύστημα.

Εξαιτίας του μεγάλου όγκου του μη ανταποδοτικού νερού σε παγκόσμιο επίπεδο είναι σημαντικό να κατανοήσει κανείς ότι οι απώλειες νερού στο δίκτυο αποτελούν έναν χρήστη και μάλιστα τον μεγαλύτερο όταν αυτές οι ποσότητες φτάνουν ή και ξεπερνούν το 30% του εισερχόμενου νερού στο δίκτυο. Έτσι οι απώλειες νερού στα δίκτυα ύδρευσης αποτελούν έναν εν δυνάμει υδατικό πόρο, ο οποίος αν χρησιμοποιηθεί δεν θα χρειάζονται επιπλέον επενδύσεις για εξασφάλιση επιπλέον ποσοτήτων νερού.

Διεθνές Πρότυπο Υδατικό Ισοζύγιο της IWA			Τροποποίηση McKenzie et al Τροποποίηση Kanakoudis & Tsitsifli			
Εισερχόμενο Νερό στο Δίκτυο (A3)	Εξουσιοδοτημένη Κατανάλωση (A14-A10+A13)	Τιμολογούμενη Εξουσιοδοτημένη Κατανάλωση (A10-A8+A9)	Τιμολογούμενη Μετρούμενη Κατανάλωση (A8)	Ανταποδοτικό Νερό (A20=A8+A9)	Νερό που πωλείται και αποδίδει έσοδα (εισπράττειται) (A24-A8+A9-A23)	Νερό που πωλείται και αποδίδει έσοδα (εισπράττειται) (A24-A20-A23)
			Τιμολογούμενη μη-Μετρούμενη Κατανάλωση (A9)		Νερό που πωλείται και ΔΕΝ αποδίδει έσοδα (δεν εισπράττειται/apparent NRW) A23	Νερό που πωλείται και ΔΕΝ αποδίδει έσοδα (δεν εισπράττειται/apparent NRW) A23
		Μη-Τιμολογούμενη Εξουσιοδοτημένη Κατανάλωση (A13=A11+A12)	Μη-Τιμολογούμενη Μετρούμενη Κατανάλωση (A11)	Μη Ανταποδοτικό Νερό/NRW (A21=A3-A24-A23)	Νερό που δεν πωλείται και δεν αποδίδει έσοδα (μη Ανταποδοτικό Νερό/real NRW) (A21=A3-A24-A23)	Λογιστικό μη ανταποδοτικό νερό (Accounted Non Revenue Water) (A26=A21-A25)
		Μη-Τιμολογούμενη μη-Μετρούμενη Κατανάλωση (A12)				
	Απώλειες Νερού (A15=A3-A14)	Φαινόμενες Απώλειες Νερού (A18=A16+A17)	Μη-Εξουσιοδοτημένη Κατανάλωση (A16)			
	Πραγματικές Απώλειες Νερού (A19=A15-A18)			Απώλειες Νερού που αποδίδουν έσοδα (Διαφορά Πανιού) A25		

Σχήμα 1: Το Υδατικό Ισοζύγιο της IWA, η 1^η τροποποίηση των McKenzie et al. (2007) και η 2^η τροποποίηση (Kanakoudis & Tsitsifli, 2010)

Παρόλο που η μεθοδολογία της IWA βασίζεται στην λογική του super market, επιλέγοντας ότι πραγματικά χρειάζεται ο χρήστης, κατά τη διάρκεια της εφαρμογής της έχουν παρουσιαστεί διάφορα προβλήματα. Το ζήτημα της ποιότητας και της αξιοπιστίας των στοιχείων των εταιρειών ύδρευσης και της μεθόδου συλλογής τους τέθηκε από πολλούς ερευνητές κατά την εφαρμογή της μεθοδολογίας της IWA (Paracampros & Thornton 2002, Kolbl et al. 2007, Guibentif et al. 2007). Η εφαρμογή του Υδατικού Ισοζυγίου στις αναπτυσσόμενες χώρες και συγκεκριμένα στην Νότια Αφρική ανέδειξε το πρόβλημα της μετρούμενης τιμολογούμενης κατανάλωσης η οποία όμως ποτέ δεν πληρώνεται. Έτσι το 2007 οι McKenzie et al., πρότειναν την 1^η τροποποίηση του Υδατικού Ισοζυγίου χωρίζοντας το Ανταποδοτικό νερό σε τρεις επιμέρους καταναλώσεις: Μηδενική χρέωση, ανταποδοτικό νερό που πληρώνεται και χρέωση που δεν πληρώνεται (Σχήμα 1). Η εφαρμογή της μεθοδολογίας του Υδατικού Ισοζυγίου σε χώρες της Μεσογείου έδειξε ότι υπάρχουν τοπικά χαρακτηριστικά και πολιτικές που δημιουργούν προβλήματα στον υπολογισμό του Υδατικού Ισοζυγίου (Kanakoudis and Tsitsifli, 2010). Τέτοια προβλήματα συμπεριλαμβάνουν την μη διαθεσιμότητα πολλών στοιχείων που είναι απαραίτητα για τον υπολογισμό του Υδατικού Ισοζυγίου όπως η μη εξουσιοδοτημένη κατανάλωση, τα σφάλματα των μετρητών (υπομέτρηση, υπερ-μέτρηση) κ.α. Επιπλέον οι τιμολογιακές πολιτικές που εφαρμόζουν οι εταιρείες ύδρευσης χρεώνοντας στους πελάτες μία πάγια χρέωση (είτε

σε κυβικά μέτρα νερού ή σε ευρώ), δίνουν την εντύπωση χαμηλότερων επιπέδων του μη ανταποδοτικού νερού. Έτσι αποτελούν μία δικαιολογία για τους διαχειριστές των συστημάτων παροχής νερού, οι οποίοι δεν λαμβάνουν κανένα μέτρο μείωσης του μη ανταποδοτικού νερού. Γι' αυτό το 2010 οι Kanakoudis και Tsitsifli πρότειναν την 2^η τροποποίηση του Υδατικού Ισοζυγίου της IWA ενσωματώνοντας την 1^η τροποποίηση των McKenzie et al. (Σχήμα 1). Έτσι το Υδατικό Ισοζύγιο της IWA από πλήρως ογκομετρικό έγινε πλήρως οικονομικό. Η 2^η τροποποίηση του Υδατικού Ισοζυγίου εισαγάγει την έννοια της Διαφοράς Παγίου που ουσιαστικά αφορά σε απώλειες νερού των οποίων την αξία η εταιρεία ύδρευσης ανακτά.

2.3. ΟΙ ΔΕΙΚΤΕΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ

Η IWA το 2000 δημοσίευσε το 1^ο εγχειρίδιο δεικτών απόδοσης συμπεριλαμβάνοντας 133 δείκτες από τους οποίους οι 26 ιεραρχήθηκαν ως 1^{ης} προτεραιότητας (Alegre et al., 2000). Μετά από 6 χρόνια το εγχειρίδιο αυτό επικαιροποιήθηκε συμπεριλαμβάνοντας 170 δείκτες απόδοσης που χωρίζονται σε 6 κατηγορίες (Πίνακας 1) και απαιτούν την μέτρηση 232 μεταβλητών για τον υπολογισμό τους (Alegre et al., 2006). Οι δείκτες απόδοσης της IWA περιλαμβάνουν από απλούς δείκτες που προσφέρουν μια γενική επισκόπηση της διαχείρισης της λειτουργίας του δικτύου όσον αφορά την αποδοτικότητα μέχρι λεπτομερείς δείκτες που αφορούν σε εξειδικευμένα στοιχεία λειτουργικών πρακτικών. Η επικαιροποίηση των δεικτών απόδοσης είναι μία συνεχής διαδικασία.

Στόχος του προγράμματος WATERLOSS είναι η εξέταση των υπάρχοντων δεικτών απόδοσης και η επιλογή εκείνων που αντιπροσωπεύουν καλύτερα τις εταιρείες ύδρευσης των εταίρων του προγράμματος και των χωρών της Μεσογείου. Παράλληλα στόχος είναι η διαμόρφωση νέων δεικτών με βάση τα τοπικά χαρακτηριστικά της ευρύτερης περιοχής. Στα πλαίσια λοιπόν του προγράμματος επιλέχθηκαν 75 από τους 170 δείκτες απόδοσης της IWA και κατηγοριοποιήθηκαν σε 3 κατηγορίες προτεραιότητας. Οι 48 δείκτες απόδοσης κρίθηκαν ότι είναι 1^{ης} προτεραιότητας, οι 16 2^{ης} και οι 11 υπόλοιποι 3^{ης} προτεραιότητας. Επίσης με βάση τα τοπικά χαρακτηριστικά και τις συνθήκες δημιουργήθηκαν 42 καινούριοι δείκτες απόδοσης, 11 προερχόμενοι από τους δείκτες της IWA έχοντας όμως διαφορετικό παρανομαστή (Πίνακας 2) και 31 καινούριοι δείκτες (Πίνακας 3).

Πίνακας 1. Οι έξι κατηγορίες και υποκατηγορίες στις οποίες εντάσσονται οι 170 δείκτες απόδοσης της IWA (Alegre et al., 2006)

Δείκτες Απόδοσης / Αριθμός	Δείκτες Απόδοσης / Αριθμός	Δείκτες Απόδοσης / Αριθμός
Υδατικοί πόροι (WR) 4	Λειτουργικοί (Op) 44	Χρηματοοικονομικοί (Fi) 47
Προσωπικό (Pe) 26	Επιθεώρηση & συντήρηση	Έσοδα
Συνολικό προσωπικό	2	Κόστη
2	Διαβάθμιση οργάνων	3
Προσωπικό ανά κύρια λειτουργία	7	Διαθεσιμότητα οχημάτων
7	1	Σύνθεση λειτουργικού κόστους ανά τύπο κόστους
Τεχνικό προσωπικό ανά δραστηριότητα	6	Επιθεώρηση εξοπλισμού μετάδοσης ηλεκτρικού σήματος
6	3	Σύνθεση λειτουργικού κόστους ανά κύρια λειτουργία
Προσόντα προσωπικού	3	Αποκατάσταση αγωγών/βαλβίδων/συνδέσεων
3	2	Σύνθεση κόστους κεφαλαίου
Εξειδίκευση προσωπικού	3	Επιθεώρηση & συντήρηση εξοπλισμού
3	2	Επενδύσεις
Υγιεινή και ασφάλεια προσωπικού	4	Αποκατάσταση αντλιών
4	2	Μέση χρέωση νερού
Υπερωριακή εργασία	1	Λειτουργικές Απώλειες Νερού
1	7	Αποδοτικότητα
Ποιότητα Υπηρεσιών (QS) 34	Αστοχίες	Μόχλευση
34	6	2
Κάλυψη υπηρεσιών	5	Μέτρηση νερού
5	4	Ρευστότητα
Public taps & standpipes	4	Παρακολούθηση ποιότητας νερού
4	5	Κερδοφορία
Πίεση & συνεχής παροχή	8	Φυσικοί (Ph) 15
8	15	Οικονομικές απώλειες νερού
Ποιότητα νερού	5	Επεξεργασία & αποθήκευση
5	3	Σύνθεση λειτουργικού κόστους ανά κύρια λειτουργία επιχείρησης νερού
Παράπονα πελατών	9	Άντληση
9	4	4
Τοποθέτηση & επισκευή οικιακών συνδέσεων & μετρητών	3	Μεταφορά & διανομή
3	2	2
		Μετρητές
		4
		Αυτοματισμός & έλεγχος
		2

Πίνακας 2. Οι 11 δείκτες που προέρχονται από αυτούς της IWA (αλλαγή παρανομαστή)

Δείκτες Απόδοσης	Επεξήγηση	Τύπος υπολογισμού	Μονάδες	
Op45	Πραγματικές απώλειες ανά υλικό αγωγού	Πραγματικές απώλειες / μήκος αγωγών του ίδιου υλικού	A19 / C32(a-i)	m ³ /km
Op46	Πραγματικές απώλειες ανά διάμετρο αγωγού	Πραγματικές απώλειες / μήκος αγωγών του ίδιου υλικού	A19 / C33(a-i)	m ³ /km
Op47	Πραγματικές απώλειες ανά υλικό και διάμετρο	Πραγματικές απώλειες / μήκος αγωγών του ίδιου υλικού και ίδιας διαμέτρου	A19 / C34(a-i)	m ³ /km
Op51	Φαινόμενες απώλειες ανά δεξαμενή οροφής	Φαινόμενες απώλειες / αριθμό δεξαμενών	A18 / C26	m ³
Op52	Φαινόμενες απώλειες ανά όγκο δεξαμενής οροφής	(Φαινόμενες απώλειες / όγκο δεξαμενών οροφής)*100	(A18/C30)*100	%
Op53	Φαινόμενες απώλειες ανά υδρόμετρο	(Φαινόμενες απώλειες) / (αριθμό υδρομέτρων)	A18/E6	m ³ /υδρομετρητή
Op54	ALI	Φαινόμενες απώλειες / 5% των πωλήσεων του νερού	A18/(0,05*G3)	
Op55	Απώλειες νερού ανά υδατικό πόρο	(Απώλειες νερού/Νερό που λαμβάνεται από τον υδατικό πόρο)*100	{A15/(ΣC27(a-i))}*100	%
Op58	NRW ανά σύνδεση	(NRW*1000) / (αριθμός συνδέσεων καταναλωτών * περίοδος μελέτης)	(A21*1000)/C24/H1	lt/σύνδεση/ημέρα
Op59	NRW ανά μήκος αγωγών	NRW / μήκος αγωγών	A21/C8	m ³ /km αγωγών/έτος
Op60	Αστοχίες αγωγών ανά τύπο αγωγών	[(Αριθμός αστοχιών αγωγών του ίδιου υλικού στη διάρκεια της περιόδου μελέτης x 365) / περίοδος μελέτης] / μήκος αγωγών του ίδιου υλικού] x 100	[(D79(a-i)*365)/H1/C32(a-i)]	No./km/έτος

Πίνακας 3. Οι 31 νέοι δείκτες απόδοσης

Δείκτες Απόδοσης	Επεξήγηση	Τύπος υπολογισμού	Μονάδες	
Fi48	MCD ανά πραγματικές απώλειες	(MCD / Πραγματικές Απώλειες)*100	(A25/A19)*100	%
Fi49	MCD ανά σύνδεση	MCD / αριθμός συνδέσεων / περίοδος μελέτης	A25/C24/H1	m ³ /σύνδεση/ημέρα
Fi50	Λογιστικό NRW ανά NRW	(Λογιστικό NRW / NRW)*100	(A26/A21)*100	%
Fi51	Κόστος ενέργειας ανά όγκο	Κόστος ενέργειας (€) / Εισερχόμενος όγκος στο σύστημα (m ³)	G11 / A3	€/m ³
Fi52	προθυμία πληρωμής (ευαισθησία του καταναλωτή σε θέματα έλλειψης νερού και ξηρασίας)	Κόστος διαφύλαξης παροχής νερού/ εξουσιοδοτημένη κατανάλωση στην περίοδο μελέτης	G59/A14	EUR/m ³
Op48	Πραγματικές απώλειες ανά ηλικία αγωγών	Πραγματικές απώλειες / μήκος αγωγών της ίδια ηλικίας	A19/C35(a-i)	m ³ /km
Op49	Πραγματικές απώλειες ανά συντελεστή τραχύτητας	Πραγματικές απώλειες / συντελεστή τραχύτητας	A19/C36(a-i)	
Op50	Πραγματικές απώλειες ανά πίεση λειτουργία	Πραγματικές απώλειες / μέση πίεση λειτουργίας	A19/D34	m ³ /m
Op56	Απώλειες νερού ως % της χρήσης νερού (οικιακή, βιομηχανική, εμπορική)	(Απώλειες νερού / χρήση νερού)*100	(A15/E14(a-i))*100	%
Op57	Απώλειες νερού ανά ύψος κτιρίων	Απώλειες νερού / μέσο ύψος κτιρίων	A15 / C27	m ³ /m
Op61	Ενέργεια διαρροών ή Απώλεια ενέργειας εξαιτίας διαρροών (άθροισμα των απωλειών ενέργειας σερβιτών με τις διαρροές και την επιπρόσθετη ενέργεια που απαιτείται για να ξεπεραστούν οι διαρροές)	Το άθροισμα των απωλειών ενέργειας μέσω του διαρρέοντος νερού και την επιπρόσθετη ενέργεια που απαιτείται για να ξεπεραστεί η τριβή με την αυξημένη ροή που χρειάζεται για να ξεπεραστεί η διαρροή	(D77+D73-D74)/D78	
Op62	Standards compliance	(ενέργεια που παραδίδεται στους χρήστες / ελάχιστη απαιτούμενη χρήσιμη ενέργεια)*100	(D75/D76)*100	%
Op63	Ανθρακικό Αποτύπωμα ανά Εισερχόμενο Νερό	Το παραγόμενο ανθρακικό αποτύπωμα κατά τη διάρκεια της διαδικασίας παροχής νερού / SIV	D72 / A3	tns CO2/m ³
Op64	Αντικατάσταση μετρητών	(Μετρητές παροχής που αντικαθίστανται/ συνολικός αριθμός μετρητών παροχής)*100	(D69/C10)*100	%
Op65	Εκτίμηση των αστοχιών σύμφωνα με τον τύπο του υλικού και των fittings στους αγωγούς και τις συνδέσεις των καταναλωτών	ρυθμοί αστοχιών (για κάθε τύπο αστοχίας) σε αριθμό αστοχιών/συνολικός αριθμός συσκευών	D80(a-i) / Q26	
Op66	Ελαστικότητα των απωλειών σε σχέση με την πίεση λειτουργίας	Ποσοστιαία μεταβολή των απωλειών / ποσοστιαία μεταβολή πίεσης	(ΔA19/A19)/(ΔD34/D34)	m ³ /m
Op67	Ελαστικότητα του ρυθμού εμφάνισης αστοχιών αγωγών και συνδέσεων που σχετίζονται με την πίεση λειτουργίας	Ποσοστιαία μεταβολή αστοχιών αγωγών και συνδέσεων / ποσοστιαία μεταβολή πίεσης	[Δ(D28+D29)/(D28+D29)]/(ΔD34/D34)	αστοχίες/m
Op68	Αριθμός ημερών που απαιτούνται για την επισκευή γεγονότων διαρροών	Συνολικός αριθμός ημερών που απαιτούνται για την επισκευή γεγονότων διαρροών / συνολικό αριθμό επισκευών	D70 / D71	ημέρες/επιδιορθώσεις
Ph16	Κάτοικοι ανά υδρόμετρο	Αριθμός κατοίκων /αριθμός υδρομέτρων	E5/E6	Inh/wm
Ph17	Ενέργεια ανά όγκο	Χρησιμοποιούμενη ενέργεια (KWh) / Εισερχόμενο	D68 / A3	KWh/m ³

Δείκτες Απόδοσης		Επεξήγηση	Τύπος υπολογισμού	Μονάδες
		νερό (m ³)		
Ph18	Αναλογία οικιακών υδρομέτρων ηλικίας μικρότερης από 5 χρόνια	(οικιακά υδρόμετρα ηλικίας μικρότερης από 5 χρόνια / συνολικός αριθμός υδρομέτρων)*100	(C28/E6)*100	%
Ph19	Αναλογία οικιακών υδρομέτρων ηλικίας από 5 έως 10 χρόνια	(οικιακά υδρόμετρα ηλικίας 5 - 10 ετών / συνολικός αριθμός υδρομέτρων)*100	(C29/E6)*100	%
Ph20	Αναλογία οικιακών υδρομέτρων ηλικίας μεγαλύτερης από 10 χρόνια	(οικιακά υδρόμετρα ηλικίας μεγαλύτερης από 10 χρόνια / συνολικός αριθμός υδρομέτρων)*100	(C37/E6)*100	%
QS35	Μέγεθος οικιακής κατανάλωσης	(Οικιακή καταάλωση / συνολική κατανάλωση)*100	(E12/A14)*100	%
QS36	Μέγεθος εμπορικής κατανάλωσης	(Εμπορική / συνολική κατανάλωση)*100	(E13/A14)*100	%
QS37	Αναλογία παραπόνων για χαμηλή πίεση	(Αριθμός παραπόνων για χαμηλή πίεση / συνολικός αριθμός παραπόνων)*100	(F27/F15)*100	%
QS38	Παράπονα σχετικά με χαμηλή πίεση ανά υδρόμετρο	Αριθμός παραπόνων για χαμηλή πίεση / Αριθμός υδρομέτρων	F16/E6	
QS39	Βαθμός ικανοποίησης των καταναλωτών	(ικανοποιημένοι πελάτες / συνολικός εξυπηρετούμενος πληθυσμός)*100	(F24/F1)*100	%
QS40	Βαθμός ικανοποίησης για το νερό βρύσης	(ικανοποιημένοι πελάτες που πίνουν νερό βρύσης / συνολικός εξυπηρετούμενος πληθυσμός)*100	(F25/F1)*100	%
QS41	Βαθμός ικανοποίησης για τη γεύση του νερού	(πελάτες που επηρεάζονται από τη γεύση και τη χλωρίωση του νερού / συνολικός εξυπηρετούμενος πληθυσμός)*100	(F26/F1)*100	%
QS42	Βαθμός εκτίμησης των υπαλλήλων σχετικά με την ικανοποίηση των πελατών	(Αριθμός υπαλλήλων που θεωρούν ότι οι πελάτες είναι ικανοποιημένοι / συνολικός αριθμός υπαλλήλων)*100	(F28/B1)*100	%

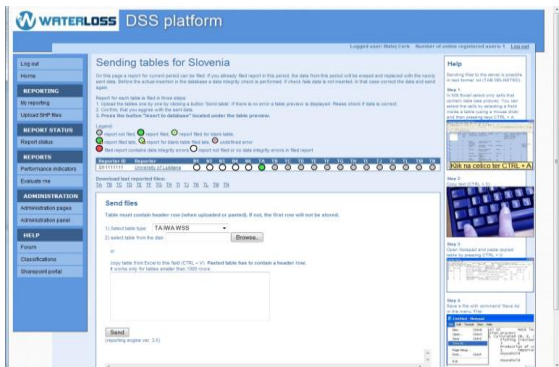
Αυτοί οι δείκτες στοχεύουν στην αξιολόγηση και παρακολούθησης της απόδοσης του δικτύου με βάση τις απώλειες νερού, το μη ανταποδοτικό νερό, τις αιτίες που προκαλούν τις απώλειες, καθώς επίσης περιβαλλοντικά θέματα και θέματα που έχουν σχέση με τον καταναλωτή. Για τον υπολογισμό των 42 νέων δεικτών απόδοσης απαιτείται η μέτρηση τουλάχιστον 39 νέων μεταβλητών (Πίνακας 4).

Πίνακας 4. Οι νέες μεταβλητές

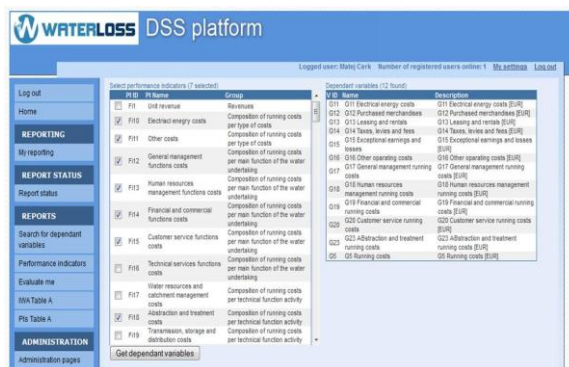
Μεταβλητή		Μονάδες	Μεταβλητή		Μονάδες		
1	A25	Διαφορά Παγίου (MCD)	m3	1	D71	Συνολικός αριθμός επισκευών που πραγματοποιήθηκαν	no.
1	A26	Λογιστικό NRW	m3	1	D72	Ανθρακικό αποτύπωμα που παράχθηκε στην διαδικασία παροχής νερού	tons of CO2
1-i	A27(a-i)	Απόληψη νερού από τον ίδιο υδατικό πόρο	m3	1	D73	Πραγματική ενέργεια που διαχέεται στις απώλειες τριβής	KWh
1	C26	Αριθμός δεξαμενών οροφής	no.	1	D74	Αξία των απωλειών τριβής σε ένα δίκτυο χωρίς διαρροές	KWh
1	C27	Μέσο ύψος κτιρίων	m	1	D75	Ενέργεια που μεταφέρεται στους χρήστες	KWh
1	C28	Οικιακοί υδρομετρητές ηλικίας μικρότερης από 5 χρόνια	no.	1	D76	Ελάχιστη απαιτούμενη χρήσιμη ενέργεια	KWh
1	C29	Οικιακοί υδρομετρητές ηλικίας από 5 έως 10 χρόνια	no.	1	D77	Ενέργεια που φεύγει μέσω των διαρροών	KWh
1	C30	Όγκος δεξαμενών οροφής	m3	1	D78	Εισερχόμενη ενέργεια που παρέχεται από τις δεξαμενές	KWh
1	C31	Συνολικός αριθμός συσκευών	no.	1-i	D79(a-i)	Αριθμός αστοχιών των αγωγών του ίδιου υλικού	no.
1-i	C32(a-i)	Μήκος αγωγών ίδιου υλικού	Km	1-i	D80(a-i)	Αριθμός του ίδιου τύπου αστοχιών στους αγωγούς και τις συνδέσεις	no.
1-i	C33(a-i)	Μήκος αγωγών ίδιας διαμέτρου	Km	1	E12	Οικιακή κατανάλωση	m3
1-i	C34(a-i)	Μήκος αγωγών ίδιου υλικού και ίδιας διαμέτρου	Km	1	E13	Εμπορική κατανάλωση	m3
1-i	C35(a-i)	Μήκος αγωγών ίδιας ηλικίας	Km	1-i	E14(a-i)	Χρήση νερού (οικιακή, εμπορική, βιομηχανική)	m3
1-i	C36(a-i)	Συντελεστής τραχύτητας		1	F24	Αριθμός ικανοποιημένων πελατών	no.
1	C37	Οικιακοί υδρομετρητές ηλικίας μεγαλύτερης από 10 χρόνια	no.	1	F25	Αριθμός ικανοποιημένων πελατών που πίνουν νερό βρύσης	no.
1	D66	Ελάχιστη πίεση λειτουργίας	m	1	F26	Αριθμός πελατών που επηρεάζονται από τη γεύση και χλωρίωση του πόσιμου νερού	no.
1	D67	Μέγιστη πίεση λειτουργίας	m	1	F27	Αριθμός παραπόνων σχετικών με χαμηλή πίεση	no.
1	D68	Χρησιμοποιούμενη ενέργεια	KWh	1	F28	Αριθμός των υπαλλήλων που θεωρούν ότι οι πελάτες είναι ικανοποιημένοι	no.
1	D69	Μετρητές παροχής που αντικαταστάθηκαν	no.	1	G59	Κόστος για την διασφάλιση παροχής νερού	€
1	D70	Χρόνος απόκρισης για επισκευή γεγονότων διαρροών	ώρες				

2.4. ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΛΗΨΗΣ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

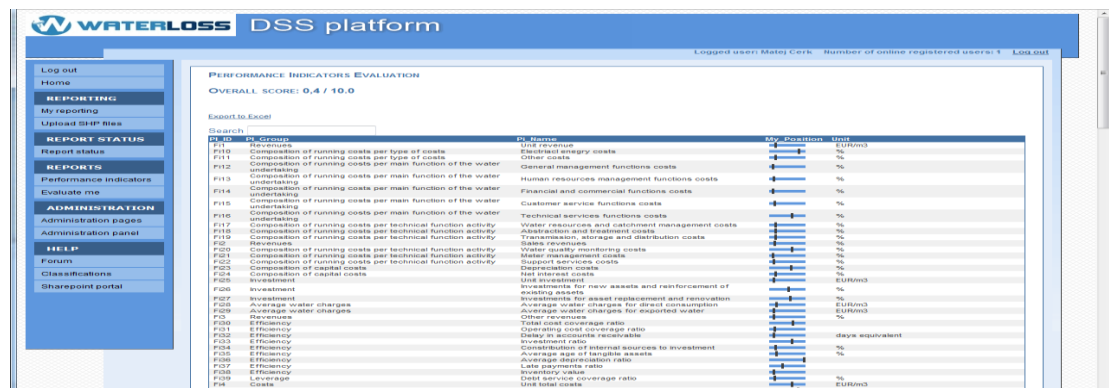
Ο τελικός στόχος είναι η ανάπτυξη ενός φιλικού προς τον χρήστη συστήματος υποστήριξης λήψης αποφάσεων το οποίο αναπτύσσεται για την αντιμετώπιση του μη ανταποδοτικού νερού προτείνοντας στρατηγικές μείωσης του μη ανταποδοτικού νερού για συστήματα διανομής νερού με επίκεντρο της περιοχή της Μεσογείου (Σχήμα 2).



Σχήμα 2: Το Σύστημα Υποστήριξης Λήψης Αποφάσεων



Σχήμα 3: Η εξάρτηση των δεικτών απόδοσης από τις μεταβλητές



Σχήμα 4: Διαδικασία Αξιολόγησης

Το σύστημα υποστήριξης λήψης αποφάσεων θα χρησιμοποιηθεί για την ταξινόμηση και αξιολόγηση μεθόδων ελέγχου του μη ανταποδοτικού νερού εισάγοντας συντελεστές βαρύτητας των δεικτών απόδοσης. Τα συστατικά στοιχεία του συστήματος υποστήριξης λήψης αποφάσεων είναι:

1. Μία λεπτομερής βάση δεδομένων που περιλαμβάνει όλες τις μεταβλητές και τους δείκτες απόδοσης που υφίστανται και έχουν αναπτυχθεί. Το εργαλείο θα αξιολογεί την απόδοση του δικτύου ύδρευσης και θα το κατατάσσει σύμφωνα με την απόδοσή του.
2. Μία δυναμική βάση δεδομένων δεικτών απόδοσης δικτύων ύδρευσης με συντελεστές βαρύτητας που λαμβάνουν υπόψη τα τοπικά χαρακτηριστικά της υπό μελέτη περιοχής. Το δίκτυο ύδρευσης θα αξιολογείται πλήρως όσον αφορά τις απώλειες νερού και το μη ανταποδοτικό νερό (Σχήμα 3).
3. Ένα φιλικό προς τον χρήστη εργαλείο (WB/PI Calc-UTH) για την αξιολόγηση του υδατικού ισοζυγίου και των δεικτών απόδοσης, σχεδιασμένο ώστε να χρησιμοποιεί την 2^η τροποποίηση του υδατικού ισοζυγίου της IWA (Σχήμα 4).
4. Μία δυναμική βάση δεδομένων συμβατικών και νέων μεθόδων για τον έλεγχο του μη ανταποδοτικού νερού, περιλαμβανομένης ανάλυσης κόστους οφέλους που βασίζεται στην εκτίμηση του επιπέδου των Οικονομικά Πραγματικών Απωλειών (Economic Annual Real Losses – EARL). Οι Οικονομικά Πραγματικές απώλειες

είναι οι απώλειες του δικτύου τις οποίες μπορεί τεχνικά και συμφέρει οικονομικά η εταιρεία να ανακτήσει.

5. Το σύστημα υποστήριξης λήψης αποφάσεων θα είναι δυναμικό δίνοντας την ευκαιρία στις εταιρείες ύδρευσης να ελέγξουν αν ο στόχος του μη ανταποδοτικού νερού έχει επιτευχθεί και να επαναξιολογήσουν μεθόδους επίτευξης νέων στόχων.

Τελικά το σύστημα υποστήριξης λήψης αποφάσεων θα καθορίζει τις περισσότερο οικονομικά αποδοτικές μεθόδους ελέγχου του μη ανταποδοτικού νερού λαμβάνοντας υπόψη και την περιβαλλοντική επίδραση. Το σύστημα θα επικυρωθεί και θα επαναρυθμιστεί μετά την εφαρμογή του σε δίκτυα ύδρευσης διαφορετικών περιοχών που λειτουργούν κάτω από διαφορετικές συνθήκες έτσι ώστε να εξεταστούν οι στρατηγικές μείωσης των απωλειών νερού.

Ο βασικός στόχος του συστήματος υποστήριξης αποφάσεων υπό ανάπτυξη είναι να προσδιορίσει, να συλλέξει και να αξιολογήσει μεθόδους και διαδικασίες για την παρακολούθηση και τον έλεγχο του μη ανταποδοτικού νερού. Οι εταιρείες ύδρευσης θέτουν τους δικούς τους στόχους όσον αφορά το μη ανταποδοτικό νερό. Οι μέθοδοι μείωσης του μη ανταποδοτικού νερού θα επιλεγούν με βάση έναν κατάλογο δράσεων προτεραιότητας με βάση τον στόχο του μη ανταποδοτικού νερού και την επίτευξή του με οικονομικά αποδοτικές μεθόδους. Οι προδιαγραφές του συστήματος υποστήριξης λήψης αποφάσεων περιλαμβάνουν: 1) την εκτίμηση του 2^{ου} τροποποιημένου υδατικού ισοζυγίου και των δεικτών απόδοσης σε ετήσια, 6μηνιαία, 4μηνιαία κλπ. βάση, 2) την παρακολούθηση ιστορικών στοιχείων, 3) την επιλογή των περισσότερο κατάλληλων δεικτών απόδοσης για την αντιμετώπιση του σωστού προβλήματος, 4) την ταξινόμηση και την προτεραιοποίηση των δεικτών απόδοσης, 5) μία σειρά από κρίσιμους δείκτες απόδοσης και την χρήση συντελεστών βαρύτητας, 6) την αξιολόγηση των δικτύων ύδρευσης με βάση την σειρά των κρίσιμων δεικτών απόδοσης, 7) τα μέτρα μείωσης του μη ανταποδοτικού νερού (εξαρτώμενα από τις αιτίες), 8) τη ρουτίνα υπολογισμού του κόστους των μέτρων μείωσης του μη ανταποδοτικού νερού, 9) τη σύνδεση των μέτρων με τις τιμές των δεικτών απόδοσης, που έχει σαν αποτέλεσμα προτεινόμενες δράσεις με την χρήση συγκριτικής αξιολόγησης, και 10) τη δυναμική παρακολούθηση και αξιολόγηση (Ex-ante, on-going, Ex-post).

Πίνακας 5. Οι πιλοτικές περιοχές και τα χαρακτηριστικά τους

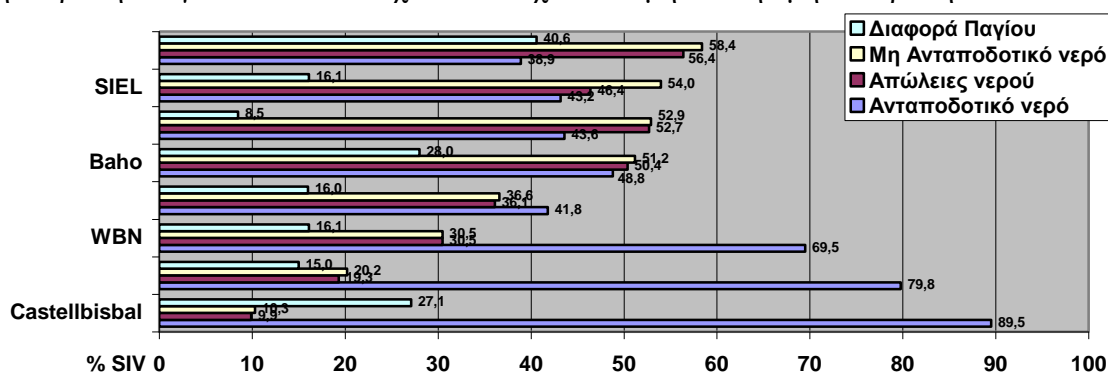
Πιλοτική περιοχή	Πληθυσμός	Αριθμός συνδέσεων	Περιοχή (Km ²)	Μήκος αγωγών (Km)	Μέσο υψόμετρο (m)	Μέση πίεση (atm)
Baho (FR)	7.041	1.300	7,9	16,73	50	2,96
Argeles-sur-mer (FR)	10.082/χειμώνα; 110.000/καλοκαίρι	6.581	58,7	135,77	15	2,96
Thuir (FR)	7.519	3.257	19,9	66,70	180	3,00
Λευκωσία (CY) / DMA 15 & 20	23.000/8.800	4.150/2.789	7.84/0.84	75,0/20,3	130/140	5,1/2,4
Castellbisbal (ES)	12.223	3.531	31,0	143,00	132	5,50
Κοζάνη (EL)	35.942	9.150	7,99	129,58	750	3-5
Melito di Napoli (IT)	34.500	11.700	3,7	95,00	93	1,5-2
SIEL (FR)	8.003	3.663	5,71	110	100-390	3.5

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

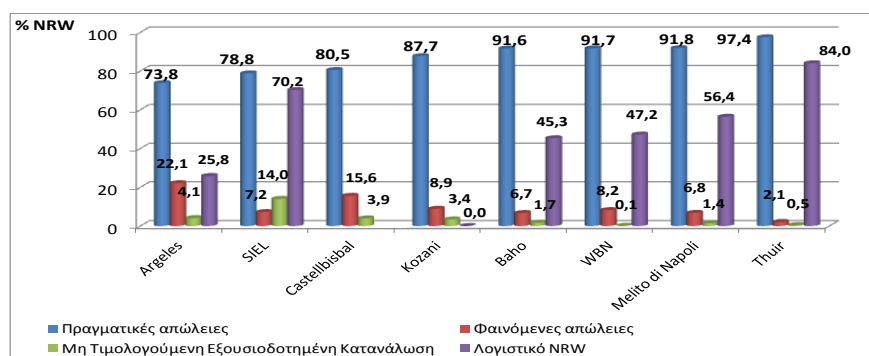
Το πρώτο στάδιο της εφαρμογής της ολοκληρωμένης μεθοδολογίας μείωσης του μη ανταποδοτικού νερού αφορά στην αξιολόγηση των δικτύων ύδρευσης των πιλοτικών περιοχών που επέλεξαν οι εταίροι του έργου WATERLOSS. Οκτώ πιλοτικές περιοχές επιλέχθηκαν και παρουσιάζονται στον Πίνακα 5 με τα βασικά χαρακτηριστικά τους.

Το βασικότερο πρόβλημα που εντόπισαν οι εταίροι σχετικά με την λειτουργία των δικτύων τους είναι το μεγάλο μη ανταποδοτικό νερό και οι απώλειες του νερού που

οφείλονται κυρίως σε παλαιά δίκτυα που παρουσιάζουν αστοχίες, παράνομες συνδέσεις, αστοχίες των μετρητών και ανυπαρξία πολιτικών συντήρησης. Έγινε υπολογισμός του 2^{ου} τροποποιημένου υδατικού ισοζυγίου για τα οκτώ πιλοτικά δίκτυα ύδρευσης για το 2010 σε ετήσια βάση και για κάποια που είχαν τα στοιχεία σε 6μηνιαία ή 4μηνιαία βάση.



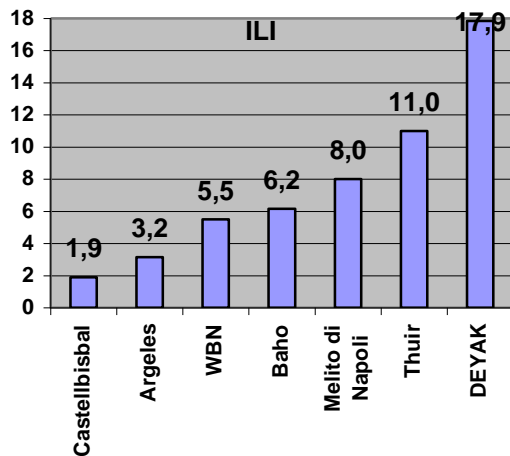
Σχήμα 5: Τα βασικά συστατικά του Υδατικού Ισοζυγίου για τις πιλοτικές περιοχές



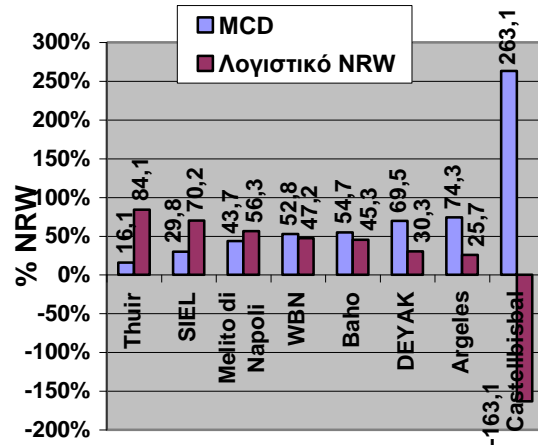
Σχήμα 6: Τα βασικά συστατικά του Μη Ανταποδοτικού Νερού για τις πιλοτικές περιοχές

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι στα περισσότερα πολιτικά δίκτυα το μη ανταποδοτικό νερό παίρνει υψηλές τιμές και η βασική αιτία είναι οι διαρροές και οι θραύσεις. Στο σχήμα 5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης του 2^{ου} τροποποιημένου υδατικού ισοζυγίου για τις οκτώ πιλοτικές περιοχές. Το μη ανταποδοτικό νερό σαν ποσοστό του εισερχόμενου νερού παίρνει τιμές από 10,3% (Castellbisbal) μέχρι 58,4% (Κοζάνη). Τις χαμηλότερες τιμές τις έχουν τα δίκτυα του Castellbisbal και του Argeles. Το 1^ο αναφέρεται σε περιοχή με βιομηχανική κατανάλωση 70% και το 2^ο σε δίκτυο στο οποίο η εταιρεία ύδρευσης εφαρμόζει πολιτικές μείωσης των απωλειών νερού. Στο σχήμα 6 παρουσιάζονται τα βασικά συστατικά του μη ανταποδοτικού νερού σαν ποσοστό αυτού. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το βασικό συστατικό του μη ανταποδοτικού νερού είναι οι πραγματικές απώλειες που κυμαίνονται από 73,8% (Argeles) μέχρι 97,4% (Thuir). Το συμπέρασμα αυτό επιβεβαιώνεται από τον δείκτη ΠΙ που δείχνει το μέγεθος των πραγματικών απωλειών σε σχέση με τις ελάχιστες τεχνικά επιτεύξιμες απώλειες (Σχήμα 7). Οι τιμές του ΠΙ κυμαίνονται από 1,9 (Castellbisbal) μέχρι 17,9 (Κοζάνη). Αυτό σημαίνει ότι το βασικότερο πρόβλημα είναι οι πραγματικές απώλειες και πρέπει να αντιμετωπιστεί. Τα αποτελέσματα επίσης έδειξαν ότι η Διαφορά Παγίου (Minimum Charge Difference – MCD) είναι κοινό χαρακτηριστικό όλων των πιλοτικών περιοχών. Στο Σχήμα 8 παρουσιάζεται η διαφορά παγίου (MCD) και το λογιστικό Μη Ανταποδοτικό Νερό σαν ποσοστά του Μη Ανταποδοτικού νερού. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η διαφορά παγίου αποτελεί από το

16,1% (Thuir) μέχρι και το 263,1% (Castellbisbal) του Μη Ανταποδοτικού Νερού. Στην περίπτωση του Castellbisbal, η διαφορά παγίου είναι πολλαπλάσια του μη ανταποδοτικού νερού, που σημαίνει ότι η εταιρεία ύδρευσης μέσω της διαφοράς παγίου επιτυγχάνει ανάκτηση των απωλειών νερού. Αυτή η συνήθης πρακτική αποτελεί δικαιολογία για τους διαχειριστές των δικτύων ύδρευσης ώστε να μην λαμβάνουν μέτρα μείωσης του Μη Ανταποδοτικού Νερού.



Σχήμα 7: Οι τιμές του ILI



Σχήμα 8: Η Διαφορά Παγίου (MCD) και το Λογιστικό NRW σαν ποσοστά του NRW

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει μία ολοκληρωμένη προσέγγιση για την αντιμετώπιση του προβλήματος του μη ανταποδοτικού νερού, που αποτελεί μεγάλο πρόβλημα για τις εταιρείες παροχής νερού παγκόσμια, αλλά περισσότερο σε περιοχές που πλήττονται από συνθήκες λειψυδρίας και πρόκειται να πληγούν και από την κλιματική αλλαγή, όπως η Μεσόγειος. Είναι γνωστό ότι τα τοπικά χαρακτηριστικά επηρεάζουν την γνωστή μεθοδολογία της IWA για την εκτίμηση του επιπέδου λειτουργίας των δικτύων ύδρευσης. Είναι επίσης γνωστό ότι η διαθεσιμότητα και η αξιοπιστία των στοιχείων που απαιτούνται για την εφαρμογή αυτής της μεθοδολογίας είναι κρίσιμο στοιχείο. Έτσι η ανάγκη για μία ολοκληρωμένη προσέγγιση είναι προφανής.

Μία τέτοια ολοκληρωμένη προσέγγιση αναπτύσσεται στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού προγράμματος WATERLOSS, το οποίο έχει σαν τελικό στόχο την ανάπτυξη ενός συστήματος υποστήριξης λήψης αποφάσεων, που να προτείνει προτεραιοποιημένα μέτρα και στρατηγικές μείωσης του μη ανταποδοτικού νερού με βάση και οικονομικά στοιχεία. Το πρώτο βήμα είναι η αξιολόγηση του δικτύου μέσα από το υδατικό ισοζύγιο και συγκεκριμένα την 2^η τροποποίηση του υδατικού ισοζυγίου της IWA που εφαρμόζεται στην περιοχή της Μεσογείου. Για την αξιολόγηση των δικτύων και την παρακολούθηση των αποτελεσμάτων των διαφόρων μέτρων, χρησιμοποιούνται δείκτες απόδοσης τόσο υπάρχοντες όσο και νέοι που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια του προγράμματος. Το πρώτο στάδιο του προγράμματος που ολοκληρώθηκε κατέδειξε ότι το μη ανταποδοτικό νερό λαμβάνει υψηλές τιμές στα πιλοτικά δίκτυα, κάτι που είναι κοινό για τα δίκτυα ύδρευσης της περιοχής της Μεσογείου. Τα αποτελέσματα επίσης έδειξαν ότι βασική αιτία για τις υψηλές τιμές του μη ανταποδοτικού νερού αποτελούν οι πραγματικές απώλειες, δηλαδή οι διαρροές και οι θραύσεις των αγωγών στα δίκτυα ύδρευσης. Κοινό σημείο επίσης υπήρξε η έλλειψη στοιχείων από την πλευρά των εταιρειών ύδρευσης. Το τελικό σύστημα υποστήριξης λήψης απόφασης θα ενσωματώνει τα εξής: (α) μία βάση δεδομένων δεικτών απόδοσης συμπεριλαμβανομένων υπάρχοντων και νέων. Αυτό το σύστημα θα

ενσωματώσει επίσης συντελεστές βαρύτητας ώστε να αναδειχθεί η σημαντικότητα συγκεκριμένων δεικτών απόδοσης. (β) μία σειρά στρατηγικών μείωσης του μη ανταποδοτικού νερού και μία σειρά στόχων για τον έλεγχο του μη ανταποδοτικού νερού. Το τελικό αποτέλεσμα θα είναι μία προτεινόμενη σειρά στρατηγικών μείωσης του μη ανταποδοτικού νερού που η εταιρεία ύδρευσης θα μπορεί να εφαρμόσει και να ελέγξει τα αποτελέσματα. Ανάλυση κόστους οφέλους θα πραγματοποιείται για την επιλογή των στρατηγικών που είναι περισσότερο οικονομικά αποδοτικές.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εργασία εντάσσεται στα πλαίσια υλοποίησης του συγχρηματοδοτούμενου από το ΕΤΠΑ έργου MED: WATERLOSS-“Διαχείριση των απωλειών νερού σε δίκτυα ύδρευσης” (Project 2G-MED09-445 - www.waterloss-project.eu).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Alegre, H., Hirner, W., Baptista, J.M., and Parena, R., 2000. *Performance Indicators for Water Supply Services*. 1st ed. IWA, London
- Alegre, H., Baptista, J.M., Cabrera, E. Jr., Cubillo, F., Duarte, P., Hirner, W., Merkel, W. and Parena, R., 2006. *Performance Indicators for Water Supply Services*. Second Edition, IWA publishing, UK
- Guibentif, H., Rufenacht, H.P., Rapillard, P. and Ruetschi, M., 2007. *Acceptable Level of Water Losses in Geneva*. In: Int. Conf. WaterLoss2007, IWA, 23-26 September 2007, Bucharest, Romania 1, pp.138-147.
- Kanakoudis, V. and Tolikas, D., 2001. *The role of leaks and breaks in water networks - Technical and economical solutions*. Journal of Water Supply: Research & Technology-AQUA, 50(5):301-311.
- Kanakoudis V., 2004. *A troubleshooting manual for handling operational problems in water pipe networks*. Journal of Water Supply: Research & Technology-AQUA, IWA, 53(2):109-124.
- Kanakoudis, V. and Tsitsifli, S., 2010. *Water volume vs. revenues oriented water balance calculation for urban water networks: the “Minimum Charge Difference” component makes a difference!* E-Proc. International Conference “Water Loss”, IWA, Sao Paulo, Brazil, 6-9 June.
- Kolbl, J., Theuretzbacher-Fritz, H., Neunteufel, R., Perfler, R., and Krendelsberger, R., 2006. *Benchmarking in the Austrian Water Supply Sector: Objectives, Development, Structure and First Results of the 2004 Project*. Water and Environmental Management Series, 12, pp.197-204.
- Lambert, A., Brown, T.G., Takizawa, M. and Weimer, D., 1999. *Review of Performance Indicators for Real Losses from Water Supply Systems*. Journal of Water Supply: Research & Technology-AQUA, 48:227-237.
- Liemberger, R., Brothers, K., Lambert, A., McKenzie, R., Rizzo, A. and Waldron, T., 2007. *Water Loss Performance Indicators*. Proc. Water Loss Conference 2007, Bucharest, Romania. Vol.1:148-160.
- McKenzie, R., Seago, C. and Liemberger, R., 2007. *Benchmarking of Losses from potable water reticulation systems-Results from IWA Task Team*. Proc. Water Loss Conference 2007, Bucharest, Romania. vol.1:161-175.
- Paracampos, F. and Thornton, J., 2002. *SABESP’s (Sao Paulo Water and Sanitation Company) experience in applying the IWA water loss indicators-a field experience*. In: Int. Conf. Leakage Management 2002, IWA, Lemesos, Cyprus, 1, pp.143-157.

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΒΑΣΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΕΙΦΟΡΙΚΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΛΕΚΑΝΩΝ – ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΑΛΦΕΙΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ

Χρηστίνα Ν. Πασαπόρτη, Παναγιώτης Χρ. Γιαννόπουλος

Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, 265 04 Πάτρα
τηλ.: 6973990724 e-mail: xristina_pasa@yahoo.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στα πλαίσια μεταπτυχιακής έρευνας σχετικά με την προστασία και την αειφορική διαχείριση των υδατικών πόρων πραγματοποιήθηκαν εργασίες για την υποβοήθηση των διαδικασιών διαχείρισης με τη χρήση τεχνολογικών εργαλείων και Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών. Ειδικότερα, δημιουργήθηκε μια βάση περιβαλλοντικών δεδομένων με χρήση του ελεύθερου λογισμικού PostgreSQL / PostGIS κατόπιν παρατήρησης της λεκάνης απορροής του Αλφειού και παράλληλης χαρτογραφικής απεικόνισης των δεδομένων με χρήση του QuantumGIS. Τελικώς, επιδιώκεται ο υπολογισμός των ρυπαντικών φορτίων αζώτου (N), φωσφόρου (P) και οργανικών ενώσεων, που επηρεάζουν την ποιότητα του ύδατος του ποταμού, μέσω της εκτέλεσης πολύπλοκων και σύνθετων ερωτημάτων επί των δεδομένων με χρήση της Γλώσσας Δομικής Αναζήτησης (SQL). Η δομή της βάσης δύναται να χρησιμοποιηθεί στη δημιουργία βάσεων για άλλες υδρολογικές λεκάνες.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: διαχείριση υδατικών πόρων, λεκάνη απορροής ποταμού, Αλφειός ποταμός, χωρικές βάσεις δεδομένων, λογισμικό ανοιχτού κώδικα, PostgreSQL, PostGIS, QuantumGIS, γλώσσα SQL

DEVELOPMENT OF AN ENVIRONMENTAL DATABASE FOR WATERSHED SUSTAINABLE MANAGEMENT – ALFEIOS RIVER CASE-STUDY

Christine N. Passaporti, Panayotis C. Yannopoulos

Department of Civil Engineering, University of Patras, 265 04 Patras
tel.: 6973990724 e-mail: xristina_pasa@yahoo.gr

ABSTRACT

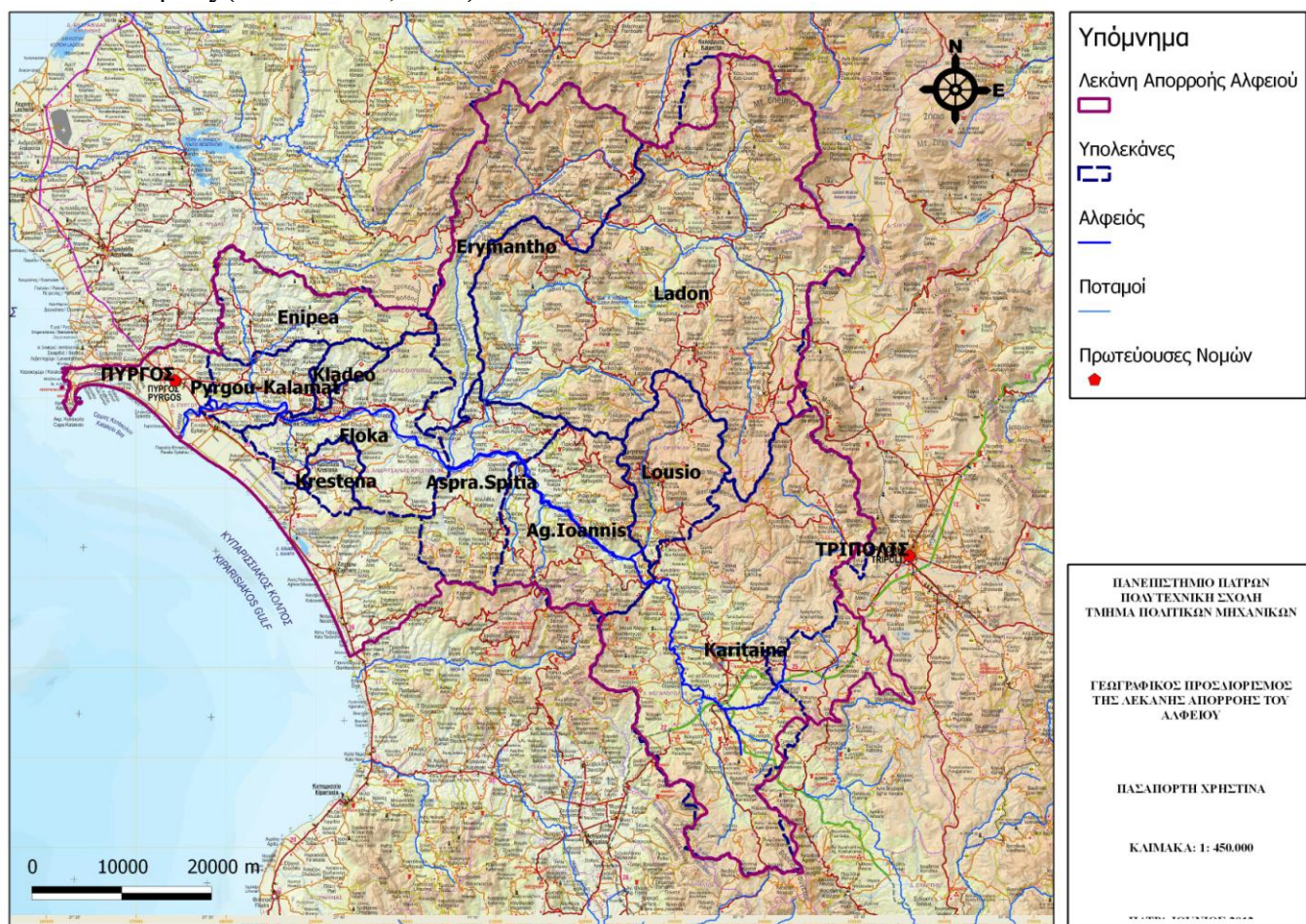
In the frame of a post graduate research regarding the protection of the sustainable management of water resources, work has been carried out to aid the management procedures with the use of technological tools and Geographical Information Systems. In fact, an environmental database was created using the free PostgreSQL / PostGIS software through the observation of the Alfeios River basin, while at the same time mapping the data using the QuantumGIS free software. Finally it is aimed the calculation of the pollution loads of nitrogen (N), phosphorus (P) and organic compounds, which affect the river water quality, through complicated and complex queries on the data using the Structured Query Language (SQL). The database structure can be used to databases for other watersheds as well.

KEYWORDS: Water Resource Management, River Basin, Alfeios River, Spatial databases, open source software, PostgreSQL, PostGIS, QuantumGIS, language SQL

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η συγκέντρωση και αύξηση του πληθυσμού στα μεγάλα αστικά κέντρα, η ανύψωση του βιοτικού επιπέδου, καθώς και η ανάπτυξη νέων δραστηριοτήτων έχουν οδηγήσει στη συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση νερού κατάλληλης για κάθε χρήση ποιότητας. Ωστόσο, η συνεχής υποβάθμιση της ποιότητας των υπαρχόντων υδατικών πόρων, σε συνδυασμό με την παγκόσμια ανάγκη για τη διατήρηση της οικολογικής ισορροπίας και την αειφορική χρήση των φυσικών πόρων, προκαλούν σημαντικά και πολυδιάστατα προβλήματα στην ανάπτυξη της κάθε περιοχής.

Εστιάζοντας στον ελληνικό χώρο, διαπιστώνεται ότι οι ποταμοί της χώρας αποτελούν έναν από τους πιο σημαντικούς υδατικούς πόρους, τόσο λόγω της σημαντικότητάς τους για τη διατήρηση του φυσικού περιβάλλοντος και την ποιότητα ζωής του ανθρώπου, όσο και εξαιτίας της επιβάρυνσης που δέχονται από την ανάπτυξη διαφόρων τομεακών οικονομικών δραστηριοτήτων που συνηθίζεται να χωροθετούνται κοντά σε αυτούς. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιου υδατικού πόρου αποτελεί και ο Αλφειός Ποταμός (Χάρτης 1), ο οποίος επελέγη εξαιτίας της αξιολόγησής του ως ο μεγαλύτερος σε μήκος (περίπου 115 km) και παροχή (ετήσιο δυναμικό $2100 \times 10^6 \text{ m}^3$ ύδατος) ποταμός της Πελοποννήσου (Γιαννόπουλος & Μαναριώτης, 2005, 2006) και ο πέμπτος σε εθνικό επίπεδο από τους ποταμούς που ρέουν εν συνόλω επί ελληνικού εδάφους (Υ.Π.Ε.Κ.Α., 2011).



Χάρτης 1. Γεωγραφικός Προσδιορισμός της λεκάνης Απορροής του Αλφειού

Σύμφωνα με εκτιμήσεις για το έτος 2011, περίπου το 28% της συνολικής ζήτησης νερού στην περιοχή μελέτης χρησιμοποιείται για την άρδευση των οργανωμένων καλλιεργειών, το 9% για την κάλυψη αναγκών ύδρευσης του πληθυσμού και των

βιομηχανικών αναγκών εξίσου και το 1% της ζήτησης αντιπροσωπεύει την κτηνοτροφία (Υ.Π.Ε.Κ.Α., 2011). Οι βασικότεροι λόγοι ρύπανσης του ποταμού είναι η γεωργία, η βιομηχανία, η μεταλλευτική δραστηριότητα (εξόρυξη λιγνίτη), ο τουρισμός και η αστικοποίηση της περιοχής (Manariotis, 2004, Υ.Π.Ε.Κ.Α., 2011). Οι δραστηριότητες αυτές επηρεάζουν είτε άμεσα, είτε έμμεσα την ποιότητα του νερού του Αλφειού και των παραποτάμων του, αλλά και τις συνθήκες του γύρω οικοσυστήματος που εξαρτάται και τροφοδοτείται από αυτούς (Manariotis, 2004).

Η παρούσα εργασία εστιάζει στη δημιουργία μιας Χωρικής Βάσης Δεδομένων (ΧΒΔ), η οποία θα περιλαμβάνει κάθε περιβαλλοντική πληροφορία που αναφέρεται στη λεκάνη απορροής του Αλφειού Ποταμού, καθώς και τις κατηγορίες των πηγών ρύπανσης που επηρεάζουν αρνητικά την ποιότητα των υδάτων του. Παράλληλα, επιδιώχθηκε η άμεση σύνδεση της βάσης δεδομένων με κατάλληλο Σύστημα Γεωγραφικής Πληροφορίας (ΣΓΠ), ώστε να είναι εφικτή η οπτικοποίηση των δεδομένων επιτρέποντας την επέμβαση, μετατροπή, εισαγωγή και τροποποίηση των περιεχομένων της ΧΒΔ εντός του δικού τους γραφικού περιβάλλοντος (Κόλιος, 2009). Προκειμένου να επιτευχθεί η δημιουργία μιας άρτιας και αποτελεσματικής βάσης δεδομένων ακολουθήθηκαν τα εξής στάδια επεξεργασίας: συλλογή δεδομένων και κατανόηση απαιτήσεων, εννοιολογικός σχεδιασμός, επιλογή των εργαλείων διαχείρισης, λογικός σχεδιασμός της βάσης δεδομένων και υλοποίηση.

2. ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΤΗΣ ΧΩΡΙΚΗΣ ΒΑΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

2.1. ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Η ανάγκη δημιουργίας, διαχείρισης και αποθήκευσης διακριτών χωρικών δεδομένων σε διάφορους τομείς («real estate», περιβαλλοντικές και δημογραφικές μελέτες κ.α.) οδήγησε στην ανάπτυξη τόσο των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (Geographical Information Systems, ΣΓΠ), όσο και των ΧΒΔ (Spatial Databases, Geodatabases) που μπορούν να υποστηρίξουν τα ΣΓΠ (Κόλιος, 2009).

Οι ΧΒΔ αποτελούν εργαλεία που περιλαμβάνουν πληθώρα λογισμικών, μία επέκταση χωρικών λειτουργιών που εξειδικεύεται στην αποθήκευση γεωμετρικών πληροφοριών και εκτέλεση γεωμετρικών υπολογισμών και ένα λογισμικό οπτικοποίησης (Κόλιος, 2009). Παράλληλα, η ύπαρξη του Συστήματος Διαχείρισης Βάσεων Δεδομένων (ΣΔΒΔ) παρέχει τη δυνατότητα υποστήριξης χωρικών τύπων όπως σημεία, γραμμές και πολύγωνα / επιφάνειες (Φρέντζος, 2010). Ορισμένα από τα βασικότερα πλεονεκτήματα των ΧΒΔ είναι (Κόλιος, 2009 και Φρέντζος, 2010):

- Η δυνατότητα αποτελεσματικής διαχείρισης μεγάλου όγκου δεδομένων.
- Η ταυτόχρονη διάθεση των δεδομένων σε περισσότερους από ένα χρήστες.
- Η δυνατότητα εύκολης εκτέλεσης πολύπλοκων ερωτημάτων με τη χρήση της γλώσσας SQL.
- Η υποστήριξη διαφόρων συστημάτων προβολής και μετασχηματισμούς μεταξύ τους.
- Η υποστήριξη χωρικών τελεστών, ευρετηρίων και συναρτήσεων.

Πιο συγκεκριμένα, η ΧΒΔ της λεκάνης απορροής του Αλφειού Ποταμού επιλέχθηκε να δημιουργηθεί με τη χρήση του ΣΔΒΔ PostgreSQL/ pgAdmin III, του λογισμικού PostGIS που αποτελεί την επέκταση των γεωγραφικών λειτουργιών της βάσης δεδομένων και του Quantum GIS ως εργαλείου παρουσίασης των γεωγραφικών δεδομένων. Τα συγκριτικά πλεονεκτήματα των συγκεκριμένων λογισμικών που συνέβαλαν στην επιλογή τους δίνονται αναλυτικά παρακάτω.

2.2. ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΒΑΣΕΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Η PostgreSQL αποτελεί ένα σύστημα διαχείρισης βάσεων δεδομένων και αποτελεί ένα ελεύθερο και ανοιχτού κώδικα σχεσιακό λογισμικό, το οποίο προσφέρει ισχυρή υποστήριξη συγκεκριμένων τύπων γεωγραφικών δεδομένων και μεγάλης κλίμακας εφαρμογές (Κόλιος, 2009 και Φρέντζος, 2010). Παράλληλα, παρέχει τη δυνατότητα λειτουργίας της σε Windows (95/98/ME/NT/2000/XP), Linux (RedHat /Mandrake /Suse) και MacOS X (Φρέντζος, 2010, <http://www.pgadmin.org>). Ακόμη, διαθέτει τη δική της γλώσσα προγραμματισμού PL/pgSQL για τη σύνταξη ερωτημάτων, η οποία και υποστηρίζεται από τις περισσότερες βάσεις δεδομένων, ενώ είναι δυνατό να προγραμματίσει και σε άλλες λιγότερο περιορισμένες γλώσσες όπως οι προγραμματιστικές γλώσσες C και C++, Java, Python κ.α. Ένα ακόμη πλεονέκτημα του συγκεκριμένου συστήματος διαχείρισης είναι το γεγονός ότι παρέχει ορισμένες βασικές χωρικές λειτουργίες με τη χρησιμοποίηση ειδικών τύπων δεδομένων για την αποθήκευση απλών γεωμετρικών οντοτήτων, ενώ συγχρόνως υποστηρίζει περιορισμένο αριθμό γεωμετρικών τελεστών και συναρτήσεων για τη διατύπωση χωρικών ερωτημάτων (Φρέντζος, 2010).

Ταυτόχρονα με το ΣΔΒΔ PostgreSQL, εγκαθίσταται και το λογισμικό pgAdmin III, το οποίο αποτελεί το εργαλείο αλληλεπίδρασης της βάσης δεδομένων με το χρήστη. Το συγκεκριμένο λογισμικό είναι προγραμματισμένο σε C++ και είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί σε περιβάλλοντα Linux, FreeBSD, Solaris, Mac OSX και Windows για τη διαχείριση της PostgreSQL. Κυρίαρχο πλεονέκτημα του pgAdmin III είναι ότι προσφέρει ένα απλό γραφικό περιβάλλον για την ανάπτυξη πολύπλοκων βάσεων δεδομένων μέσω της διατύπωσης ερωτημάτων σε SQL, με στόχο την απλούστευση των διαδικασιών για το χρήστη (<http://www.pgadmin.org>).

2.3. ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΩΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΩΝ

Η PostGIS αποτελεί σημαντικό εργαλείο, καθώς προσδίδει στη βάση δεδομένων PostgreSQL χωρικές δυνατότητες επεξεργασίας (Βουδούρης, 2011 και Κόλιος, 2009). Πιο συγκεκριμένα, το λογισμικό αυτό επιτρέπει τη χρήση ειδικών τελεστών (area, distance, length, perimeter, χωρικές λειτουργίες union, difference, buffers κ.α.) για τη σύνταξη χωρικών ερωτημάτων και χωρικών συναρτήσεων, ενώ υποστηρίζει ποικίλους τύπους στοιχείων όπως σημεία (points), γραμμές (linestrings), πολύγωνα (polygons), πολυσημεία (multipoints), πολυγραμμές (multilinestrings) και πολύ-πολύγωνα (multipolygons) και σημαντικό αριθμό συστημάτων συντεταγμένων (Πίνακας 1) (Βουδούρης, 2011 και Φρέντζος, 2010).

Τέλος, κρίνεται αναγκαίο να αναφερθεί ότι η PostGIS έχει διαμορφωθεί κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να ελαχιστοποιεί την ανάγκη αυτής σε ισχύ και μνήμη, καθώς επιτρέπεται η διατήρηση μεγάλου όγκου δεδομένων από την φυσική μνήμη του υπολογιστή (RAM) και προσφέρει τη δυνατότητα εκτέλεσης ερωτημάτων με πιο γρήγορο τρόπο (Κόλιος, 2009).

Πίνακας 1. Συστήματα Συντεταγμένων που υποστηρίζει η PostGIS

Σύστημα Συντεταγμένων	Τύπος	Μονάδες Μέτρησης	SRID
Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς 1987 (ΕΓΣΑ87)	Προβολικό	Μέτρα	2100
UTM Ζώνη 34 επί του WGS84	Προβολικό	Μέτρα	32634
UTM Ζώνη 35 επί του WGS84	Προβολικό	Μέτρα	32635
WGS84	Γεωγραφικό	Μοίρες	4326
Mercator Spheric	Γεωγραφικό	Μέτρα	900913

Πηγή: Φρέντζος (2010)

2.4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗΣ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Το Quantum GIS εμφανίστηκε για πρώτη φορά το 2002 και αποτελεί μία ελεύθερη και ανοιχτού κώδικα εφαρμογή, ενώ επιτρέπει την δημιουργία, ανάλυση, τροποποίηση και κυρίως οπτικοποίηση των δεδομένων της βάσης που περιλαμβάνουν χωρικά στοιχεία (Κόλιος, 2009 και Φρέντζος, 2010). Ορισμένα από τα κυριότερα πλεονεκτήματα του συγκεκριμένου λογισμικού είναι (Κόλιος, 2009):

- Η συμβατότητα του με λειτουργικά συστήματα Linux, Unix, Windows και Macintosh.
- Η μετάφραση αυτού σε 14 γλώσσες συμπεριλαμβανομένων και των Ελληνικών.
- Η ανανέωση του ανά τακτά χρονικά διαστήματα με νέες εκδόσεις, η οποία αποσκοπεί στην κατά το δυνατό καλύτερη ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων του.
- Απαιτεί μικρότερη υπολογιστική δύναμη σε σχέση με τα λοιπά εμπορικά ΣΓΠ, με αποτέλεσμα να είναι δυνατή η χρήση του παράλληλα με άλλες εφαρμογές.

Ακόμη, αξίζει να σημειωθεί ότι οι ομοιότητες μεταξύ του περιβάλλοντος λειτουργίας του Quantum GIS και του ArcGIS καθιστούν ευκολότερη την εκμάθηση και χρήση του στην περίπτωση που ο χρήστης έχει ασχοληθεί στο παρελθόν με ΣΓΠ. Τέλος, η δυνατότητα εισαγωγής και απεικόνισης δεδομένων από το Quantum GIS στη PostgreSQL/PostGIS, σε συνδυασμό με τη δυνατότητα υποστήριξης αρχείων shapefiles και τη συμβατότητα του με τη διαδικτυακή εφαρμογή χωρικών δεδομένων MapServer καθιστούν το πρόγραμμα ιδιαίτερα αξιόπιστο (Κόλιος, 2009).

3. ΕΦΑΡΜΟΓΗ – ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

Κατά την έναρξη της διαδικασίας εφαρμογής συγκεντρώθηκαν όλα τα απαραίτητα δεδομένα που κρίνεται αναγκαίο να περιληφθούν στη βάση δεδομένων, ώστε να εξαχθούν τα τελικά αποτελέσματα για τις τιμές φωσφόρου και αζώτου που καταλήγουν στον Αλφειό. Έτσι, συλλέχθηκαν πληροφορίες για τις πηγές ρύπανσης, τις χρήσεις γης γύρω από το ποτάμι, τα διοικητικά επίπεδα και τα δημογραφικά στοιχεία, τις παροχές του ποταμού και των παραποτάμων του κ.α.. Ταυτόχρονα πραγματοποιήθηκε διαχωρισμός της λεκάνης απορροής σε επιμέρους υπολεκάνες για μεθοδικότερη διαχείριση της πληροφορίας και την εξαγωγή εγκυρότερων χωρικά και υδρολογικά αποτελεσμάτων.

Στη συνέχεια, ορισμένα από τα ανωτέρω στοιχεία (όρια των υπολεκάνων, όρια των διοικητικών επιπέδων, η ροή του Αλφειού Ποταμού και των παραποτάμων του) που ήταν διαθέσιμα σε μορφή αρχείων «shapefile» γεωαναφέρθηκαν με τη χρήση του ArcGIS σε ένα ενιαίο σύστημα γεωγραφικής αναφοράς (ΕΓΣΑ'87). Ακολούθως, μέσω

κατάλληλης επέκτασης που περιλαμβάνει το πρόγραμμα QuantumGIS, η οποία επιτρέπει την εισαγωγή δεδομένων της μορφής «.shp» στη χωρική βάση δεδομένων PostgreSQL/PostGIS, τα στοιχεία αυτά εισήχθησαν στη βάση δεδομένων του Αλφειού με τη μορφή πινάκων και διατηρώντας τη γεωγραφική πληροφορία τους. Τα αρχεία «*.shp» (shapefiles) είναι ένας δημοφιλής φορέας γεωχωρικών δεδομένων, δηλαδή επιτρέπουν την ψηφιακή αποθήκευση της γεωγραφικής θέσης αντικειμένων, αλλά και λοιπών σχετικών πληροφοριών. Η μορφή αυτή εισήχθη για πρώτη φορά από την ESRI με την έκδοση ArcView GIS 2 στις αρχές της δεκαετίας του 1990 και είναι δυνατό να περιγράψει χωρικά γεωμετρίες όπως σημεία (points), πολύγωνα (polygons) και γραμμές (polylines) (<http://el.wikipedia.org/wiki/SQL>).

Στους πίνακες, που δημιουργήθηκαν στη βάση κατ' αυτόν τον τρόπο, συμπληρώθηκαν δεδομένα για το μόνιμο και τον εποχικό πληθυσμό της περιοχής μελέτης έως την τελευταία απογραφή του 2011. Ακολούθως, πραγματοποιήθηκαν μέσω των απαραίτητων εντολών οι συνδέσεις και οι συσχετίσεις μεταξύ αυτών. Παράλληλα, αξιοποιώντας την αμφίδρομη σύνδεση που παρέχουν τα δύο αυτά προγράμματα, οι παραπάνω ολοκληρωμένοι πίνακες εισήχθησαν και οπτικοποιήθηκαν στο QuantumGIS (Χάρτη 1) έχοντας τη δυνατότητα να υιοθετούν αυτόματα τις συσχετίσεις μεταξύ τους, καθώς και τυχόν αλλαγές που πραγματοποιούνται στη βάση.

Ακολούθως, δημιουργήθηκαν στο περιβάλλον του PostgreSQL/PostGIS, με την κατάλληλη χρήση της γλώσσα SQL και των εντολών που προσφέρει, το σχήμα (schema) και οι πίνακες (tables) που περιλαμβάνουν τις πληροφορίες για τις πηγές ρύπανσης που βρίσκονται εντός της περιοχής μελέτης και ενδέχεται να επηρεάζουν αρνητικά την ποιότητα του ποταμού. Οι πηγές ρύπανσης επιλέχθηκε να διακριθούν ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους, τα ρυπαντικά φορτία που προκύπτουν από αυτές και την έκταση που επηρεάζουν σε δύο βασικές κατηγορίες: τις εκτατικές και τις σημειακές. Παραδειγματικά δίνεται η ακόλουθη εντολή που ορίστηκε με στόχο του πίνακα των σημειακών πηγών και η οποία αποτελεί μια από τις πιο πολύπλοκες που χρησιμοποιήθηκαν για τη βάση δεδομένων του Αλφειού:

```
CREATE TABLE phges_rypanshs.simeiakphges
( onoma character varying(70),
  thl character varying(40),
  dhmot_diameter_id integer,
  eidoss_phghs_id integer,
  leitourgei integer,
  the_geom geometry,
  "IDsim" serial NOT NULL DEFAULT,
  CONSTRAINT enforce_dims_the_geom CHECK (st_ndims(the_geom) = 2),
  nextval('phges_rypanshs.simeiakphges_ID_seq'::regclass),
  id_basinsalf integer,
  CONSTRAINT enforce_geotype_the_geom CHECK (geometrytype(the_geom) =
'POINT'::text OR the_geom IS NULL),
  CONSTRAINT enforce_srid_the_geom CHECK (st_srid(the_geom) = 2100),
  CONSTRAINT simeiakphges_valid_check CHECK (isvalid(the_geom))
  CONSTRAINT idsim_pkey PRIMARY KEY ("IDsim"),
  CONSTRAINT foreign_eidos_pigis FOREIGN KEY (eidoss_phghs_id)
  REFERENCES phges_rypanshs."EIDOS_PHGHS_RYPANSHS" ("ID") MATCH
  FULL ON UPDATE NO ACTION ON DELETE NO ACTION,
  CONSTRAINT foreign_idalfbasins FOREIGN KEY (id_basinsalf) REFERENCES
  xrhseis_ghs."Alfeios_Basins_poly" (gid) MATCH FULL
```

```

ON UPDATE NO ACTION ON DELETE NO ACTION DEFERRABLE
INITIALLY IMMEDIATE,
CONSTRAINT foreign_ota FOREIGN KEY (dhmot_diameter_id) REFERENCES
"OTA_PERIOX_MEL" (gid) MATCH FULL
ON UPDATE NO ACTION ON DELETE NO ACTION )
WITH ( OIDS=FALSE);
ALTER TABLE phges_rypanshs.simeiakas_phges OWNER TO postgres;

CREATE INDEX simeiakas_idx ON phges_rypanshs.simeiakas_phges USING gist
(the_geom);

```

Στην πρώτη γραμμή της εντολής δίνεται το όνομα του πίνακα σχέσης που πρόκειται να δημιουργηθεί. Στην επόμενη γραμμή προσδιορίζονται τα γνωρίσματα ονομασίας κάθε πηγής με αλφαριθμητική μορφή μεταβλητού μεγέθους, δηλαδή πρόκειται να περιλαμβάνει χαρακτήρες με μέγεθος εισόδου 70. Στη τρίτη γραμμή δίνεται ο τηλεφωνικός αριθμός της κάθε πηγής με αλφαριθμητική μορφή μεταβλητού μεγέθους και μέγεθος χαρακτήρων 40. Στη τέταρτη και πέμπτη γραμμή προσδιορίζονται οι ταυτότητες (id) κάθε στοιχείου και αναφέρονται στους πίνακες των δημοτικών διαμερισμάτων και του είδους πηγής ρύπανσης ως «integer». Στην έκτη γραμμή δίνεται το γνώρισμα λειτουργίας κάθε πηγής σε δυαδική μορφή 0 (δεν λειτουργεί) και 1 (λειτουργεί). Στην έβδομη γραμμή προσδιορίζεται ο αύξων αριθμός της σημειακής πηγής ως ακέραιος, ενώ ο τύπος δεδομένων με το γνώρισμα «serial» αναθέτει στη βάση την εισαγωγή του επόμενου ακέραιου αριθμού. Το γνώρισμα αυτό έχει τον περιορισμό μη προσθήκης μηδενικών τιμών.

Ακολούθως, γίνεται αναφορά στην γεωμετρία των στοιχείων και δίνονται το είδος της γεωμετρίας των στοιχείων ως σημεία (POINTS), ενώ δίνεται και ο κωδικός του γεωδαιτικού συστήματος αναφοράς στον οποίο βρίσκονται τα δεδομένα και είναι ο 2100 για το ΕΓΣΑ '87. Στη συνέχεια, με τη βοήθεια της εντολής «constraint» προστίθενται το πρωτεύον κλειδί (primary key) και τα ξένα κλειδιά (foreign keys) του πίνακα, όπως αυτό που αναφέρεται (references) στο πρωτεύον κλειδί του πίνακα του είδους πηγής ρύπανσης. Τέλος, κλείνοντας η εντολή «create» δημιουργείται ένας χωρικός δείκτης γενικευμένου δέντρου αναζήτησης για των πίνακα σημειακών πηγών με την εντολή «create index». Εδώ προσδιορίζονται το σχήμα και το όνομα του πίνακα (phges_rypanshs.simeiakas_phges), το είδος του δείκτη (gist) και το όνομα του πεδίου γεωμετρίας (the_geom).

Πιο αναλυτικά, για να επιτευχθεί η αποτελεσματικά ομαδοποιημένη καταχώρηση των στοιχείων, δημιουργήθηκαν οι εξής πίνακες:

- Πίνακας «EIDOS_PHGHS_RYPANSHS». Περιλαμβάνει τα είδη των πηγών ρύπανσης που εμφανίζονται στην περιοχή και γίνεται μια διάκριση αυτών σε σημειακές ή μη.
- Πίνακας «prwtes_yles». Περιλαμβάνει τις πρώτες ύλες κάθε δραστηριότητας και προγραμματίζεται κατά τέτοιο τρόπο, ώστε για κάθε νέα εισαγωγή να ελέγχει αν αυτή ανήκει στον πίνακα «EIDOS_PHGHS_RYPANSHS». Ο σχεδιασμός του συγκεκριμένου πίνακα επιτρέπει την καταχώρηση περισσότερων της μιας πρώτων υλών για κάθε πηγή ρύπανσης.
- Πίνακας «proionta». Περιλαμβάνει τα προϊόντα κάθε πρώτης ύλης, καθώς και τους συντελεστές παραγωγής προϊόντων, παραγωγής και σύνθεσης (BOD₅, P, N) των αποβλήτων. Οι παραπάνω συντελεστές είναι χρήσιμοι για τον υπολογισμό των ποσοτήτων των προϊόντων και των αποβλήτων κάθε δραστηριότητας και αναφέρονται σε κάθε μήνα του έτους.

- Πίνακας «*ektatikes_phges*». Περιλαμβάνει όλες τις πηγές ρύπανσης, οι οποίες επηρεάζουν σημαντική έκταση εντός της περιοχής μελέτης (καλλιέργειες, κτηνοτροφία κ.α.). Τα στοιχεία συνδέονται με τον πίνακα των υπολεκανών, ενώ ταυτόχρονα δίνονται στοιχεία για τη λειτουργία και την ιδιοκτησία. Ακόμη, καταχωρούνται και οι συντεταγμένες αυτών σε ΕΓΣΑ '87, η οποίες εισάγονται με τη μορφή σημείων (X,Y). Τέλος, προκειμένου να γίνει δεκτή μία νέα εισαγωγή το πρόγραμμα θα πρέπει να ελέγχει αν αυτή υπάρχει στον Πίνακα «*EIDOS_PHGHS_RYPANSHS*» και αν η γεωγραφική της θέση είναι εντός κάποιας υπολεκάνης.
- Πίνακας «*simeiakies_phges*». Περιλαμβάνει τις πηγές ρύπανσης, των οποίων οι επιπτώσεις περιορίζονται σε μικρή έκταση και χωρικά αποδίδονται σημειακά (βιομηχανίες, μεταποιητικές μονάδες κ.α.). Ο πίνακας αυτός διαμορφώνεται όπως αναφέρθηκε αναλυτικά ανωτέρω.
- Πίνακας «*systhma_epeksergasias*». Περιλαμβάνει δεδομένα για το σύστημα επεξεργασίας που χρησιμοποιεί κάθε μία οντότητα του Πίνακα «*ektatikes_phges*» και του Πίνακα «*simeiakies_phges*», καθώς και πληροφορίες για τον τρόπο διάθεσης των αποβλήτων μετά την επεξεργασία. Παράλληλα, ανάλογα το είδος επεξεργασίας δίνονται και οι συντελεστές μείωσης των αρχικών τιμών των BOD₅, P και N, ώστε να είναι δυνατός ο υπολογισμός στη συνέχεια των εναπομενουσών ποσοτήτων των στοιχείων αυτών εντός του αποδέκτη. Τέλος, στον πίνακα προστίθενται και τα χωρικά στοιχεία κάθε αντικειμένου, με στόχο να είναι εφικτή η απόδοσή του σε χαρτογραφικό υπόβαθρο.
- Πίνακας «*paragogh_phghs*». Ο συγκεκριμένος πίνακας αποτελεί και το τελικό τμήμα της εργασίας, καθώς σε αυτόν πραγματοποιείται ο υπολογισμός των τελικών τιμών των BOD₅, P και N. Αυτό είναι εφικτό με την δημιουργία της παρακάτω εντολής εκτέλεσης λειτουργίας (function), η οποία ενεργοποιείται με τη βοήθεια σκανδάλης (trigger) για κάθε νέα εισαγωγή στον πίνακα.

```

create function update_after_insert() returns opaque as '
begin
update phges_rypanshs.paragwgh_phghs
set posothta_bod=posothta_prwths_ylhs*syntelesths_bod
from phges_rypanshs.proionta
where paragwgh_phghs.proion_id=proionta.idproi;
update phges_rypanshs.paragwgh_phghs
set posothta_n=posothta_prwths_ylhs*syntelesths_n
from phges_rypanshs.proionta
where paragwgh_phghs.proion_id=proionta.idproi;
update phges_rypanshs.paragwgh_phghs
set posothta_p=syntelesths_p*posothta_prwths_ylhs
from phges_rypanshs.proionta
where paragwgh_phghs.proion_id=proionta.idproi;
return new;
end;
'language 'plpgsql';

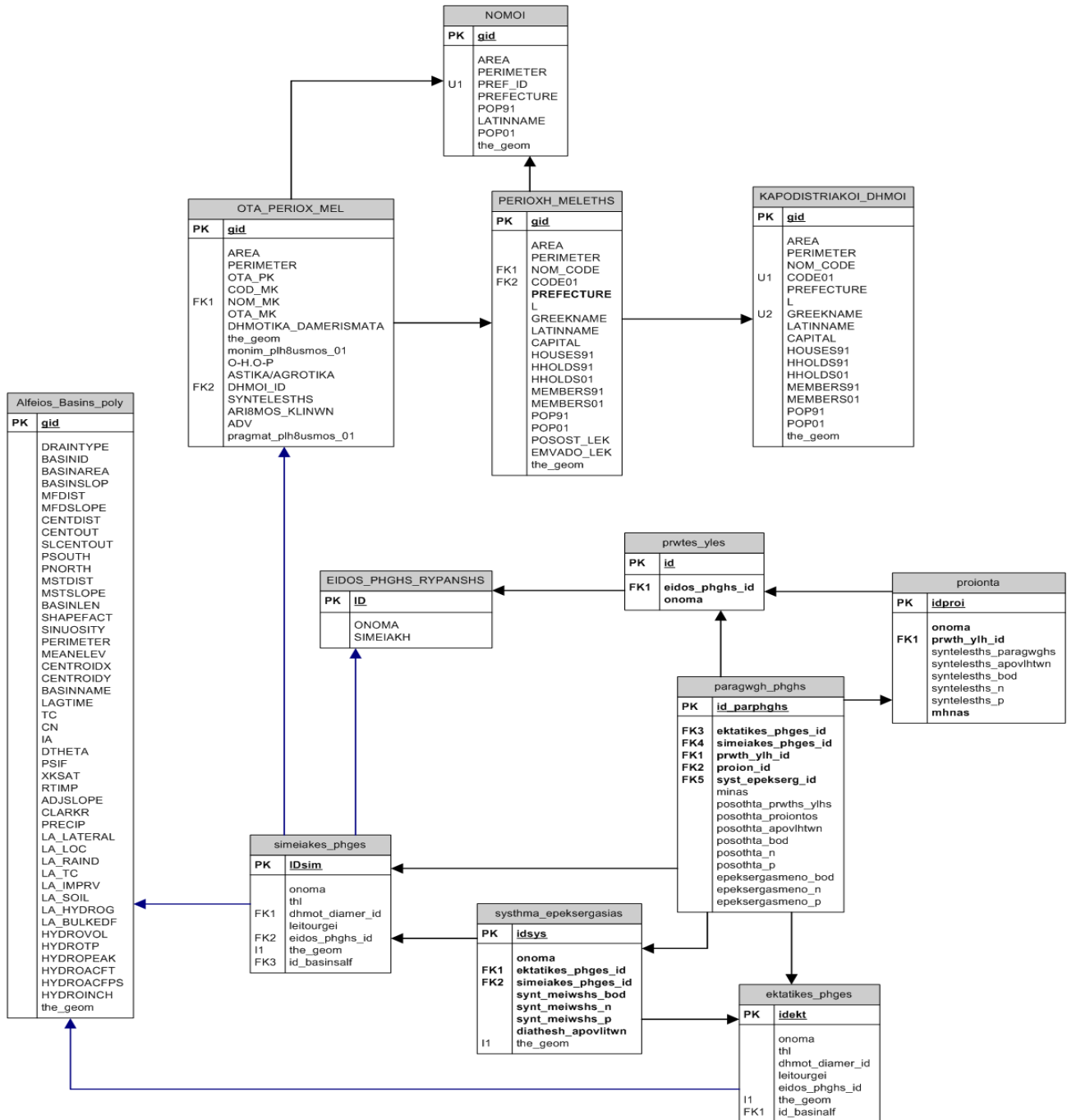
```

```

create trigger update_after_insert after insert
on phges_rypanshs.paragwgh_phghs
for each row
execute procedure update_after_insert();

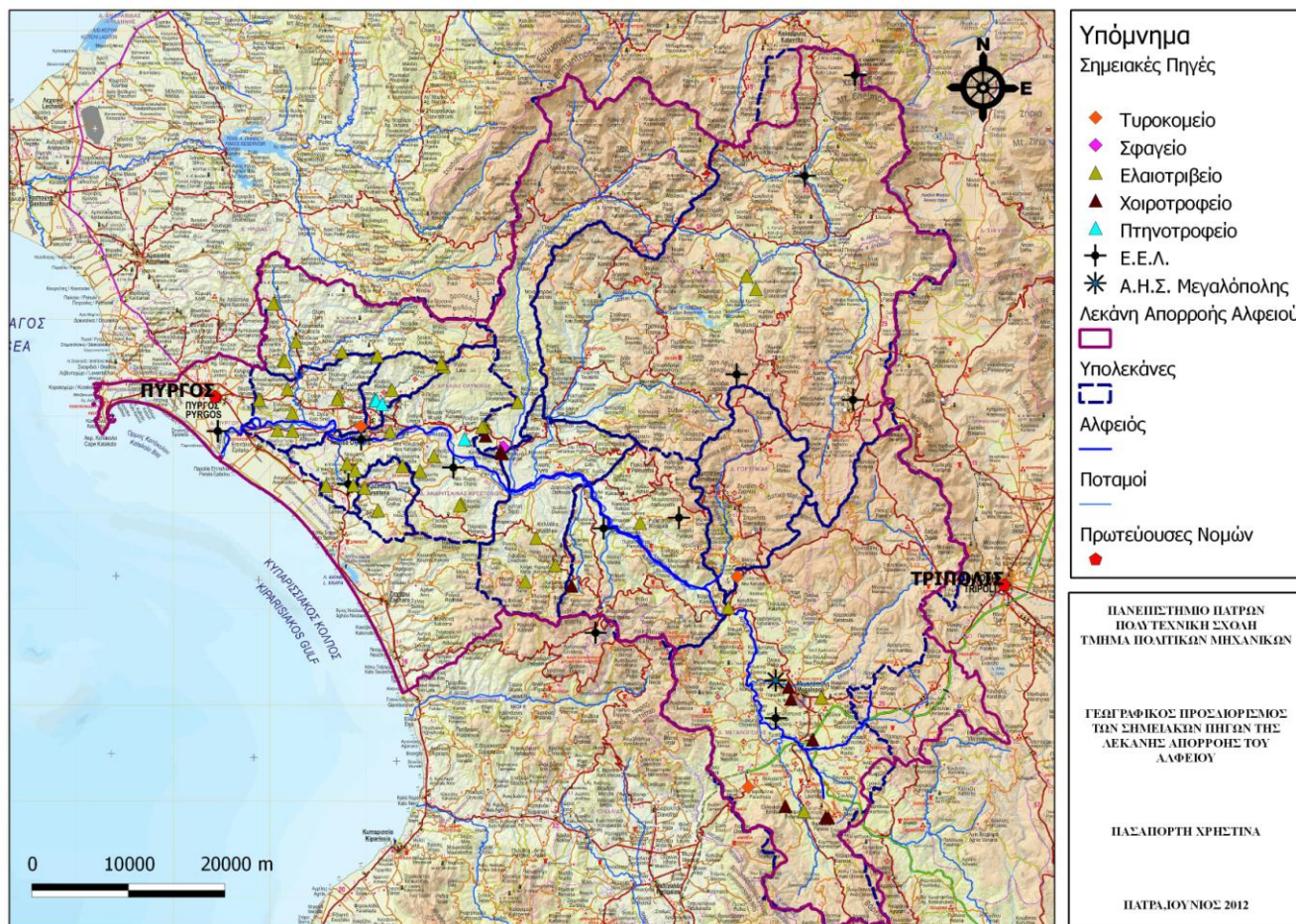
```

Στο Σχήμα 1 δίνονται οι αλληλεξαρτήσεις όλων των πινάκων της βάσης δεδομένων που δημιουργήθηκε για τη λεκάνη απορροής του Αλφειού Ποταμού. Παράλληλα, αποτυπώνονται τα πρωτεύοντα (primary keys) και ξένα (foreign keys) κλειδιά που έχουν οριστεί σε κάθε πίνακα, τα οποία βοηθούν στη δημιουργία των μεταξύ τους συνδέσεων.



Σχήμα 1. Διαγραμματική απεικόνιση της βάσης δεδομένων.

Τέλος, οι πληροφορίες των πινάκων που αναφέρονται στις πηγές ρύπανσης και οι οποίοι δημιουργήθηκαν στο περιβάλλον της PostgreSQL είναι δυνατό να μεταφερθούν στο χαρτογραφικό υπόβαθρο που δημιουργήθηκε σε προηγούμενο στάδιο και να αποδοθούν χωρικά όπως φαίνεται στο Χάρτη 2.



Χάρτης 2. Αποτύπωση των σημειακών πηγών ρύπανσης στην περιοχή μελέτης.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Όπως διαπιστώνεται από τα ανωτέρω, η ενσωμάτωση της τεχνολογίας των Χωρικών Βάσεων Δεδομένων και των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών στη διαχείριση των υδατικών πόρων αναδεικνύει τις ευκολίες που μπορεί να προσφέρει στους φορείς διαχείρισης. Η δημιουργία βάσεων δεδομένων περιορίζει τον όγκο των δεδομένων και απλοποιεί κατά πολύ τη διαδικασία εύρεσης αυτών, καθώς είναι εφικτό να προστεθεί σε αυτή οποιαδήποτε σχετική πληροφορία με το αντικείμενο μελέτης.

Παράλληλα, για υδατικά συστήματα, όπως η λεκάνη απορροής του Αλφειού, των οποίων η αρμοδιότητα προστασίας κατανέμεται σε παραπάνω από ένα διοικητικούς φορείς, η δημιουργία μιας βάσης δεδομένων επιτρέπει την άμεση πρόσβαση, τροποποίηση και προσθήκη στοιχείων από καθεμία από τις αρμόδιες υπηρεσίες. Ακόμη, με τη χρήση των τεχνολογιών των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών παρέχεται η δυνατότητα διαχείρισης της χωρικής πληροφορίας και χωρικής αναπαράστασης όλων των παραγόντων που συμβάλλουν στην υποβάθμιση τόσο της ποιότητας των υδάτων, όσο και του φυσικού περιβάλλοντος της περιοχής μελέτης, με αποτέλεσμα την ταχύτερη και βέλτιστη λήψη αποφάσεων.

Επιπρόσθετα, η εισαγωγή χωρικής πληροφορίας στη βάση δεδομένων, καθώς και η δυνατότητα διατύπωσης χωρικών ερωτημάτων προσφέρει το πλεονέκτημα της εξειδικευμένης αναζήτησης και ταυτόχρονης αποτύπωσης του αντικειμένου στην περιοχή. Με τη χρήση των συστημάτων της γεωπληροφορικής (π.χ. GPS) είναι δυνατό να προστίθεται στη βάση δεδομένων κάθε καινούργια δραστηριότητα που εμφανίζεται

στη περιοχή γνωρίζοντας τις συντεταγμένες αυτής. Συμπερασματικά, μέσα από τη συγκεκριμένη εργασία διαπιστώθηκε η αποτελεσματικότητα με την οποία αποδίδουν και αποτυπώνουν οι Χωρικές Βάσεις Δεδομένων την κατάσταση που επικρατεί σε μια λεκάνη απορροής συγκεντρώνοντας σε ένα πρόγραμμα κάθε πληροφορία γύρω από αυτήν.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- <http://www.ypeka.gr/Default.aspx?tabid=246&language=el-GR> (προσβάσιμο 11/02/2012).
- Manariotis I. and Yannopoulos P., 2004. *Adverse Effects on Alfeios River Basin and an Integrated Management Framework Based on Sustainability*, Environmental Management, Vol. 34, No. 2, pp. 261–269, Patra, Greece.
- Βουδούρης Π., 2011. *Δουλεύοντας Με Τη PostGIS (και το QGIS) – Tutorial*, 1η Συνάντηση GRASS και GFOSS, Συνάντηση GRASS και GFOSS, Αργαλαστή Πηλίου.
- Γιαννόπουλος Π. και Μαναριώτης Ι., 2005. *Επιπτώσεις στην Υδρομορφολογία του Αλφειού Ποταμού από Έργα Υποδομής και Αμμοχαλικοληψίες*, Πρακτικά 5ου Εθνικού Συνεδρίου Ελληνικής Επιτροπής Διαχείρισης Υδατικών Πόρων (ΕΕΔΥΠ) «Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Πόρων με Βάση τη Λεκάνη Απορροής», Σελ. 275-281, Ξάνθη.
- Γιαννόπουλος Π. και Μαναριώτης Ι., 2006. *Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις και Προτεινόμενα Μέτρα Προστασίας και Αποκατάστασης Ποταμού Αλφειού στα Πλαίσια Βιώσιμης Ανάπτυξης της Περιοχής*, Παρουσίαση στην Ημερίδα “Τα Ιαματικά Λουτρά και ο Άνθρωπος, ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ – ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΑ”, Λουτρά Ηραίας.
- Κόλλιος Ν., 2009. *Χωρική Βάση Δεδομένων PostgreSQL/PostGIS και Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών QuantumGIS*, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο – Τμήμα Γεωγραφίας, Αθήνα (www.dbnet.ece.ntua.gr/~stefanak/gdbs/postgis_qgis_gr.pdf) (προσβάσιμο 17/09/2011).
- Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής (Υ.Π.Ε.Κ.Α.), 2011. *Λεκάνη Απορροής Ποταμού Αλφειού (GR29) – Υποστηρικτικό Κείμενο της Έκθεσης Επισκόπησης (Υπό Μορφή Προσχεδίου Διαχείρισης)*, Ειδική Γραμματεία Υδάτων, Διαβούλευση Σχεδίων Διαχείρισης Υδατικών Πόρων.
- Φρέντζος Η., 2010. *Εισαγωγή στη PostgreSQL-PostGIS*, Πανεπιστήμιο Πειραιώς – Τμήμα Πληροφορικής, Πειραιάς (infolab.cs.unipi.gr/pre-eclass/courses/gis/lab/Lab-PostGIS-doc.pdf) (προσβάσιμο 19/09/2011).

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΣΧΕΤΙΚΗΣ ΣΗΜΑΣΙΑΣ ΤΩΝ ΒΑΣΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΩΝ ΚΛΕΙΣΤΩΝ ΥΠΟ ΠΙΕΣΗ ΔΙΚΤΥΩΝ ΥΔΡΕΥΣΗΣ – ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΙΣΧΥΟΥΣΩΝ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Σταύρος Γιαννόπουλος^{1*}, Μαρία Σπανοθύμνιου^{1**}, Μιχάλης Σπηλιώτης^{2***}

¹Α.Π.Θ., Τμήμα Α.Τ.Μ., Τομέας Σ.Υ.Ε., 54124 Θεσσαλονίκη.

²Ε.Μ.Π., Σχολή Α.Τ.Μ., Κ.Ε.Φ.Κ. & Π.Σ., Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 15780 Αθήνα

e-mails: *giann@vergina.eng.auth.gr **maria-topo@hotmail.com

***m.spiliotis@gmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η περίπτωση του σχεδιασμού και της προσομοίωσης της ροής ενός δικτύου ύδρευσης διπλής εισόδου, το οποίο λειτουργεί με βαρύτητα και βρίσκεται στη φάση της μελέτης, οπότε δεν υφίστανται μετρήσεις παροχών και πιέσεων σε συγκεκριμένες θέσεις του δικτύου και συνεπώς, δεν μπορεί να γίνει ρύθμιση των παραμέτρων αυτού και επαλήθευσή του. Γίνεται ανάλυση ευαισθησίας των βασικών παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση του δικτύου (συντελεστής τραχύτητας και ζήτηση του νερού) και έλεγχος των ενδεχόμενων επιπτώσεων, που παρουσιάζονται στη λειτουργία αυτού. Τέλος, αναλύονται και σχολιάζονται οι ισχύουσες στην Ελλάδα τεχνικές προδιαγραφές εκπόνησης μελετών δικτύων ύδρευσης, επισημαίνονται οι αδυναμίες τους και γίνονται προτάσεις για τη βελτίωση τους.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Μοντέλο δικτύου διανομής, ζήτηση νερού, συντελεστής τραχύτητας, ανάλυση ευαισθησίας, τεχνικές προδιαγραφές.

EVALUATION OF THE RELATIVE IMPORTANCE OF THE BASIC PARAMETERS OF WATER DISTRIBUTION NETWORKS – INVESTIGATION OF TECHNICAL SPECIFICATIONS IN GREECE

Stavros Yannopoulos^{1*}, Maria Spanothymniou^{1**}, Mike Spiliotis^{2***}

¹A.U.Th., School of Rural and Surveying Engineering, Dept. of Transportation and Hydraulic Engineering, GR - 54124 Thessaloniki, Greece.

²N.T.U.A., Faculty of Rural and Surveying Engineering, CANaH, 9 Iroon Polytechniou Str., GR-15773 Zografou, Athens, Greece:

e-mails: *giann@vergina.eng.auth.gr **maria-topo@hotmail.com

***m.spiliotis@gmail.com

ABSTRACT

In this study the case of design and simulation of the flow in a water distribution network of multi-input sources is examined, which operates by gravity and is at the phase of the design, thus lacking measurements of the nodal pressure heads and pipe discharges and consequently no calibration of its parameters may be applied, nor may it be verified. A sensitivity analysis on the basic parameters (roughness coefficient and water demand) applied in the simulation of the network and examination of potential impacts, which can be presented during its operation. Finally, the current technical specifications in Greece on water supply projects are analyzed and commented, and recommendations for their improvement are suggested.

KEY WORDS: Water distribution model, water demand, roughness coefficient, sensitivity analysis, technical specifications.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ένα ολοκληρωμένο μοντέλο δικτύου ύδρευσης μπορεί να αποτελέσει χρήσιμο εργαλείο στην προσομοίωση της λειτουργίας αυτού για διάφορες πιθανές καταστάσεις (σενάρια), οι οποίες μπορούν να εμφανιστούν κατά τη διάρκεια του χρήσιμου (οικονομικού) χρόνου ζωής του. Κατά τις τελευταίες δεκαετίες έχουν γίνει μεγάλες προσπάθειες για την προσομοίωση της συμπεριφοράς των δικτύων ύδρευσης, όσον αφορά στις παροχές, στις πιέσεις και στις διάφορες παραμέτρους ποιότητας του νερού για διαφορετικές συνθήκες και καταστάσεις λειτουργίας. Όμως, η ανάπτυξη του μοντέλου ενός δικτύου ύδρευσης αποτελείται από πολλά λογικά βήματα, ένα από τα οποία είναι ο προσδιορισμός των βασικών παραμέτρων αυτού, που έχουν και τις πλέον σημαντικές επιπτώσεις στα αποτελέσματα του μοντέλου.

Ειδικότερα, η ακριβής πρόβλεψη των πιέσεων, των παροχών και των παραμέτρων ποιότητας του νερού στα δίκτυα ύδρευσης εξαρτάται από την ποιότητα των δεδομένων εισόδου (Ormsbee, 1989, Martínez-Solano et al., 2008), που είναι οι συντελεστές τραχύτητας των αγωγών, η ζήτηση στους κόμβους και η χρονική μεταβολή της (Ormsbee and Lingireddy, 2003). Τα δεδομένα αυτά περιέχουν αβεβαιότητες, που επηρεάζουν την ακρίβεια των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και αποτελούν τις δύο κύριες πηγές σφαλμάτων, που είναι υπεύθυνες για τις αποκλίσεις μεταξύ των μετρημένων και των υπολογιζόμενων τιμών των παροχών και των πιέσεων (Ormsbee, 1989, Ormsbee and Lingireddy, 1997). Η ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων αυτών δεν είναι μόνο κρίσιμη για την επαλήθευση του μοντέλου, αλλά αποτελεί και έναν οδηγό για μελλοντικές ερευνητικές προσπάθειες (Hamby, 1994). Η ανάλυση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική στην περίπτωση του σχεδιασμού ενός δικτύου ύδρευσης, οπότε δεν υπάρχουν μετρήσεις παροχών και πιέσεων σε συγκεκριμένες θέσεις του δικτύου, ώστε να μπορεί να γίνει ρύθμιση των παραμέτρων αυτού και επαλήθευση.

Στο νομοθετικό πλαίσιο που ισχύει στην Ελλάδα για την εκπόνηση μελετών δικτύων ύδρευσης δεν γίνεται σχετική αναφορά για το θέμα αυτό. Οι ισχύουσες τεχνικές προδιαγραφές εκπόνησης μελετών δικτύων ύδρευσης (Π.Δ. 696/1974, άρθρα 204-207) έχουν μια διάρκεια ζωής 38 ετών, χωρίς να έχουν υποστεί μέχρι σήμερα καμία απολύτως ουσιαστική βελτίωση ή διόρθωση.

Στην πραγματικότητα, ένα δίκτυο ύδρευσης είναι ένα σύστημα, το οποίο περιλαμβάνει το αίτιο (φόρτιση), τη διεργασία και τα αποτελέσματα. Για παράδειγμα, όταν ένας καταναλωτής ανοίγει τη βρύση στο σπίτι του υποβάλλει το δίκτυο σε κατάσταση λειτουργίας (αίτιο), το οποίο μέσω διεργασιών (απώλειες ενέργειας κ.λπ.) επιφέρει αποτελέσματα (διακύμανση πιέσεων σε κάθε κόμβο, ταχύτητα και παροχή στους αγωγούς κ.λπ.) (Walski and Chase, 2003). Προκειμένου, λοιπόν, να εξεταστεί η συμπεριφορά ενός δικτύου ύδρευσης θα πρέπει να ενεργοποιούνται τα κατάλληλα σενάρια λειτουργίας αυτού, από τα οποία μπορούν να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για τις δυσμενείς φορτίσεις, παροχές και πιέσεις σε οποιοδήποτε σημείο αυτού. Σημειώνεται, όμως, ότι η επιτυχής προσομοίωση της λειτουργίας ενός δικτύου ύδρευσης εξαρτάται από: (α) την καταλληλότητα του μαθηματικού μοντέλου, (β) τις μαθηματικές παραδοχές που θα γίνουν για τη μετάβαση από το πραγματικό δίκτυο στη σχηματική διάταξη (σκελετοποίηση) αυτού και (γ) τα σενάρια λειτουργίας που θα εξεταστούν.

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η περίπτωση του σχεδιασμού και της προσομοίωσης της ροής ενός κλειστού υπό πίεση δικτύου ύδρευσης διπλής εισόδου, το οποίο λειτουργεί με βαρύτητα και βρίσκεται στη φάση της μελέτης. Γίνεται ανάλυση ευαισθησίας ορισμένων βασικών παραμέτρων αυτού, που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση του δικτύου και στον έλεγχο των ενδεχόμενων επιπτώσεων, που παρουσιάζονται στη λειτουργία του. Τέλος, αναλύονται και σχολιάζονται οι ισχύουσες τεχνικές προδιαγραφές εκπόνησης μελετών δικτύων ύδρευσης που ισχύουν στην Ελλάδα, επισημαίνονται οι αδυναμίες τους και γίνονται προτάσεις για τη βελτίωση τους.

2. ΣΚΕΛΕΤΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΝΕΡΟΥ

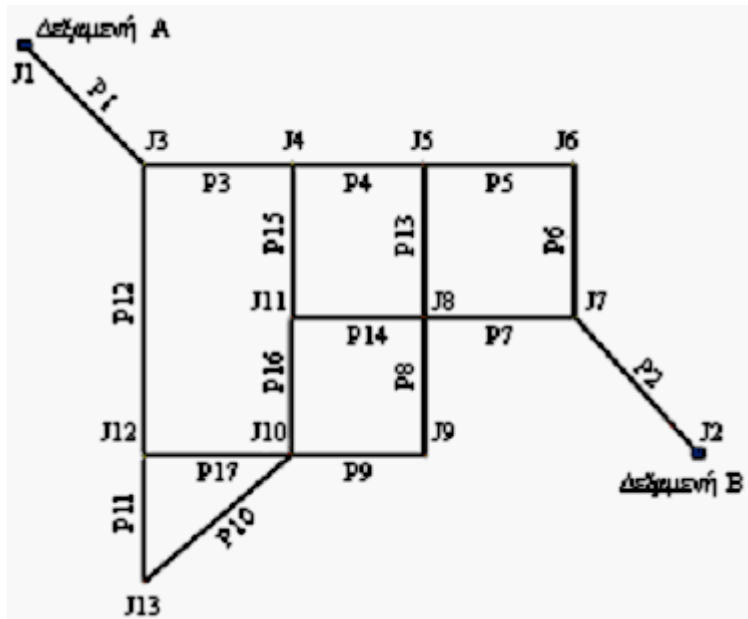
Ένα πραγματικό δίκτυο διανομής νερού είναι ένα σύστημα υδραυλικών στοιχείων (αγωγοί, αντλίες, βάνες, δεξαμενές), τα οποία συνδέονται μεταξύ τους για να μεταφέρουν και να διανείμουν συγκεκριμένες ποσότητες νερού και σε προκαθορισμένα όρια πιέσεων από τις υδροληψίες στους καταναλωτές (Eiger et al., 1994). Όμως, σε γενικές γραμμές, το μοντέλο ενός συστήματος διανομής νερού αποτελείται μόνο από ένα ποσοστό των σωλήνων που περιλαμβάνει το πραγματικό δίκτυο. Αυτό επιτυγχάνεται με μια διαδικασία γνωστή ως σκελετοποίηση (skeletonization) του δικτύου. Σύμφωνα με τους Walski and Chase (2003) σκελετοποίηση είναι η διαδικασία της επιλογής μόνο των τμημάτων του δικτύου, που έχουν σημαντικές επιπτώσεις στη συμπεριφορά του συστήματος. Δηλαδή στην πραγματικότητα πρόκειται για δικτυακή απεικόνιση των συνιστωσών του φυσικού συστήματος ως συνιστωσών ενός εννοιολογικού μοντέλου γράφου (κόμβοι, κλάδοι). Τη διαδικασία αυτή οι Κουτσογιάννης και Ευστρατιάδης (2007) την ονομάζουν «σχηματοποίηση», ενώ η Βαμβακερίδου – Λουριδία (2000) «σχηματική διάταξη» και «σχηματικό ομοίωμα» (Βαμβακερίδου-Λουριδία, 1990). Με τη χρησιμοποίηση ενός σκελετοποιημένου μοντέλου αντί του πραγματικού επιδιώκεται η μείωση της προσπάθειας για την ανάπτυξη του μοντέλου και της συντήρησης αυτού, αλλά και μεγαλύτερη αποδοτικότητα της λειτουργίας του (Bahadur et al., 2006). Κατά τους Walski and Chase (2003), σε περίπτωση που συμπεριληφθούν όλες οι συνιστώσες ενός μεγάλου δικτύου διανομής νερού θα μπορούσε αυτό να αποδειχτεί μια τεράστια προσπάθεια χωρίς σημαντική επίπτωση στα αποτελέσματα του μοντέλου. Οι Eggener and Polkowski (1976) παρουσίασαν για πρώτη φορά μια συστηματική μελέτη στην οποία αφαιρούσαν αγωγούς από ένα δίκτυο διανομής νερού προκειμένου να εξετάσουν την ευαισθησία των αποτελεσμάτων του μοντέλου και κατέληξαν ότι σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας του δικτύου μπορούσαν να αφαιρέσουν ένα μεγάλο αριθμό αγωγών χωρίς να επηρεάζονται σημαντικά οι πιέσεις. Οι Hamberg and Shamir (1988 a, b) παρουσίασαν συγκεκριμένους κανόνες για τη μείωση του μεγέθους των δικτύων. Το ενδιαφέρον θέμα της σκελετοποίησης των δικτύων διανομής νερού και των επιπτώσεων της έχει μελετηθεί, επίσης, από τους Grayman and Rhee (2000), Jung et al. (2007), Saldarriaga et al. (2008), και από αρκετούς άλλους, πλην όμως δεν αποτελεί αντικείμενο της παρούσας εργασίας.

3. ΠΙΛΟΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ

Στο Σχήμα 1 απεικονίζεται ένα απλό (σκελετοποιημένο) κυκλοφοριακό (βροχωτό) υποθετικό δίκτυο διπλής εισόδου, που εξετάζεται στην παρούσα εργασία. Το δίκτυο αυτό, που αποτελείται από 13 κόμβους, 17 αγωγούς, 5 βρόχους (3 τετραγωνικής μορφής, 1 ορθογωνικής και 1 τριγωνικής), τροφοδοτείται από τη δεξαμενή Α με Ανωτάτη Στάθμη Ύδατος (Α.Σ.Υ.) 210m και Κατωτάτη Στάθμη Ύδατος (Κ.Σ.Υ.) 205m και από τη δεξαμενή Β με Α.Σ.Υ. και Κ.Σ.Υ. 190m και 185m, αντιστοίχως. Στον Πίνακα 1 δίνονται τα υψόμετρα των κόμβων του δικτύου και στον Πίνακα 2 τα μήκη των αγωγών.

Ο σημερινός πληθυσμός της πόλεως εκτιμήθηκε ότι είναι 18.000 κάτοικοι, ομοιόμορφα κατανομημένος σε όλη την έκταση της πόλεως και ότι το μέσο ετήσιο ποσοστό αύξησης αυτού είναι 2%. Ο χρήσιμος χρόνος ζωής των έργων (περίοδος σχεδιασμού) ελήφθη ίσος με 40 χρόνια, οπότε, σύμφωνα με τη μέθοδο του ανατοκισμού, ο μελλοντικός πληθυσμός στο τέλος της 40ετίας είναι 37.745 κάτοικοι. Η μέση ημερήσια ειδική κατανάλωση ελήφθη ίση με 200 L/κάτ./24ωρο, σύμφωνα με την Κ.Υ.Α. Δ11/Φ16/8500/22-3-1991, ενώ οι συντελεστές αιχμής λ_H και λ_ω ελήφθησαν ίσοι με 1,5 και 2,25 αντιστοίχως (Κ.Υ.Α. Δ11/Φ16/8500/22-3-1991). Η μέγιστη ημερήσια παροχή $maxQ_H$ (=138,002 L/s) και η μέγιστη ωραία παροχή $maxQ_\omega$ (=207,004 L/s) υπολογίστηκαν από τις σχέσεις $maxQ_H = \lambda_H Q_H$ και $maxQ_\omega = \lambda_\omega Q_H$. Στη συνέχεια, υπολογίστηκαν οι παροχές διανομής των αγωγών του δικτύου, από τις οποίες

υπολογίστηκαν οι παροχές στους κόμβους (κατανάλωση), οι οποίες δίνονται στον Πίνακα 3 (Σπανοθύμιου, 2010).



Πίνακας 1: Υψόμετρα, Z_i , των κόμβων του δικτύου.

Κόμβος, ID	Z_i (m)
J3	150
J4	148
J5	149
J6	151
J7	150
J8	148
J9	144
J10	146
J11	147
J12	145
J13	143

Σχήμα 1: Σχηματική διάταξη του δικτύου

Πίνακας 2: Μήκη L_i (m) των αγωγών του δικτύου

Αγωγός, ID	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
L_i (m)	1.500	1.700	400	300	400	400	400	400	300
Αγωγός, ID	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	
L_i (m)	360	400	800	400	300	400	400	400	

Πίνακας 3: Παροχές εξόδου (κατανάλωσης) Q_j (L/s) στους κόμβους του δικτύου

Κόμβος, ID	J3	J4	J5	J6	J7	J8
Q_j (L/s)	20,700	20,700	18,113	10,350	10,350	25,875
Κόμβος, ID	J9	J10	J11	J12	J13	
Q_j (L/s)	7,763	27,601	31,051	27,601	6,900	

Από τον Πίνακα 3 προκύπτει ότι $\sum_{j=3}^{13} Q_j = 207,004 \text{ L/s} = \max Q_w$

3.1. ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ

Κατά την επίλυση των δικτύων ύδρευσης με τα μοντέλα επίλυσης τίθενται οι περιορισμοί:

- *Όρια φορτίων στους κόμβους*

Όλοι οι κόμβοι του δικτύου πρέπει να έχουν διαθέσιμο φορτίο, h_j , μεγαλύτερο ή ίσο από το ελάχιστο απαιτούμενο διαθέσιμο φορτίο, $H_{\min,j}$, δηλαδή $h_j = H_j - Z_j \geq H_{\min,j}$, $j = 1, NJ$ όπου H_j = το πιεζομετρικό φορτίο στον κόμβο j , Z_j = το υψόμετρο στον κόμβο j , NJ = το πλήθος των κόμβων του δικτύου. Το ελάχιστο απαιτούμενο διαθέσιμο φορτίο, $H_{\min,j}$, στους κόμβους εξαρτάται από τον αριθμό των ορόφων των κτιρίων, που θα εξυπηρετούνται από το δίκτυο ύδρευσης και υπολογίζεται συνήθως από την εμπειρική σχέση $4(\nu+1)$, όπου ν = ο αριθμός των ορόφων, μπορεί δε να μην είναι το ίδιο σε όλους τους κόμβους του δικτύου. Το φορτίο αυτό λαμβάνεται συνήθως ίσο με 12-15m για μονώροφα κτίρια, 16-19m για διώροφα και 20-23m για τριώροφα (Τσακίρης και Σπηλιώτης, 2010). Μερικές φορές, για λόγους προστασίας των υδραυλικών εγκαταστάσεων, των οικιακών συσκευών κ.λπ., τίθεται και θέμα περιορισμού του μέγιστου διαθέσιμου φορτίου στους κόμβους δηλαδή: $H_j - Z_j \leq H_{\max,i}$, $j=1, NJ$ όπου $H_{\max,i}$ = το μέγιστο απαιτούμενο διαθέσιμο φορτίο στον κόμβο J . Σε γενικές γραμμές, συνιστάται η διαφορά της Ανωτάτης Στάθμης Ύδατος (ΑΣΥ) στη δεξαμενή ρύθμισης και του χαμηλότερου υψομετρικά κόμβου του δικτύου να μην υπερβαίνει τα 70m (Γιαννόπουλος, 2001b) ή κατ' άλλους τα 60m (Τσακίρης και Σπηλιώτης, 2010) ή τα 60 – 70m (Βαμβακερίδου – Λουριδία, 2000). Σε αντίθετη περίπτωση, το δίκτυο πρέπει να χωριστεί σε ζώνες υψηλής και χαμηλής ζώνης (στάθμης) δηλαδή σε επιμέρους τμήματα που να τροφοδοτούνται από ανεξάρτητες δεξαμενές ή φρεάτια πιεζομετρικής θραύσεως, τα οποία κατασκευάζονται σε κατάλληλες υψομετρικές θέσεις.

- *Περιορισμοί διαμέτρου*

Για όλους τους αγωγούς του δικτύου πρέπει $D_{\min} \leq D_i$, $i = 1, NP$, όπου D_i = η διάμετρος του αγωγού i , D_{\min} = η ελάχιστη επιτρεπόμενη διάμετρος, η οποία για αγωγούς από PVC και HDPE είναι 63 mm, για αγωγούς από αμιαντοτσιμέντο είναι 80 mm και για χαλυβδοσωλήνες 100 mm και NP = ο αριθμός των αγωγών του δικτύου (Κουτσογιάννης και Ευστρατιάδης, 2007). Παρόμοιες τιμές αναφέρονται και στη διεθνή βιβλιογραφία. Για παράδειγμα, οι Swamee and Sharma (2008) δέχονται διάμετρο αγωγού 100 mm για αστική διανομή νερού και 150 mm για αμιγώς εμπορική- βιομηχανική χρήση.

- *Περιορισμοί ταχύτητας*

Για όλους τους αγωγούς του δικτύου πρέπει να ισχύει: $V_{\min} \leq V_i(D) \leq V_{\max}$, $i=1, NP$ όπου $V_i(D)$ = η ταχύτητα ροής στον αγωγό i διαμέτρου D_i , V_{\min} = η ελάχιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα και V_{\max} = η μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα. Τα όρια των ταχυτήτων ροής πρέπει να κυμαίνονται από 0,5 έως 1,5 m/s (Τσακίρης και Σπηλιώτης, 2010), ενώ κατά Αμερικανικούς Κανονισμούς από 0,9 έως 1,5 m/s και κατά τους Γαλλικούς από 0,5 έως 1,0 m/s (Παρθενιάδης, 1987). Επιπλέον, ο Παρθενιάδης (1987) διευκρινίζει ότι οι υψηλές ταχύτητες δημιουργούν κινδύνους υψηλών πιέσεων λόγω του υδραυλικού πλήγματος και η ελάχιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα δημιουργεί δυσκολίες στη συντήρηση και στον καθαρισμό των αγωγών. Κατά το Γιαννόπουλο (2002), η μέγιστη ταχύτητα δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 2,0 m/s. Σύμφωνα με την Εγκύκλιο αρ. Δ22200/30-7-1977 του άλλοτε Υπουργείου Δημοσίων Έργων, η οποία αφορά στον έλεγχο μελετών σωληνωτών αρδευτικών δικτύων, οι μέγιστες, V_{\max} , και οι ελάχιστες, V_{\min} , επιτρεπόμενες ταχύτητες κατά εσωτερική διάμετρο αγωγού $D_{\text{εσωτ}}$ είναι ίδιες ανεξάρτητα από το υλικό κατασκευής των αγωγών ως εξής:

Για	$D_{\text{εσωτ}} \leq 125\text{mm}$	$V_{\max}=1,55\text{m/s}$	$V_{\min}=0,50\text{ m/s}$
Για	$125\text{mm} \leq D_{\text{εσωτ}} \leq 175\text{mm}$	$V_{\max}=1,85\text{m/s}$	$V_{\min}=0,50\text{ m/s}$
Για	$175\text{mm} \leq D_{\text{εσωτ}} \leq 350\text{mm}$	$V_{\max}=2,00\text{m/s}$	$V_{\min}=0,50\text{ m/s}$
Για	$350\text{mm} \leq D_{\text{εσωτ}} \leq 450\text{mm}$	$V_{\max}=2,10\text{m/s}$	$V_{\min}=0,50\text{ m/s}$
Για	$450\text{mm} \leq D_{\text{εσωτ}} \leq 600\text{mm}$	$V_{\max}=2,20\text{m/s}$	$V_{\min}=0,50\text{ m/s}$
Για	$600\text{mm} \leq D_{\text{εσωτ}} \leq 800\text{mm}$	$V_{\max}=2,30\text{m/s}$	$V_{\min}=0,70\text{ m/s}$

Για	$800\text{mm} \leq D_{\text{εσωτ}} \leq 1000\text{mm}$	$V_{\text{max}}=2,40\text{m/s}$	$V_{\text{min}}=0,70 \text{ m/s}$
Για	$1000\text{mm} \leq D_{\text{εσωτ}}$	$V_{\text{max}}=2,50\text{m/s}$	$V_{\text{min}}=0,70 \text{ m/s}$

Η Βαμβακερίδου – Λουριδία (2000) συνιστά τα ανωτέρω όρια ταχυτήτων και για τα δίκτυα ύδρευσης. Σημειώνεται ότι κατά τη Βαμβακερίδου – Λουριδία (1990) η ελάχιστη ταχύτητα έχει νόημα μόνο για καταθλιπτικούς αγωγούς, τους αγωγούς του εξωτερικού υδραγωγείου και γενικά, για τα ακτινωτά τμήματα του δικτύου. Οι Swamee and Sharma (2008) δεν δίνουν συγκεκριμένα όρια ταχυτήτων, αλλά γενικώς αναφέρουν ότι η μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα εξαρτάται από το υλικό κατασκευής των αγωγών, για δε την ελάχιστη ταχύτητα υποστηρίζουν ότι θα πρέπει να καθορίζεται έτσι ώστε να μην δημιουργούνται εναποθέσεις στους αγωγούς. Η USEPA (1984) συνιστά όρια ταχυτήτων που κυμαίνονται από 1,5 m/s έως 3,0 m/s (5 – 10 fps) και θεωρεί ότι η διατομή του αγωγού είναι αποδεκτή μόνο όταν βρίσκεται μέσα στα όρια αυτά. Διεθνώς, για τη μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα ορισμένοι μηχανικοί χρησιμοποιούν την τιμή 1,5 m/s, άλλοι 2,4 m/s και άλλοι 3,1 m/s. Όπως αναφέρουν οι Walski et al. (2003), επειδή η ταχύτητα δεν είναι μια πραγματική παράμετρος σχεδιασμού ενός δικτύου, γι' αυτό το λόγο δεν υπάρχει μια απλή απάντηση στο ερώτημα «ποια θα πρέπει να είναι μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα V_{max} , έστω και αν σε μερικούς κανονισμούς μελετών ύδρευσης διαφόρων χωρών δίνονται τέτοιες τιμές» και επιπλέον, επισημαίνουν ότι η ταχύτητα είναι απλά μια άλλη παράμετρος, που ο Μηχανικός μπορεί να χρησιμοποιήσει για τον έλεγχο του δικτύου.

Με βάση τα όσα αναφέρθηκαν διαπιστώνεται ότι δεν είναι εύκολη η απάντηση στην ερώτηση «ποια είναι η μέγιστη ταχύτητα, V_{max} , σ' ένα υπό πίεση δίκτυο ύδρευσης», αφού η ταχύτητα αυτή μόνο έμμεσα αποτελεί περιοριστικό παράγοντα στη διαστασιολόγηση του αγωγού. Στην παρούσα εργασία ελήφθη ως όριο μόνο η μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα V_{max} (=2,0 m/s), ενώ σύμφωνα και με την επισήμανση της Βαμβακερίδου – Λουριδίας (1990) δεν ελήφθη υπόψη η ελάχιστη ταχύτητα ως κατώτερο όριο ταχύτητας, γιατί το δίκτυο που εξετάζεται είναι κυκλοφοριακό.

3.2. ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΠΙΛΥΣΗΣ

Η ανάλυση του δικτύου έγινε με το λογισμικό MIKE URBAN Water Distribution της DHI. Το μοντέλο που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία είναι ένα μοντέλο επίλυσης, το οποίο θεωρεί τη διάταξη του δικτύου και τις διαμέτρους των αγωγών ως δεδομένα χωρίς να λαμβάνει υπόψη του τον παράγοντα «κόστος» της λύσης, που επιτυγχάνεται. Συνεπώς, απαιτούνται να επιλεγούν οι κατάλληλες διαμέτροι των αγωγών. Η επιλογή αυτή μπορεί να γίνει με μια διαδικασία trial and error ή με βάση την εμπειρία του Μηχανικού. Μετά τον υπολογισμό των παροχών και των ταχυτήτων του νερού στους αγωγούς με τη βοήθεια του MIKE URBAN WD και εφόσον διαπιστωθεί ότι σε μερικούς από τους αγωγούς του δικτύου δεν ικανοποιούνται τα όρια των επιτρεπόμενων φορτίων στους κόμβους και των περιορισμών της ταχύτητας που ορίζονται στην ενότητα 3.1, η διαδικασία επαναλαμβάνεται, αφού τροποποιηθούν κατάλληλα ορισμένες από τις αρχικές διαμέτρους του δικτύου. Η διαδικασία που περιγράφηκε, για μικρά δίκτυα ύδρευσης, όπως στην παρούσα περίπτωση, αν και φαίνεται επίπονη στην πραγματικότητα με λίγες επιλογές μπορεί να δώσει γρήγορα το επιδιωκόμενο αποτέλεσμα. Όμως, στα μεγάλα δίκτυα ύδρευσης είναι εξαιρετικά επίπονη.

Για τον υπολογισμό των γραμμικών απωλειών εφαρμόστηκε η εξίσωση Darcy – Weisbach με συντελεστή απόλυτης τραχύτητας $K_s = 0,10\text{mm}$. Το ελάχιστο και μέγιστο απαιτούμενο διαθέσιμο φορτίο ελήφθησαν ίσα με 23m και 70m, αντιστοίχως. Η επιλογή των διαμέτρων των αγωγών έγινε, έτσι ώστε να είναι μεγαλύτερες από την ελάχιστη επιτρεπόμενη (63mm) για αγωγούς από PVC ονοματικής πίεσης 10atm. Η προσομοίωση του δικτύου πραγματοποιήθηκε για συνθήκες μόνιμης ροής (steady state conditions) στο τέλος της

περιόδου σχεδιασμού του δικτύου (40 χρόνια) και για την Ανωτάτη Στάθμη Νερού (Α.Σ.Υ.) στις δεξαμενές Α και Β, που είναι 210m και 190m αντιστοίχως. Ως παροχή σχεδιασμού του εσωτερικού δικτύου ύδρευσης υπό κανονικές συνθήκες (χωρίς να ληφθεί υπόψη περίπτωση πυρκαϊάς) θεωρήθηκε η μέγιστη ωραία παροχή, $maxQ_{\omega}$. Οι διάμετροι των αγωγών του δικτύου που ικανοποιούν όλους τους περιορισμούς της ενότητας 3.1 δίνονται στον Πίνακα 4. Συγκεκριμένα, οι ταχύτητες κυμαίνονται από 0,13m/s (αγωγός P9) μέχρι 1,99m/s (αγωγός P3) και τα διαθέσιμα φορτία στους κόμβους από 28,35m (κόμβος J7) μέχρι 47,85m (κόμβος J3).

Πίνακας 4: Διάμετροι των αγωγών του δικτύου

Αγωγός, ID	Εξωτερική διάμετρος (mm)	Πάχος τοιχωμάτων (mm)	Εσωτερική διάμετρος (mm)
P1	400	19,1	361,8
P2	140	6,7	126,6
P3	315	15,0	285,0
P4, P12	200	9,6	180,8
P5, P7, P8, P14	125	6,0	113,0
P6, P10	90	4,3	81,4
P9, P11, P13, P16, P17	110	5,3	99,4
P15	225	10,8	203,4

4. ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΕΓΙΣΤΩΝ ΠΙΕΣΕΩΝ

Οι μέγιστες πιέσεις που μπορούν να παρουσιαστούν στο δίκτυο είναι, όταν οι καταναλώσεις σε όλους τους κόμβους είναι μηδέν και οι δεξαμενές βρίσκονται στην ανώτατη στάθμη (νυκτερινή κατανάλωση). Σε περίπτωση που ένα δίκτυο τροφοδοτείται από περισσότερες από μια δεξαμενές, όπως στην παρούσα περίπτωση, λαμβάνεται υπόψη για τον έλεγχο η δεξαμενή με τη μεγαλύτερη Α.Σ.Υ. που είναι η δεξαμενή Α με 210m. Οι μέγιστες πιέσεις στο δίκτυο κυμαίνονται από 59m (κόμβος J6) μέχρι 67m (κόμβος J13) και συνεπώς, οι πιέσεις σε όλους τους κόμβους βρίσκονται μέσα στα επιτρεπόμενα όρια.

5. ΈΛΕΓΧΟΣ ΕΛΑΧΙΣΤΩΝ ΠΙΕΣΕΩΝ ΣΕ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΑΝΟΝΙΚΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Ο έλεγχος αυτός ισοδυναμεί με επίλυση του δικτύου σε σενάριο κανονικής λειτουργίας και αποσκοπεί στον υπολογισμό των πιέσεων στους κόμβους του δικτύου για συνθήκες μέγιστης ωριαίας κατανάλωσης και ελάχιστης στάθμης των δεξαμενών. Στη συγκεκριμένη περίπτωση επιλύεται το δίκτυο για την Κατώτατη Στάθμη Ύδατος (Κ.Σ.Υ.) στις δεξαμενές Α και Β, που είναι 205 και 185m αντιστοίχως. Οι ελάχιστες πιέσεις κυμαίνονται από 28,08m (κόμβος J13) μέχρι 42,85m (κόμβος J3) και οι ταχύτητες από 0,13m/s (αγωγός P9) μέχρι 1,99m/s (αγωγός P3) και συνεπώς, ικανοποιούνται όλοι οι περιορισμοί της ενότητας 3.1.

6. ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ

Σε γενικές γραμμές, οι κύριες παράμετροι που ενδιαφέρουν στην περίπτωση ενός μοντέλου δικτύου ύδρευσης είναι η τραχύτητα των αγωγών και η ζήτηση των παροχών στους κόμβους του δικτύου (Ormsbee and Lingireddy, 2003), οι οποίες είναι οι πιο αβέβαιες μεταβλητές σ' ένα δίκτυο, επειδή δεν είναι άμεσα μετρήσιμες (Kang and Lansley, 2011).

Συνήθως, οι τελικές τιμές των παραμέτρων αυτών καθορίζονται με τη διαδικασία της βαθμονόμησης μοντέλου (Ormsbee and Lingireddy, 2003). Στην παρούσα εργασία για τους λόγους που προαναφέρθηκαν (το δίκτυο βρίσκεται στη φάση της μελέτης), γίνεται ανάλυση ευαισθησίας των βασικών παραμέτρων του δικτύου, η οποία συνίσταται στη μεταβολή των τιμών, που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση του δικτύου και στον έλεγχο των ενδεχόμενων επιπτώσεων, που παρουσιάζονται στη λειτουργία αυτού. Συγκεκριμένα, εξετάζονται οι επιπτώσεις στη λειτουργία του μοντέλου κατά το έτος στόχο λόγω: (α) Μεταβολής του συντελεστή απόλυτης τραχύτητας, K_s , των αγωγών ή της εσφαλμένης εκτίμησης αυτού. (β) Της μεταβολής της ζήτησης των παροχών στους κόμβους. (γ) Της αστοχίας στην εκτίμηση των συντελεστών αιχμής, λ_H και λ_ω .

6.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΩΣ ΠΡΟΣ K_s

Στην επιλογή του συντελεστή απόλυτης τραχύτητας K_s απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή, γιατί η τιμή που θα ληφθεί υπόψη σε μια μελέτη δεν μπορεί να εξαρτάται μόνο από τις τιμές που δίνουν οι βιομηχανίες σωλήνων στην κατάσταση που τους παραδίνουν στο εργοστάσιο. Διάφοροι ερευνητές και βιομηχανίες σωλήνων έχουν παρουσιάσει πίνακες που παρέχουν εκτιμήσεις της τραχύτητας των σωλήνων σαν συνάρτηση διαφόρων χαρακτηριστικών αυτών, όπως είναι π.χ. το υλικό, η διάμετρος και η ηλικία των σωλήνων (Lamont, 1981). Συγκεκριμένα, για τους σωλήνες από PVC, οι εταιρείες που τους κατασκευάζουν δίνουν τιμές του K_s που κυμαίνονται από 0,007 έως 0,03 mm. Σύμφωνα με την ελληνική βιβλιογραφία (Αυτιάς, 1992, Βαμβακερίδου-Λουριδία, 2000) συνιστάται, γενικά, ακόμη και στις περιπτώσεις που το νερό δεν είναι διαβρωτικό και δεν είναι επικίνδυνο για επικαθήσεις να χρησιμοποιείται τιμή $K_s = 0,10$ mm. Με την υιοθέτηση της τιμής αυτής ενσωματώνονται οι τοπικές απώλειες αλλά και η γήρανση των αγωγών. Για χαλυβοσωλήνες προτείνεται η προσαύξηση της τραχύτητας κατά μία τάξη μεγέθους. Στο πρότυπο τεύχος OEMK-A-2.1 συνιστάται για σωλήνες από PVC και HDPE τιμή $K_s = 0,075$ mm.

Στην παρούσα εργασία, που κατά την προσομοίωση του δικτύου ο συντελεστής K_s ελήφθη ίσος με 0,10 mm, εξετάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για δύο περιπτώσεις του K_s δηλαδή $K_{s1} = 0,085$ mm και $K_{s2} = 0,115$ mm κατά το έτος στόχο και συγκρίνονται με αυτά που προέκυψαν για την τιμή $K_s = 0,10$ mm δηλαδή εξετάζονται οι επιπτώσεις στη λειτουργία του δικτύου λόγω αστοχίας στην επιλογή του συντελεστή K_s κατά $\pm 15\%$. Σημειώνεται ότι όλοι οι σχετικοί υπολογισμοί αναφέρονται στο έτος στόχο.

Σενάριο I: Συντελεστής απόλυτης τραχύτητας $K_{s1} = 0,085$ mm

Περίπτωση (α): Η στάθμη του νερού στις δεξαμενές Α και Β είναι 210m και 190m αντιστοίχως (Α.Σ.Υ.). Από τα αποτελέσματα συνάγεται ότι ικανοποιούνται όλοι οι περιορισμοί της ενότητας 3.1. Από τη σύγκριση των ταχυτήτων στους αγωγούς και των διαθέσιμων φορτίων στους κόμβους του δικτύου για τιμές του K_s ίσες με 0,10 και 0,085 mm διαπιστώνεται ότι μεταβολή του συντελεστή τραχύτητας K_s κατά -15% συνεπάγεται μεταβολές στις ταχύτητες στους αγωγούς που φθάνουν μέχρι 14,29% και στα διαθέσιμα φορτία στους κόμβους μέχρι 2,89%.

Περίπτωση (β): Η στάθμη του νερού στις δεξαμενές Α και Β είναι 205m και 185m αντιστοίχως (Κ.Σ.Υ.). Από τα αποτελέσματα συνάγεται ότι ικανοποιούνται όλοι οι περιορισμοί της ενότητας 3.1. Από τη σύγκριση των ταχυτήτων στους αγωγούς και των διαθέσιμων φορτίων στους κόμβους του δικτύου για τιμές του K_s ίσες με 0,10 και 0,085 mm διαπιστώνεται ότι μεταβολή του συντελεστή τραχύτητας K_s κατά -15% συνεπάγεται μεταβολές στις ταχύτητες στους αγωγούς που φθάνουν μέχρι 7,69% και στα διαθέσιμα φορτία στους κόμβους μέχρι 3,50%.

Σενάριο II: Συντελεστής απόλυτης τραχύτητας $K_{s2} = 0,115 \text{ mm}$

Περίπτωση (α): Η στάθμη του νερού στις δεξαμενές Α και Β είναι 210m και 190m αντιστοίχως (Α.Σ.Υ.). Από τα αποτελέσματα συνάγεται ότι ικανοποιούνται όλοι οι περιορισμοί της ενότητας 3.1. Από τη σύγκριση των ταχυτήτων στους αγωγούς και των διαθέσιμων φορτίων στους κόμβους του δικτύου για τιμές του K_s ίσες με 0,10 και 0,115 mm διαπιστώνεται ότι μεταβολή του συντελεστή τραχύτητας K_s κατά +15% συνεπάγεται μεταβολές στις ταχύτητες στους αγωγούς που φθάνουν μέχρι 2,27% και στα διαθέσιμα φορτία στους κόμβους μέχρι 2,71%.

Περίπτωση (β): Η στάθμη του νερού στις δεξαμενές Α και Β είναι 205m και 185m αντιστοίχως (Κ.Σ.Υ.). Από τα αποτελέσματα συνάγεται ότι ικανοποιείται η συνθήκη όσον αφορά στη μέγιστη ταχύτητα όχι όμως και η απαίτηση του ελάχιστου απαιτούμενου διαθέσιμου φορτίου στους κόμβους $H_{min,i}$ (=23m). Συγκεκριμένα, παρατηρούνται αποκλίσεις 1,4% και 1,6% στους κόμβους J7 και J8, που θεωρούνται πολύ μικρές και θα λάβουν χώρα μόνο όταν οι στάθμες του νερού και στις δύο Δεξαμενές Α και Β είναι ταυτόχρονα 205m και 185m (Κ.Σ.Υ.) αντιστοίχως. Από τη σύγκριση των ταχυτήτων στους αγωγούς και των διαθέσιμων φορτίων στους κόμβους του δικτύου για τιμές του K_s ίσες με 0,10 και 0,115 mm διαπιστώνεται ότι για την περίπτωση που η στάθμη του νερού στις Δεξαμενές Α και Β είναι 205m και 185m (Κ.Σ.Υ.) αντιστοίχως, μεταβολή του συντελεστή τραχύτητας K_s κατά +15% συνεπάγεται μεταβολές στις ταχύτητες στους αγωγούς που φθάνουν μέχρι 7,69% και στα διαθέσιμα φορτία στους κόμβους μέχρι 3,29%.

Όμως, για προσομοίωση του δικτύου για τιμές του K_s μεγαλύτερες κατά 20% και 25% από την τιμή $K_s = 0,10 \text{ mm}$ προέκυψε ότι υπάρχει ιδιαίτερα σημαντικό πρόβλημα στις πιέσεις στους κόμβους και συνεπώς, στα διαθέσιμα φορτία σ' αυτούς, καθώς επίσης και στις ταχύτητες στους αγωγούς του δικτύου. Οι διαπιστώσεις αυτές καταδεικνύουν ότι απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή της τιμής του συντελεστή K_s που θα υιοθετηθεί στη μελέτη ενός δικτύου ύδρευσης. Ιδιαίτερα, θα πρέπει να εξετάζεται η πιθανότητα διαβρώσεων και επικαθήσεων κατά τη διάρκεια ζωής του έργου και ανάλογα να γίνεται η επιλογή του συντελεστή K_s . Σε αυτή τη λογική, λόγω της πολύ μεγάλης αβεβαιότητας που υπάρχει στην επιλογή της τιμής του K_s , η ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου ως προς την παράμετρο αυτή θα μπορούσε να δώσει αρκετές πληροφορίες στο Μελετητή για τις επιπτώσεις που θα έχει στη λειτουργία του δικτύου η πιθανή αστοχία στην εκτίμηση της τιμής του συντελεστή K_s .

6.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗ ΖΗΤΗΣΗ ΤΩΝ ΠΑΡΟΧΩΝ ΣΤΟΥΣ ΚΟΜΒΟΥΣ

Σύμφωνα με την ΚΥΑ Δ11/Φ16/8500/22-3-1991, στις περιπτώσεις συλλογικών δικτύων ύδρευσης το κατώτερο και το ανώτερο όριο της μέσης ημερήσιας ειδικής κατανάλωσης ορίζονται σε 100 L/κατ/μέρα και 250 L/κατ/μέρα αντιστοίχως, ενώ στο πρότυπο τεύχος OEMK-A-2.1 ορίζονται τυπικές τιμές κατανάλωσης από 150 L/κατ/μέρα (για μικρούς οικισμούς) μέχρι 250 L/κατ/μέρα με μέση τιμή 200 L/κατ/μέρα. Η ΕΥΔΑΠ Α.Ε. όρισε για το έτος 2026 για την Αθήνα ειδική κατανάλωση σχεδιασμού από 235 μέχρι 380 L/κατ/μέρα ανάλογα με την «εισοδηματική τάξη» των κατοίκων της περιοχής μελέτης (OEMK-A-2.1). Από τα ανωτέρω, λοιπόν, συνάγεται ότι υπάρχει εξαιρετική αβεβαιότητα στα ισχύοντα στη χώρα μας νομοθετικά κείμενα όσον αφορά στη μέση ειδική κατανάλωση σχεδιασμού. Στην παρούσα εργασία εκτιμήθηκε, για τον υπολογισμό των παροχών εξόδου στους κόμβους, ότι η μέση ημερήσια ειδική κατανάλωση ανέρχεται σε 200 L/κάτ./μέρα.

Για την εξέταση της αβεβαιότητας που οφείλεται στη μέση ημερήσια ειδική κατανάλωση, q_H , θεωρήθηκε ότι οι εξερχόμενες παροχές στους κόμβους κατά το έτος στόχο αυξήθηκαν κατά 10% (αστοχία ή κακή εκτίμηση στον αρχικό σχεδιασμό του δικτύου) και έγινε έλεγχος της λειτουργίας του δικτύου για τη δυσμενέστερη περίπτωση, που είναι να

βρίσκονται οι στάθμες του νερού στις δεξαμενές Α και Β στην κατώτερη στάθμη (Κ.Σ.Υ.) δηλαδή 205m και 185m, αντιστοίχως. Διαπιστώθηκε ότι οι ταχύτητες στους αγωγούς P1, P12 και P15 είναι μεγαλύτερες από τη $V_{max} = 2$ m/s, ενώ τα διαθέσιμα φορτία στους κόμβους J6, J7, J8, J9, J10 και J13 είναι μικρότερα από το ελάχιστο απαιτούμενο διαθέσιμο φορτίο, $H_{min,j} = 23$ m. Διαπιστώθηκε, επίσης, ότι αύξηση των εξερχόμενων παροχών στους κόμβους κατά 10% συνεπάγεται μεταβολές στις ταχύτητες στους αγωγούς που φθάνουν μέχρι 38,46% και στα διαθέσιμα φορτία στους κόμβους μέχρι 41,13%.

Επομένως, συνάγεται ότι η εκτίμηση της q_H με βάση την οποία υπολογίζονται οι παροχές στους κόμβους ενός δικτύου ύδρευσης αποτελεί κρίσιμο στοιχείο στην προσομοίωση αυτού. Λόγω των αβεβαιοτήτων που υπάρχουν στην εκτίμηση της q_H θα ήταν σκόπιμο στις περιπτώσεις νέων δικτύων ύδρευσης ή στις επεκτάσεις υφιστάμενων να εξετάζονται πολλαπλά σενάρια παροχών/καταναλώσεων, ώστε να δίνεται η δυνατότητα εκτίμησης των παραδοχών που είναι κρίσιμες και σε ποιο βαθμό.

6.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΩΣ ΠΡΟΣ λ_H ΚΑΙ λ_ω

Για τον προσδιορισμό των διαφόρων διακυμάνσεων της κατανάλωσης, οι ισχύουσες τεχνικές προδιαγραφές στην Ελλάδα χρησιμοποιούν το συντελεστή λ_H για τη μέγιστη ημερήσια κατανάλωση και το συντελεστή λ_ω για τη μέγιστη ωριαία κατανάλωση. Συγκεκριμένα, στο πρότυπο τεύχος Ο.Ε.Μ.Κ. - Α - 2.1 ορίζονται για το συντελεστή λ_H οι εξής τιμές: (α) Για μεγάλα έως μεσαία αστικά κέντρα: $\lambda_H = 1,3 - 1,8$. (β) Για μικρούς οικισμούς: $\lambda_H = 2,0 - 2,5$. (γ) Για συνοικίες με σημαντική ανάπτυξη κήπων: $\lambda_H = 2,0 - 3,0$. Παράλληλα, επισημαίνεται ότι σε περιοχές με θερινό τουρισμό ο συντελεστής λ_H μπορεί να ξεπερνά κατά πολύ τις προηγούμενες τιμές, ενώ μπορεί να επηρεάζεται από κλιματικά συμβάντα χαμηλής συχνότητας, όπως είναι οι καύσωνες, οι ξηρασίες κ.λπ. Η Εγκύκλιος με αρ. πρωτ. ΕΣ/17405/1970 του άλλοτε Υπουργείου Εσωτερικών ορίζει για το συντελεστή λ_H τις εξής τιμές: (α) Για μεγάλα έως μεσαία αστικά κέντρα: $\lambda_H = 1,3 - 1,8$. (β) Για μικρούς οικισμούς: $\lambda_H = 2,0 - 2,5$. (γ) Για συνοικίες με σημαντική ανάπτυξη κήπων: $\lambda_H = 2,0 - 3,0$. (δ) Για πολύ μικρούς οικισμούς με έντονο αγροτικό χαρακτήρα: $\lambda_H \leq 4$ και παράλληλα, ορίζει ότι το εύρος διακύμανσης του συντελεστή λ_H είναι τόσο μεγαλύτερο όσο ο οικισμός είναι μικρότερος. Στην ΚΥΑ Δ11/Φ16/8500/22-3-1991 ορίζεται τιμή $\lambda_H = 1,5$. Ο προσδιορισμός του συντελεστή αιχμής λ_H και συνεπώς, της μέγιστης ημερήσιας κατανάλωσης αποτελεί κρίσιμη επιλογή για το σχεδιασμό της δυναμικότητας του εξωτερικού υδραγωγείου ενός οικισμού, αφού η εξασφάλιση ομαλής και απρόσκοπτης ύδρευσης του οικισμού με τις αναγκαίες ποσότητες και πιέσεις λειτουργίας είναι πρωταρχικής σημασίας για την καλή λειτουργία αυτού.

Ομοίως, στο πρότυπο τεύχος Ο.Ε.Μ.Κ. - Α - 2.1 ορίζονται οι εξής τιμές για το συντελεστή λ_ω : (α) Για σημαντικά αστικά κέντρα: $\lambda_\omega \approx 1,5$. (β) Για μικρούς οικισμούς: μπορεί το λ_ω να ξεπερνά την τιμή 3,0. Η Εγκύκλιος με αρ. πρωτ. ΕΣ/17405/1970 του άλλοτε Υπουργείου Εσωτερικών ορίζει για το συντελεστή λ_ω τις εξής τιμές: (α) Για αστικά κέντρα: $\lambda_\omega \leq 2,25$. (β) Για κωμοπόλεις ημιαστικής - ημιαγροτικής ανάπτυξης: $\lambda_\omega = 2,6 - 3,6$. (γ) Για κυρίως αγροτικά χωριά: $\lambda_\omega = 4,5$. (δ) Για οικισμούς με εκτεταμένη άρδευση κήπων: $\lambda_\omega \leq 6$. Στην ΚΥΑ Δ11/Φ16/8500/22-3-1991 δεν αναφέρεται κάτι σχετικό για το συντελεστή λ_ω .

Από τα προαναφερθέντα συνάγεται ότι υπάρχει μεγάλη αβεβαιότητα όσον αφορά στις τιμές των συντελεστών αιχμής λ_H και λ_ω , αλλά και ότι σε νομοθετικά κείμενα υφίστανται κάποιοι αμφιλεγόμενοι όροι (σημαντικά αστικά κέντρα, μικροί οικισμοί κ.λπ.), που επιδέχονται διαφορετικές ερμηνείες. Σύμφωνα με την ελληνική βιβλιογραφία (Αυτιάς, 1992, Βαμβακερίδου – Λουριδία, 2000, Γιαννόπουλος 2001a) οι συνήθεις τιμές των συντελεστών λ_H και λ_ω είναι 1,5 και 2,25 αντιστοίχως, τιμές με τις οποίες έγιναν οι σχετικοί υπολογισμοί στη παρούσα εργασία.

Προκειμένου να εξεταστεί η δυνατότητα του μοντέλου να αντιμετωπίσει μια αστοχία στο θέμα της επιλογής της κατάλληλης τιμής του συντελεστή μέγιστης ωριαίας παροχής ελήφθη μια τιμή $\lambda_{\omega} = 2,60$ (αύξηση 16% περίπου). Εξετάστηκαν δύο περιπτώσεις δηλαδή:

Περίπτωση (α): Η στάθμη νερού στις Δεξαμενές Α και Β είναι 210m και 190m (Α.Σ.Υ.) αντιστοίχως. Διαπιστώνεται ότι οι ταχύτητες στους αγωγούς P3, P12, P14 και P15 είναι μεγαλύτερες από τη $V_{max} = 2\text{m/s}$, ενώ τα διαθέσιμα φορτία στους κόμβους J6, J7, J8, J9, J10 και J13 είναι μικρότερα από το ελάχιστο απαιτούμενο διαθέσιμο φορτίο, $H_{min,j} = 23\text{m}$.

Περίπτωση (β): Η στάθμη νερού στις Δεξαμενές Α και Β είναι 205m και 185m (Κ.Σ.Υ.) αντιστοίχως. Διαπιστώνεται ότι οι ταχύτητες στους αγωγούς P1, P3, P12 P14 και P15 είναι μεγαλύτερες από τη $V_{max} = 2\text{ m/s}$, ενώ τα διαθέσιμα φορτία στους κόμβους J6, J7, J8, J9, J10 και J13 είναι μικρότερα από το ελάχιστο απαιτούμενο διαθέσιμο φορτίο, $H_{min,j} = 23\text{ m}$.

Από τα ανωτέρω, λοιπόν, συνάγεται ότι η εκτίμηση του συντελεστή αιχμής λ_{ω} αποτελεί κρίσιμο στοιχείο στο σχεδιασμό των δικτύων ύδρευσης. Επίσης, είναι προφανές ότι η εκτίμηση των συντελεστών αιχμής επηρεάζει την $\max Q_{\omega}$ και κατ' επέκταση τις παροχές εξόδου στους κόμβους.

7. ΣΧΟΛΙΑ ΓΙΑ ΤΙΣ ΙΣΧΥΟΥΣΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΕΚΠΟΝΗΣΗΣ ΜΕΛΕΤΩΝ ΥΔΡΕΥΣΗΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Στην Ελλάδα οι τεχνικές προδιαγραφές εκπόνησης μελετών ύδρευσης (Π.Δ. 696/1974, άρθρα 204-207) έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής (38 περίπου έτη), χωρίς να υποστούν μέχρι σήμερα καμία απολύτως ουσιαστική βελτίωση ή διόρθωση και συνεπώς, στο μεγάλο χρονικό διάστημα που ισχύουν δεν παρακολούθησαν την πρόοδο και τις εξελίξεις στην επιστήμη των υδρευσεων, των ηλεκτρονικών υπολογιστών, της υγιεινής του πόσιμου νερού, των GIS, της θεωρίας λήψεως αποφάσεων, των βάσεων δεδομένων κ.λπ. (Yannopoulos et al., 2009). Οι προδιαγραφές αυτές αντιμετωπίζουν το πρόβλημα του σχεδιασμού των δικτύων ύδρευσης με βάση το χρήσιμο (οικονομικό) χρόνο ζωής των έργων (περίοδος σχεδιασμού), που λαμβάνεται συμβατικά ίσως με 40 χρόνια, χωρίς να καθορίζουν την υποχρέωση: (α) δημιουργίας του μοντέλου του δικτύου, (β) εξέτασης των επιπτώσεων λόγω της σκελετοποίησης (skeletonization) του δικτύου, (γ) εξέτασης σεναρίων λειτουργίας π.χ. ανά 10ετία, 20ετία κ.λπ., (δ) διερεύνησης των επιπτώσεων στη λειτουργία του δικτύου από τη σταδιακή κατασκευή αυτού λόγω π.χ. έλλειψης πιστώσεων κ.λπ., (ε) της αξιοπιστίας του δικτύου, (στ) των επιπτώσεων των χαρακτηριστικών του δικτύου (γεωμετρική μορφή, θέσεις υδροληψιών, ώρες λειτουργίας των αντλιοστασίων κ.λπ.) στην ποιότητα του πόσιμου νερού κ.λπ. Επίσης, οι προδιαγραφές αυτές δεν κάνουν καμία αναφορά για την εξέταση διαφόρων υποθέσεων (εναλλακτικά σενάρια) λειτουργίας του δικτύου, όπως π.χ. λόγω γήρανσης των σωληνώσεων, αβεβαιότητας στην εκτίμηση του συντελεστή της απόλυτης τραχύτητας των αγωγών, της ζήτησης νερού στους κόμβους κ.λπ. Όμως, είναι προφανές, ότι είναι πολύ δύσκολο να λειτουργεί ένα δίκτυο ύδρευσης για τα επόμενα 40 χρόνια χωρίς προβλήματα και αστοχίες, έστω και αν η συντήρηση του γίνεται κατά υποδειγματικό τρόπο και δεν έλαβαν χώρα κατά την κατασκευή του παραλείψεις, κακοτεχνίες, αστοχίες κ.λπ., αφού πολλά από τα δεδομένα της περιοχής μελέτης με την πάροδο του χρόνου κατά κανόνα μεταβάλλονται, όπως είναι π.χ. οι όροι δόμησης, οι καταναλώσεις, οι απαιτήσεις των διαφόρων χρηστών νερού (βιομηχανία, εμπόριο κ.λπ.), οι ειδικές σημειακές απαιτήσεις, η γήρανση των σωλήνων, η ανάπτυξη νέων περιοχών και η ένταξη τους στο σχέδιο πόλεως κ.λπ. Οι αδυναμίες αυτές δεν καλύπτονται ούτε από το πρότυπο τεύχος OEMK-A-2.1.

Η Κ.Υ.Α. Δ11/Φ16/8500/22-3-1991 ορίζει τα κατώτατα και τα ανώτατα όρια των ειδικών καταναλώσεων για την ανθρώπινη κατανάλωση, αλλά για τις άλλες κατηγορίες καταναλώσεων (βιομηχανική, βιοτεχνική, εμπορική κ.λπ.) δεν δίνει σχετικές οδηγίες. Το θέμα αυτό αντιμετωπίζεται εν μέρει με το πρότυπο τεύχος OEMK-A-2.1., όπου γίνεται

αναφορά για τις βιομηχανικές και τις δημόσιες ή δημοτικές καταναλώσεις, όχι όμως και για τις εμπορικές, τις κτηνοτροφικές, τις αρδευτικές κ.λπ. καταναλώσεις.

Η ισχύουσα νομοθεσία στην Ελλάδα για την ποιότητα του πόσιμου νερού (Οδηγία 98/83/ΕΚ, Κ.Υ.Α. Υ2/οικ. 2600/01 όπως τροποποιήθηκε με την Κ.Υ.Α. ΔΥΤ2/Γ/Π/ οικ. 38295/2007) ορίζει τη συνεχή παρακολούθηση αυτού με δειγματοληψίες σε κατάλληλες θέσεις, οι οποίες παίζουν ένα σημαντικό ρόλο στην ελαχιστοποίηση των κινδύνων παροχής νερού μη ικανοποιητικής ποιότητας στην κατανάλωση (Yannopoulos et al., 2009). Όμως, οι δειγματοληψίες αυτές παρουσιάζουν μόνο μια περιορισμένη εικόνα της ποιότητας νερού, γιατί ο έλεγχος γίνεται σε συγκεκριμένα σημεία, ενώ δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πρόβλεψη των μελλοντικών συνθηκών ή την εκτέλεση «what if» αναλύσεων λόγω της περιορισμένης κάλυψης και του υψηλού κόστους (Wu, 2006).

Τέλος, η εφαρμογή του τύπου του ανατοκισμού με άκριτη επιλογή ετήσιου ποσοστού αύξησης 2% για μακρές περιόδους πρόβλεψης του πληθυσμού π.χ. 40 έτη σύμφωνα με την Εγκύκλιο αρ. πρωτ. ΕΣ./17405/1970 του άλλοτε Υπουργείου Εσωτερικών και το πρότυπο τεύχος OEMK-A-2.1. δεν έχει καμία απολύτως σχέση με τη σύγχρονη ελληνική πραγματικότητα και μπορεί να οδηγήσει σε υπερδιαστασιολόγηση των έργων (π.χ. δεξαμενές, αντλιοστάσια, αγωγοί κατάθλιψης κ.λπ.) και συνεπώς σε υπολειτουργία αυτών, εφόσον οι παροχές σχεδιασμού ποτέ δεν θα πραγματοποιηθούν ή και αν πραγματοποιηθούν, τότε αυτό θα λάβει χώρα μόνο για μικρό χρονικό διάστημα.

Οι διαπιστώσεις αυτές οδηγούν στο συμπέρασμα ότι οι ισχύουσες τεχνικές προδιαγραφές στην Ελλάδα χρειάζονται πλήρη αναθεώρηση, ώστε να ληφθούν υπόψη η πρόοδος και οι εξελίξεις της επιστήμης στο τομέα των υδρεύσεων, των ηλεκτρονικών υπολογιστών, της υγιεινής του πόσιμου νερού, των GIS κ.λπ. (Γιαννόπουλος και Σπανοθύμιου, 2010). Μια τέτοια εξέλιξη θα μπορούσε να συμβάλλει σημαντικά στην απάλειψη μελετητικών και κατασκευαστικών αστοχιών, γεγονός που θα οδηγούσε σε μείωση του κόστους συντήρησης των δικτύων και σε άμβλυνση των οχλήσεων που επιβαρύνουν τους πολίτες. Επιπλέον, οι Δ.Ε.Υ.Α. θα μπορούσαν και πρέπει να δημιουργήσουν μοντέλα των δικτύων που διαχειρίζονται, αφού η εμπειρία έχει δείξει ότι αρκετές από αυτές, λόγω της παλαιότητας των δικτύων ύδρευσης, δεν γνωρίζουν τα γεωμετρικά και υδραυλικά χαρακτηριστικά ολόκληρων τμημάτων των δικτύων τους και αντιμετωπίζουν διαχειριστικά προβλήματα (χαμηλές πιέσεις, ανεπαρκείς παροχές κ.λπ.). Επιπλέον, θα πρέπει να γίνει μια καλύτερη οργάνωση των Δ.Ε.Υ.Α. με τη δημιουργία βάσεων δεδομένων για τις απολήψεις και τις καταναλώσεις ύδατος, την ένταξη των δικτύων ύδρευσης σε Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (G.I.S.), τη χρήση συστημάτων τηλεχειρισμού SCADA κ.λπ.

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την ανάλυση που προηγήθηκε διαπιστώθηκαν τα εξής: Τόσο ο συντελεστής απόλυτης τραχύτητας, όσο και η ζήτηση των παροχών στους κόμβους ενός κλειστού υπό πίεση δικτύου ύδρευσης αποτελούν κρίσιμες παραμέτρους στο σχεδιασμό αυτού.

Η επιλογή μιας τιμής συντελεστή απόλυτης τραχύτητας K_s ίσης με 0,10 mm, που συνιστάται στην ελληνική βιβλιογραφία (Αυτιάς, 1992, Βαμβακερίδου-Λουριδία, 2000), δίνει σε γενικές γραμμές καλά αποτελέσματα για αγωγούς από σωλήνες PVC. Όμως, από την ανάλυση ευαισθησίας που έγινε ως προς την παράμετρο αυτή διαπιστώθηκε η σπουδαία σημασία που έχει η σωστή εκτίμηση της στην προσομοίωση της λειτουργίας και στο σχεδιασμό ενός δικτύου ύδρευσης.

Διαπιστώθηκε ότι οι εξερχόμενες παροχές στους κόμβους (καταναλώσεις) αποτελούν κρίσιμη παράμετρο στο σχεδιασμό ενός δικτύου ύδρευσης. Συνεπώς, η εκτίμηση της μέσης ειδικής κατανάλωσης, με την οποία υπολογίζεται η μέγιστη ωριαία παροχή και οι παροχές εξόδου στους κόμβους ενός δικτύου, αποτελεί κρίσιμο στοιχείο στην προσομοίωση της

λειτουργίας αυτού. Συνεπώς, στις περιπτώσεις νέων δικτύων ή στις επεκτάσεις υφιστάμενων, η ανάλυση ευαισθησίας ως προς την παράμετρο αυτή αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο στην πρόβλεψη της λειτουργίας αυτού. Σημειώνεται ότι τα νομοθετικά κείμενα που ισχύουν στην Ελλάδα όσον αφορά στη μέση ειδική κατανάλωση και τους συντελεστές αιχμής λ_H και λ_ω περιέχουν όρους που επιδέχονται διάφορες ερμηνείες και συνεπώς, δίνουν τη δυνατότητα για διαφορετικές υποκειμενικές επιλογές.

Τέλος, διαπιστώθηκε ότι οι ισχύουσες τεχνικές προδιαγραφές εκπόνησης μελετών έργων ύδρευσης (Π.Δ/γμα 696/1974) χρήζουν άμεσης τροποποίησης και εκσυγχρονισμού. Μια προσπάθεια που έγινε το έτος 2003 από τα άλλοτε Υπουργεία Εθνικής Οικονομίας και Οικονομικών και ΥΠ.ΧΩ.Δ.Ε. με τα πρότυπα τεύχη ελαχίστων απαιτήσεων για περιφερειακά έργα, όπως είναι το πρότυπο τεύχος OEMK-A-2.1., (στο βαθμό που μπορούμε να έχουμε υπόψη μας) δεν έχει πάρει ακόμη το χαρακτήρα νομοθετικού κειμένου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Α. Ελληνική

Αυτιάς, Μ., 1992. *Υδρεύσεις*. Ε.Μ.Π., Αθήνα, 250 σελ.

Βαμβακερίδου – Λουριδία, Λ., 1990. *Δίκτυα Υδρεύσεων – Αρδεύσεων υπό πίεση: Επίλυση – Βελτιστοποίηση*. Εκδότης Ε. & Λ. Λυρούδιας Ε.Π.Ε., Αθήνα, 402 σελ.

Βαμβακερίδου – Λουριδία, Λ., 2000. *Σχεδιασμός και μαθηματική προσομοίωση δικτύων ύδρευσης*. Ε.Μ.Π., Αθήνα, 100 σελ.

Γιαννόπουλος, Σ., 2001a. *Σημειώσεις Δικτύων Ύδρευσης. Τεύχος Α*. Α.Π.Θ., Έκδοση Υπηρεσίας Δημοσιευμάτων, Θεσσαλονίκη, 126 σελ.

Γιαννόπουλος, Σ., 2001b. *Σημειώσεις Υδρεύσεων. Τεύχος Γ: Δεξαμενές*. Α.Π.Θ., Έκδοση Υπηρεσίας Δημοσιευμάτων, Θεσσαλονίκη, 30 σελ.

Γιαννόπουλος, Σ., 2002. *Σημειώσεις Υδρεύσεων – Κλειστοί υπό Πίεση Αγωγοί*. Α.Π.Θ., Έκδοση Υπηρεσίας Δημοσιευμάτων, Θεσσαλονίκη, 39 σελ.

Γιαννόπουλος, Σ. και Σπανοθύμιου, Μ., 2010. *Πρόβλεψη της ζήτησης νερού αστικής χρήσης*. «Το μήλον της Γνώσεως», Τιμητικός τόμος για τον Ομότιμο Καθηγητή Δημήτριο Αραμπέλο, Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών Α.Π.Θ.: 417 – 434.

Κουτσογιάννης, Δ. και Ευστρατιάδης, Α., 2007. *Σημειώσεις Αστικών Υδραυλικών Έργων - Μέρος Ι: Υδρευτικά Έργα*. Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Ε.Μ.Π., Αθήνα, 146 σελ.

OEMK-A-2.1. *Πρότυπο τεύχος για Περιφερειακά έργα – Οδηγός Επίβλεψης Μελετών και Κατασκευών: Επίβλεψη Μελετών – Υδραυλικά Έργα*. ΥΠ.ΕΘ.Ο., Γ.Γ.Ε.Α. & Υ.Π.Ε.ΧΩ.Δ.Ε., Γ.Γ.Δ.Ε. Διαθέσιμο στο: http://www.hellaskps.gr/min_requirements/docs/orig/PE5/AAEkthesi/OEMK.1.doc.

Παρθενιάδης, Ε., 1987. *Εισαγωγή στην Αστική Υδραυλική: Μέρος Α – Υδρεύσεις Πόλεων* (3^η έκδοση). Θεσσαλονίκη, 442 σελ.

Σπανοθύμιου, Μ., 2010. *Προσομοίωση Συστημάτων Διανομής Νερού Ύδρευσης με το Λογισμικό MIKE URBAN W.D.-Διερεύνηση των Ισχυουσών Τεχνικών Προδιαγραφών Εκπόνησης Μελετών Ύδρευσης στην Ελλάδα*. Μεταπτυχιακή Διατριβή, Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών Α.Π.Θ., 338 σελ.

Τσακίρης, Γ. και Σπηλιώτης, Μ., 2010. *Κεφάλαιο 8: Εσωτερικό Υδραγωγείο*. Γ. Τσακίρης (υπεύθυνος έκδοσης). Υδραυλικά Έργα – Σχεδιασμός και Διαχείριση: Τόμος Ι Αστικά Υδραυλικά Έργα, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα, 317-444.

Β. Ξένη

Bahadur, R., Johnson, J., Janke, R. and Samuels, W.B., 2006. *Impact of Model Skeletonization on Water Distribution Model Parameters as Related to Water Quality and*

- Contaminant Consequence Assessment*. 8th Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium, Cincinnati, Ohio, USA, pp. 1-10, ([doi http://dx.doi.org/10.1061/40941\(247\)64](http://dx.doi.org/10.1061/40941(247)64)).
- Eiger, G., Shamir, U. and Ben-Tal, A., 1994. *Optimal Design of Water Distribution Networks*. *Water Resources Research*, 30(9): 2637-2646.
- Eggenger, C. L. and Polkowski, L. B., 1976. *Network Models and the Impact of Modeling Assumptions*. *J. of the American Water Works Association*, 68(4): 189-196.
- Grayman, W. and Rhee, H., 2000. *Assessment of Skeletonization in Network Models*. *Proceedings of Joint Conference on Water Resource Engineering and Water Resources Planning and Management 2000*, Online Publication Date: 14 September 2004.
- Hamberg, D. and Shamir, U., 1988a. *Schematic Models for Distribution Systems Design I – Combination Concept*. *J. of Water Resources Planning and Management*, 114 (2): 129-140.
- Hamberg, D. and Shamir, U., 1988b. *Schematic Models for Distribution Systems Design II- Continuum Approach*. *J. of Water Resources Planning and Management*, 114 (2): 141-162.
- Hamby, D.M., 1994. *A Review of techniques for parameter sensitivity analysis of environmental models*. *Environmental Monitoring and Assessment*, 32: 135-154.
- Jung, B.S., Boulos, P.F. and Wood, D.J., 2007. *Pitfalls of water distribution model skeletonization for surge analysis*. *J. of the American Water Works Association*, 99: 87-98.
- Kang, D. and Lansey, K., 2011. *Demand and Roughness Estimation in Water Distribution Systems*. *J. of Water Resources Planning and Management*, 137(1):20-30.
- Lamont, P.A., 1981. *Common Pipe Flow Formulas Compared with the Theory of Roughness*. *J. of the American Water Works Association*, 73(5): 274-280.
- Martínez-Solano, J., Iglesias-Rey, P.L., Pérez-García, R. and López-Jiménez, P.A., 2008. *Hydraulic Analysis of Peak Demand in Looped Water Distribution Networks*. *J. of Water Resources Planning and Management*, 134(6):504-510.
- Ormsbee, L. E., 1989. *Implicit Network Calibration*. *J. of Water Resources Planning and Management*, 115(2):243-257.
- Ormsbee, L. and Lingireddy, S., 2000. *Calibration of Hydraulic Network Models*. In: L.W. Mays (Editor), *Water Distribution Systems Handbook*, McGraw-Hill, 14.1-14.23.
- Saldarriaga, J.G., Ochoa, S., Rodríguez, D. and Arbeláez, J., 2008. *Water Distribution Network Skeletonization Using The Resilience Concept*. *Proceedings 10th Annual Water Distribution Systems Analysis Conference*, Kruger National Park, South Africa, 852-864.
- Swamme, P.K. and Sharma, A.K., 2008. *Design of Water Supply Pipe Networks*. John Wiley & Sons, New Jersey, 353 pp.
- USEPA, 1984. *Engineering and Design: Water Supply, Water Distribution, Mobilization Construction*. *Engineering Manual (EM) 1110-3-164*, 56 pp.
- Yannopoulos, St., Vantas, K., Tzimopoulos, C. and Evangellides, C., 2009. *Modeling Distribution System Water Quality with HYDROSIM Model*. *Proceedings EWRA 7th International Conference on Water Resources Conservancy and Risk Reduction Under Uncertainty*, Limassol, Cyprus, 487-494.
- Walski, T.M. and Chase, D.V., 2003. *Assembling a Model*. In: T.M. Walski et al. (Editors), *Advanced Water Distribution Modeling and Management (1st ed.)*. Heastad Press, Waterbury, CT U.S.A., 75-132.
- Walski, T.W., Chase, D.V., Savic, D.A. and Grayman, W., 2003. *Using Models for Water Distribution System Design*. In: T.M. Walski et al. (Editors), *Advanced Water Modeling and Management (1st ed.)*, Haestad Method Inc., Waterbury, U.S.A., 297-391.
- Wu, Z.Y., 2006. *Optimal Calibration Method for Water Distribution Water Quality Model*. *J. of Environmental Science and Health Part A*, 41:1-16.

ΑΥΤΟΜΑΤΗ ΧΑΡΑΞΗ ΥΔΡΟΚΡΙΤΗ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ G.I.S. - ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ **Σταύρος Γιαννόπουλος¹, Χρήστος Χρηστίδης¹, Αθανάσιος Λουκάς²**

¹ Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Τομέας Συγκοινωνιακών και Υδραυλικών Έργων, 54124 Θεσ/νίκη

² Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών,

Πεδίον Άρεως, 38334 Βόλος

giann@vergina.eng.auth.gr, christidisc@hotmail.com, aloukas@civ.uth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία, γίνεται συγκριτική αξιολόγηση των συνηθέστερα χρησιμοποιούμενων προγραμμάτων (ArcHydro, PrePro2002, BASINS V4.0, WSDT, TOPAZ) αυτόματης χάραξης του υδροκρίτη και του υδρογραφικού δικτύου μιας λεκάνης απορροής και των αποτελεσμάτων τους, τόσο μεταξύ τους, όσο και με αυτά που προκύπτουν με την παραδοσιακή μέθοδο χάραξης. Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιούνται, τόσο η ποσοστιαία απόκλιση των υπολογισμένων τιμών μεταξύ τους, όσο και οι νόμοι του Horton για την εξαγωγή συμπερασμάτων ως προς το υδρογραφικό δίκτυο. Επίσης, παρουσιάζονται οι δυνατότητες του κάθε προγράμματος. Η εφαρμογή πραγματοποιήθηκε στη λεκάνη απορροής του Πορταϊκού Ποταμού με έξοδο στην Πύλη, που ανήκει στο υδατικό διαμέρισμα 08 της χώρας και έχει έκταση 136,9 km².

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Γ.Σ.Π., λεκάνη απορροής, υδρογραφικό δίκτυο, λογισμικό αυτόματης χάραξης υδροκρίτη, DEM, ArcHydro Tools, PrePro, BASINS, WSDT, TOPAZ.

AUTOMATIC WATERSHED DELINEATION USING GIS TOOLS – COMPARATIVE EVALUATION

Stavros Yannopoulos¹, Christos Christidis¹, Athanasios Loukas²

¹ Aristotle University of Thessaloniki, School of Rural & Surveying Engineering, Dept. of Transportation and Hydraulic Engineering, GR-54124 Thessaloniki, Greece

² University of Thessaly, Dept. of Civil Engineering,

Pedion Areos, GR-38334 Volos, Greece

giann@vergina.eng.auth.gr, christidisc@hotmail.com, aloukas@civ.uth.gr

ABSTRACT

In the present study, the most commonly used software of automatic watershed and stream delineation (i.e. ArcHydro Tools, PrePro2002, BASINS V4.0, WSDT, TOPAZ) have been comparatively evaluated. The results acquired using the various software have been compared between them and evaluated against the results obtained using the manual delineation method. The results have been evaluated using the percentage difference between the estimates of various watershed geomorphologic parameters obtained by the various methods and software, and the estimates of Horton's laws, for the drainage network. Furthermore, the capabilities for each software are presented. The study watershed is Portaikos River watershed, located in the region of Thessaly and it has an area of 136,9 km².

KEY WORDS: GIS, watershed, stream network, automatic watershed delineation, DEM, ArcHydro Tools, PrePro, BASINS, WSDT, TOPAZ.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε μελέτες που αφορούν στη γεωμορφολογία, στην υδρολογία, στις διαβρώσεις του εδάφους κ.λπ. απαιτούνται η χάραξη του υδροκρίτη, του υδρογραφικού δικτύου και η εξαγωγή των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών της λεκάνης απορροής. Παλαιότερα, η χάραξη του υδροκρίτη των λεκανών απορροής και του υδρογραφικού δικτύου αυτών γινόταν σε αναλογικούς χάρτες (τοπογραφικοί χάρτες με ισοϋψείς καμπύλες και λοιπά χαρακτηριστικά της επιφάνειας του εδάφους) με την παραδοσιακή μέθοδο χάραξης (“Π.Μ.Χ.”), η οποία είναι μια διαδικασία χρονοβόρα και κοπιώδης. Κατά τα τελευταία χρόνια η μέθοδος αυτή έχει αντικατασταθεί από τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών, Γ.Σ.Π. (GIS, Geographical Information Systems).

Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται τα λεγόμενα Ψηφιακά Μοντέλα Εδάφους (Ψ.Μ.Ε.), τα οποία είναι κατάλληλα δομημένα αρχεία υπολογιστή που περιέχουν την υψομετρική πληροφορία. Τα Ψ.Μ.Ε. ανάλογα με τη μορφή της ψηφιακής πληροφορίας που περιέχουν διακρίνονται σε: Ψηφιακά Μοντέλα Υψομέτρου (Ψ.Μ.Υ. ή DEM, Digital Elevation Models) και Τριγωνικά Δίκτυα Αναγλύφου (Τ.Δ.Α. ή TIN, Triangular Irregular Network). Η διαφορά των δύο κατηγοριών μοντέλων έγκειται στην ηλεκτρονική απεικόνιση τους, η οποία είναι ψηφιδωτή (raster) στα μοντέλα DEM και διανυσματική (vector) στα μοντέλα TIN (Γιαννόπουλος κ.α., 2005).

Με την αυτόματη χάραξη λεκανών απορροής από DEM και του υδρογραφικού δικτύου μιας λεκάνης απορροής έχουν ασχοληθεί αρκετοί επιστήμονες. Για παράδειγμα, οι Jenson and Domingue (1988) παρουσίασαν μια τεχνική ανάλυση αποστράγγισης που βοηθά στην οριοθέτηση των λεκανών σε επίπεδα εδάφη, στα οποία η κατεύθυνση της ροής είναι ασαφής λόγω ορυγμάτων, λιμνών ή/και φραγμάτων. Ο Hutchinson (1989) ανέπτυξε μια μορφολογική προσέγγιση στη δημιουργία των DEM και στην οριοθέτηση μιας λεκάνης απορροής, προσέγγιση, που παρουσιάζει κάποια πλεονεκτήματα για χρήση σε υδρολογικά μοντέλα. Οι Jones et al. (1990) χρησιμοποίησαν μια μορφή τριγωνοποίησης σε DEM για να προσδιορίσουν τον υδροκρίτη μιας λεκάνης απορροής και τις γραμμές ροής. Οι Tarboton et al. (1991) εξέτασαν τη σημασία της κλίμακας του χάρτη στην οριοθέτηση, στην επικύρωση και στη χρήση του υδρογραφικού δικτύου που προέρχονται από DEM. Οι Chang and Tsai (1991) εξέτασαν την επίδραση της χωρικής ανάλυσης των DEM στις παραγόμενες κλίσεις και στους χάρτες προσανατολισμού. Ο Freeman (1991) πρότεινε μια μέθοδο οριοθέτησης της λεκάνης απορροής που ενσωματώνει την έννοια της απόκλισης της ροής (divergent flow). Οι Vieux (1993), Vieux and Farajalla (1994), Farajalla and Vieux (1995) ερεύνησαν τις επιπτώσεις του μεγέθους του κελιού (cell) στη χωρική μεταβλητότητα, στην υδραυλική τραχύτητα και στη διήθηση αντιστοιχώς. Οι Tarboton and Ames (2001) παρουσίασαν διάφορους τρόπους που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη χάραξη μιας λεκάνης απορροής και του υδρογραφικού της δικτύου. Οι Alarcon and O’Hara (2006) συνέκριναν τα αποτελέσματα της αυτόματης χάραξης υδροκρίτη σε μια περιοχή με τη χρήση δύο διαφορετικών τύπων ψηφιακού υποβάθρου (IFSAR και SRTM). Οι Martz and Garbrecht (1992), Zhang et al. (2005), Baker et al. (2006) και αρκετοί άλλοι έχουν σχολιάσει την αυτόματη χάραξη του υδροκρίτη μιας λεκάνης απορροής από DEM και των προβλημάτων που σχετίζονται με τη διαδικασία της χάραξης. Διαδικασίες για τη χάραξη του υδρογραφικού δικτύου και της λεκάνης απορροής, καθώς επίσης διόρθωσης σφαλμάτων των DEM λόγω θορύβου υψηλών συχνοτήτων παρουσίασαν οι Garbrecht and Martz (2000), Grimaldi et al. (2007) και αρκετοί άλλοι. Βιβλιογραφική ανασκόπηση των μεθόδων αυτών παρουσιάστηκε από τον Vieux (2004).

Για τη χάραξη του υδροκρίτη μιας λεκάνης απορροής και του υδρογραφικού της δικτύου με βάση τα DEM προαπαιτείται η κατάλληλη επεξεργασία τους. Στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν παρουσιαστεί διάφορες μέθοδοι επεξεργασίας των DEM (Zhang et al.,

2005, Bakker et al., 2006) και διάφοροι αλγόριθμοι (Al-Muqdad and Merkel, 2011). Επίσης, έχουν παρουσιαστεί εμπορικά λογισμικά και λογισμικά ελεύθερης χρήσης με τα οποία μπορεί να γίνει η αυτόματη χάραξη του υδροκρίτη μιας λεκάνης απορροής. Συνεπώς, το ερώτημα που τίθεται είναι, αν υπάρχουν διαφορές στη χάραξη του υδροκρίτη μιας λεκάνης απορροής, του υδρογραφικού της δικτύου και των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών αυτής που προκύπτουν με βάση το ίδιο μεν DEM, αλλά με τη χρήση διαφόρων λογισμικών σε σχέση με την παραδοσιακή μέθοδο χάραξης.

2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η περιοχή μελέτης είναι η λεκάνη απορροής του Πορταϊκού ποταμού από τις πηγές του μέχρι τη φυσική του έξοδο στον οικισμό της Πύλης. Η λεκάνη απορροής του Πορταϊκού ποταμού, που ανήκει στο Υδατικό Διαμέρισμα 08, το οποίο συμπίπτει με το διοικητικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας, αναπτύσσεται στις ανατολικές παρειές της οροσειράς της Πίνδου και είναι η φυσική δίοδος προς τον κάμπο της Θεσσαλίας (Γιαννόπουλος κ.α., 2005). Στο Σχήμα 1 απεικονίζονται τα διοικητικά όρια των νομών της περιφέρειας Θεσσαλίας και με γραμμή κόκκινου χρώματος η θέση της λεκάνης απορροής του Πορταϊκού ποταμού.



Σχήμα 1: Διοικητικά όρια των νομών της περιφέρειας Θεσσαλίας και η θέση της λεκάνης απορροής του Πορταϊκού ποταμού.

3. ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΗΣ ΧΑΡΑΞΗΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ

Με τα προγράμματα αυτόματης χάραξης μπορούν να επιτευχθούν: (α) Η χάραξη του υδροκρίτη και του υδρογραφικού δικτύου μιας λεκάνης απορροής, (β) Η χάραξη των υπολεκανών απορροής, (γ) Η εξαγωγή των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών της λεκάνης απορροής και των υπολεκανών της (εμβαδό, περίμετρος κ.λπ.), (δ) Εξαγωγή των χαρακτηριστικών του υδρογραφικού δικτύου. Από τα προγράμματα αυτόματης χάραξης που έχουν παρουσιαστεί στη βιβλιογραφία, στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν τα εξής:

Arc Hydro Tools

Το λογισμικό Arc Hydro Tools της ESRI αποτελεί μια επέκταση (extension) του προγράμματος ArcGIS της ίδιας εταιρίας. Όλες οι απαραίτητες εργασίες γίνονται στο περιβάλλον εργασίας του ArcGIS, με αποτέλεσμα να μπορούν να χρησιμοποιηθούν και όλα τα εργαλεία του λογισμικού αυτού (Maidment et al., 2002).

PrePro 2002

Το λογισμικό PrePro2002 αποτελεί επέκταση (extension) του προγράμματος ArcGIS της ESRI. Το PrePro2002 είναι ένα πρόγραμμα ελεύθερης χρήσης, το οποίο έχει σχεδιαστεί

με σκοπό την εκτέλεση της βασικής επεξεργασίας των ψηφιακών αρχείων μορφής DEM για την περαιτέρω ανάλυση στο πρόγραμμα HEC-HMS (Olivera and Maidment, 1998).

BASINS V 4.0

Το λογισμικό BASINS (Better Assessment Science Integrating Point and Nonpoint Sources) της USEPA αποτελεί ένα πολυχρηστικό πρόγραμμα περιβαλλοντικής ανάλυσης με σκοπό (USEPA, 2007): α) Τη διερεύνηση των περιβαλλοντικών προβλημάτων. β) Την ανάλυση των περιβαλλοντικών συστημάτων. γ) Τη βοήθεια στη λήψη αποφάσεων. Στις δυνατότητες του BASINS v4.0 περιλαμβάνεται και η αυτόματη χάραξη του υδροκρίτη και του υδρογραφικού δικτύου μιας λεκάνης απορροής, που μπορεί να γίνει με την παραδοσιακή μέθοδο ή και αυτόματα. Από τις δύο αυτές εναλλακτικές δυνατότητες του προγράμματος εκείνο που ενδιαφέρει στη παρούσα εργασία είναι η αυτόματη χάραξη. Το BASINS v4.0 λειτουργεί σε περιβάλλον εργασίας του Mapwindow GIS.

WSDT

Το WSDT (Watershed and Streams Delineation Tool) είναι ένα freeware πρόγραμμα, το οποίο έχει προγραμματιστεί σε γλώσσα Visual Basic στο Texas A&M University και αποτελεί επιπρόσθετη λειτουργία του ArcGIS 8.1 ή νεότερων εκδόσεων (Olivera, 2002).

TOPAZ

Το λογισμικό TOPAZ (TOpographic PArameteriZation) δημιουργήθηκε από τους J. Garbrecht and L.W. Martz το έτος 1992 (Lacroix et al., 2002) και χρησιμοποιείται στην αυτοματοποιημένη ανάλυση της τοπογραφίας περιοχών από DEM, αλλά και σ' ένα πλήθος εφαρμογών που αφορούν στη γεωμορφολογία, στο περιβάλλον και στην τηλεπισκόπηση. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε μια προσαρμοσμένη μορφή του TOPAZ στο λογισμικό WMS (Water Modeling System) v. 8.1, που ενεργοποιείται μέσω μιας διεπαφής.

4. ΒΗΜΑΤΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΟΥ DEM

Όλα τα προγράμματα αυτόματης χάραξης (υδροκρίτη και υδατορρεμάτων) ακολουθούν μια συγκεκριμένη γενική διαδικασία επεξεργασίας του DEM, ώστε στη συνέχεια να γίνει η χάραξη του υδροκρίτη και του υδρογραφικού δικτύου μιας λεκάνης απορροής. Συγκεκριμένα, τα βήματα που ακολουθούνται σε γενικές γραμμές είναι τα εξής (Olivera, 2002):

Βήμα (α). Πλήρωση των εδαφικών κοιλοτήτων. Με τη διαδικασία πλήρωσης των εδαφικών κοιλοτήτων (Fill Sinks) εντοπίζονται και διορθώνονται λάθη στο ψηφιακό μοντέλο εδάφους, τα οποία δημιουργήθηκαν κατά τη δόμηση αυτού.

Βήμα (β): Υπολογισμός της διεύθυνσης ροής. Ο προσδιορισμός της διεύθυνσης ροής (Flow Direction), που συνίσταται στον καθορισμό της διεύθυνσης προς την οποία ρέει το νερό κάθε κελιού του καννάβου, και γίνεται προκειμένου να υπολογιστεί, στη συνέχεια, η συσσώρευση ροής. Ο καθορισμός της διεύθυνσης ροής γίνεται βάσει του αλγόριθμου των οκτώ διευθύνσεων (D8) (Fairfield and Leymarie, 1991), που στηρίζεται στον υπολογισμό για κάθε κελί της κλίσης αυτού με τα οκτώ γειτονικά του κελιά. Η κλίση ισούται με το λόγο της υψομετρικής διαφοράς των κελιών προς την απόστασή τους. Η πιο απότομη κλίση ορίζει και τη διεύθυνση προς την οποία ρέει το νερό του συγκεκριμένου κελιού.

Βήμα (γ): Προσδιορισμός της συσσώρευσης ροής. Ο υπολογισμός της συσσώρευσης ροής (Flow Accumulation) αφορά στον προσδιορισμό, για κάθε κελί του καννάβου, του αριθμού των κελιών που στραγγίζουν σε αυτό.

Βήμα (δ): Καθορισμός υδρογραφικού δικτύου. Ο καθορισμός του υδρογραφικού δικτύου γίνεται βάσει της τιμής της συσσώρευσης ροής. Κριτήριο ένταξης του κάθε κελιού στο υδρογραφικό δίκτυο αποτελεί το όριο “threshold” (κατώφλι) που επιλέγει ο χρήστης. Το όριο αυτό ορίζεται ως αριθμός αποστραγγιζομένων κελιών και αποτελεί την τιμή της συσσώρευσης, την οποία πρέπει να υπερβαίνει ένα κελί, προκειμένου να θεωρηθεί ότι ανήκει

στο υδρογραφικό δίκτυο. Στην παρούσα εργασία για τον καθορισμό του υδρογραφικού δικτύου βάσει της συσσώρευσης ροής, επιλέχθηκαν τρεις διαφορετικές τιμές ως όρια κατωφλιού (54, 100 και 300). Η ελάχιστη τιμή (54) επιλέχθηκε μετά από αλληπάλληλες δοκιμές, προκειμένου το υδρογραφικό δίκτυο που προκύπτει κάθε φορά να ταυτίζεται όσο το δυνατόν, οπτικά καλύτερα, με το υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης απορροής του Πορταϊκού ποταμού, που απεικονίζεται στους αναλογικούς χάρτες κλίμακας 1:50.000 της Γ.Υ.Σ. Οι υπόλοιπες τιμές επιλέχθηκαν αυθαίρετα

Βήμα (ε): Χάραξη ορίων λεκάνης απορροής. Κατά το στάδιο αυτό γίνεται προσδιορισμός των κελιών που στραγγίζουν σε κάθε στόμιο εκροής του καννάβου.

Πέρα από τα ανωτέρω κύρια γενικά βήματα επεξεργασίας ενός αρχείου DEM, που ακολουθούν όλα τα προγράμματα αυτόματης χάραξης, υπάρχουν και διαφορές μεταξύ τους, που αφορούν στις επιπλέον ιδιότητες που μπορούν να διαθέτουν καθένα από αυτά, όπως ταξινόμηση του υδρογραφικού δικτύου, προσθήκη στομίων εκροής κ.λπ.

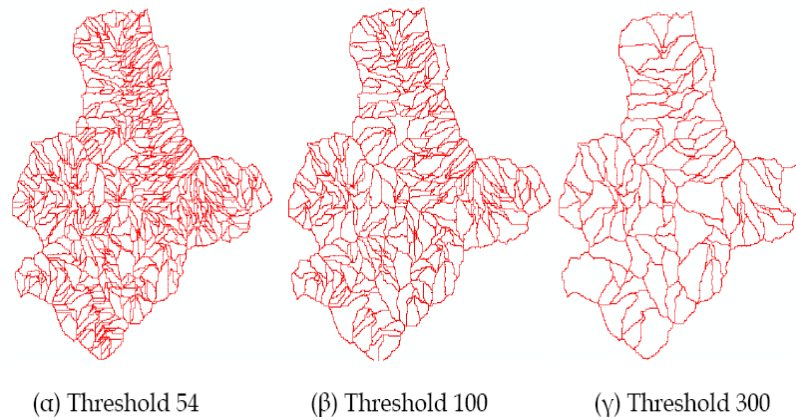
5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Το αρχείο DEM, που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, προέρχεται από ψηφιοποίηση των ισούψων καμπυλών των φύλλων χάρτη (Φ.Χ.) ΚΑΣΤΑΝΕΑ, ΚΑΛΑΜΠΑΚΑ, ΜΟΥΖΑΚΙΟΝ και ΜΥΡΟΦΥΛΛΟΝ κλίμακας 1:50.000 της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού (Γ.Υ.Σ.), που έγινε με τη βοήθεια του λογισμικού ArcGIS v. 9.0 της ESRI. Στη μορφή που προέκυψε το αρχείο αυτό DEM, χωρίς καμία επεξεργασία, έγινε στη συνέχεια η εισαγωγή του στο αντίστοιχο πρόγραμμα αυτόματης χάραξης, στο οποίο έγιναν οι απαραίτητες διεργασίες βελτίωσης και διόρθωσης λαθών (sinks, κ.λπ.) του DEM με τα εργαλεία και τη διαδικασία που προβλέπεται για το συγκεκριμένο λογισμικό. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε περιγράφεται αναλυτικά από τον Χρηστίδης (2010).

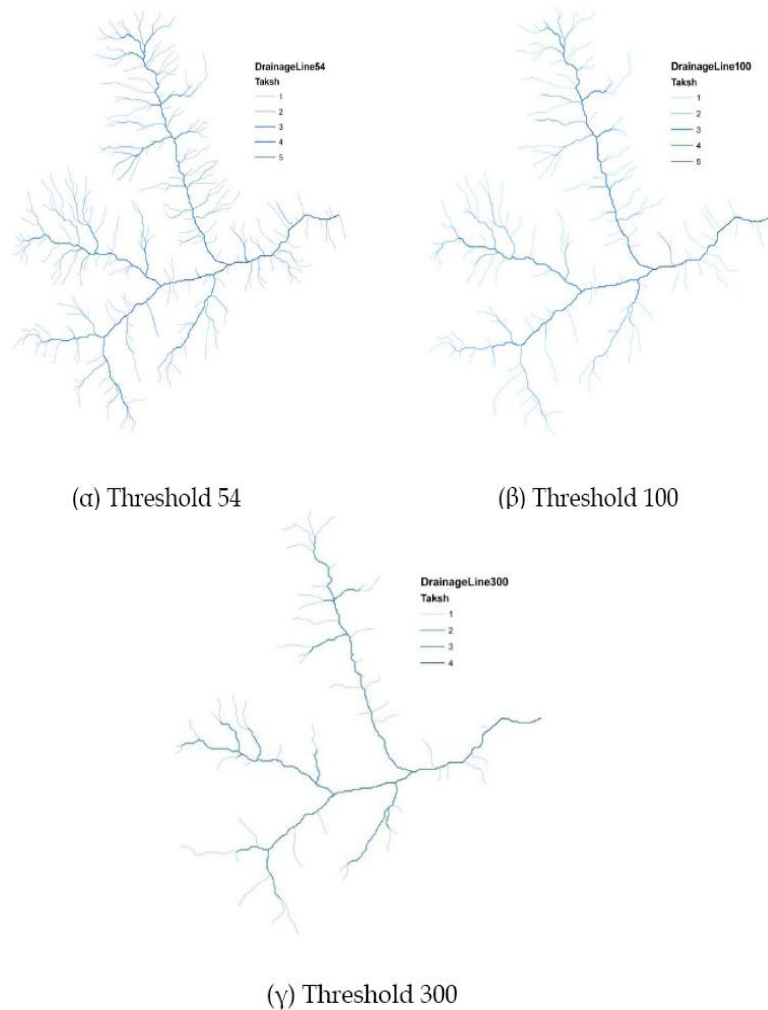
Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν όσον αφορά στη χάραξη του υδροκρίτη και του υδρογραφικού δικτύου της λεκάνης απορροής του Πορταϊκού ποταμού με το καθένα λογισμικό αυτόματης χάραξης που χρησιμοποιήθηκε για τρεις τιμές threshold δηλαδή 54, 100 και 300. Συγκεκριμένα, στα Σχήματα 2, 4, 6 και 8 απεικονίζονται οι λεκάνες απορροής για καθεμία τιμή threshold (κατώφλι) με τα λογισμικά Arc Hydro Tools της ESRI, PrePro 2002, BASINS v. 4.0 και WSDT και στα Σχήματα 3, 5, 7 και 9 τα αντίστοιχα υδρογραφικά δίκτυα. Στο Σχήμα 10 απεικονίζεται η λεκάνη απορροής του Πορταϊκού ποταμού με το TOPAZ για τιμή threshold 0,2 km² και στο Σχήμα 11 το αντίστοιχο υδρογραφικό δίκτυο. Η πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου, όπως στα υπόλοιπα λογισμικά έτσι και στο TOPAZ, εξαρτάται από τη τιμή του threshold. Στο TOPAZ οι μονάδες μέτρησης του threshold είναι σε km², ενώ στα υπόλοιπα λογισμικά σε αριθμό κελιών. Το TOPAZ ως προεπιλεγμένη τιμή έχει τα 10 km², που δεν ανταποκρίνεται για την παρούσα περίπτωση. Μετά από δοκιμές επιλέχθηκε ως βέλτιστη τιμή threshold 0,2 km². Στο Σχήμα 12 απεικονίζεται το ψηφιοποιημένο υδρογραφικό δίκτυο του Πορταϊκού ποταμού από τα Φ.Χ. της Γ.Υ.Σ. κλίμακας 1:50.000.

Ορισμένα από τα προγράμματα (TOPAZ και το BASINS) που χρησιμοποιήθηκαν έχουν τη δυνατότητα αυτόματου υπολογισμού των χαρακτηριστικών του υδροκρίτη και του υδρογραφικού δικτύου (κλίση ρέματος, μήκος μισγάγκειας κ.α.), ενώ τα υπόλοιπα όχι. Γι' αυτά που δεν έχουν παρόμοιες δυνατότητες (Arc Hydro Tools, PrePro2002 και WSDT), ο υπολογισμός του εμβαδού και της περιμέτρου της λεκάνης απορροής έγιναν μέσω του XTools Pro v 5.1, που είναι επέκταση του ArcMap της ESRI. Στα Σχήματα 13 και 14 απεικονίζονται η περίμετρος και το εμβαδό της λεκάνης, όπως προέκυψαν με τα διάφορα λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν. Σημειώνεται ότι κατά τη μέτρηση της περιμέτρου της λεκάνης χρησιμοποιήθηκε το ίδιο βήμα μήκους σε όλες τις περιπτώσεις. Από το Σχήμα 13

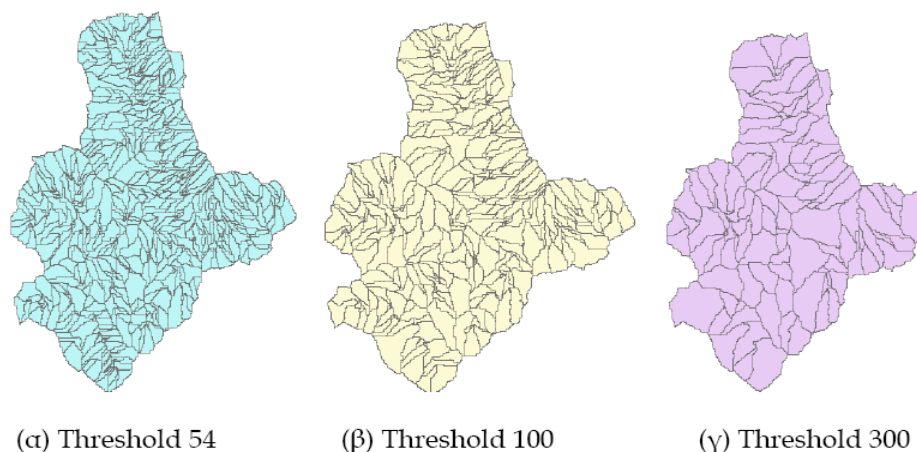
προκύπτει ότι όλα τα προγράμματα αυτόματης χάραξης που χρησιμοποιήθηκαν δίνουν για τη περίμετρο της λεκάνης απορροής του Πορταϊκού ποταμού μεγαλύτερο μήκος απ' ό,τι η παραδοσιακή μέθοδος χάραξης (Π.Μ.Χ.). Συγκεκριμένα, οι διαφορές αυτές κυμαίνονται από 4,27% (BASINS v. 4.0) μέχρι 28,4% (WSDT).



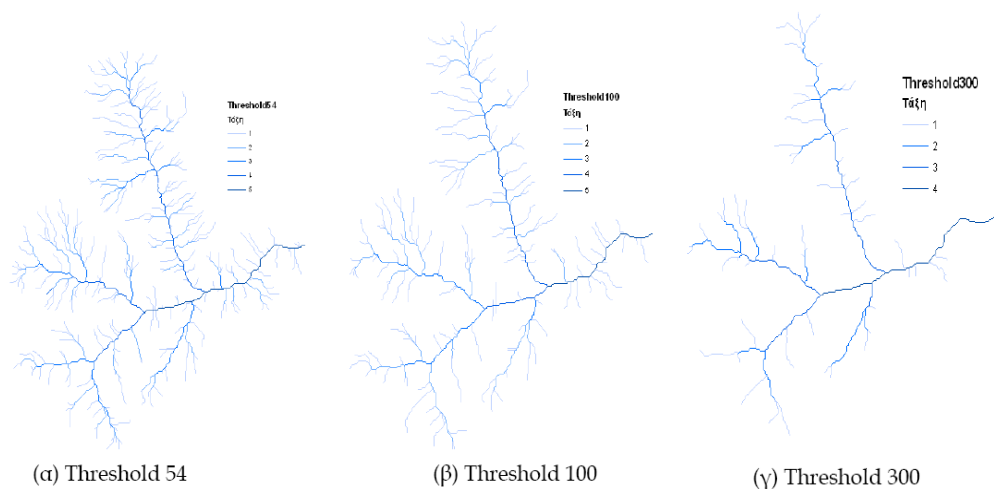
Σχήμα 2: Διανυσματική απεικόνιση των υπολεκανών της λεκάνης απορροής του Πορταϊκού ποταμού για διάφορες τιμές κατωφλιού με το Arc Hydro Tools της ESRI.



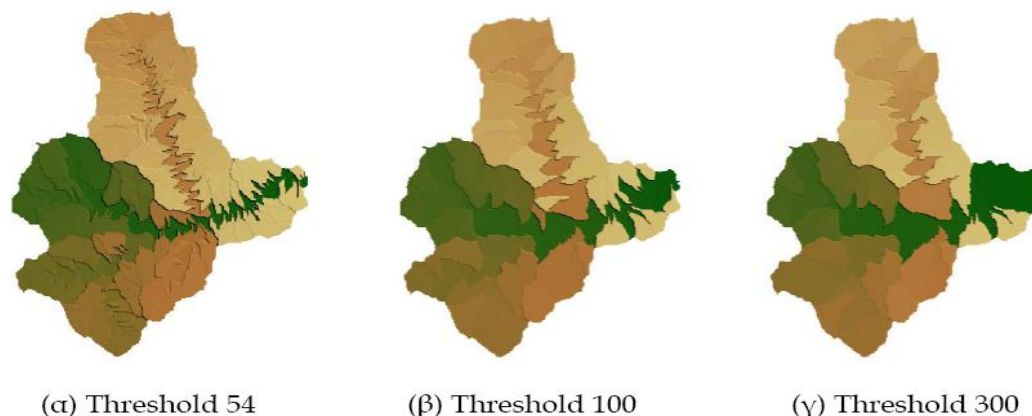
Σχήμα 3: Διανυσματική απεικόνιση υδρογραφικού δικτύου της λεκάνης απορροής του Πορταϊκού ποταμού για διάφορες τιμές κατωφλιού με το Arc Hydro Tools της ESRI.



Σχήμα 4: Διανυσματική απεικόνιση των υπολεκανών της λεκάνης απορροής του Πορταϊκού Ποταμού για διάφορες τιμές κατωφλιού με το PrePro 2002.



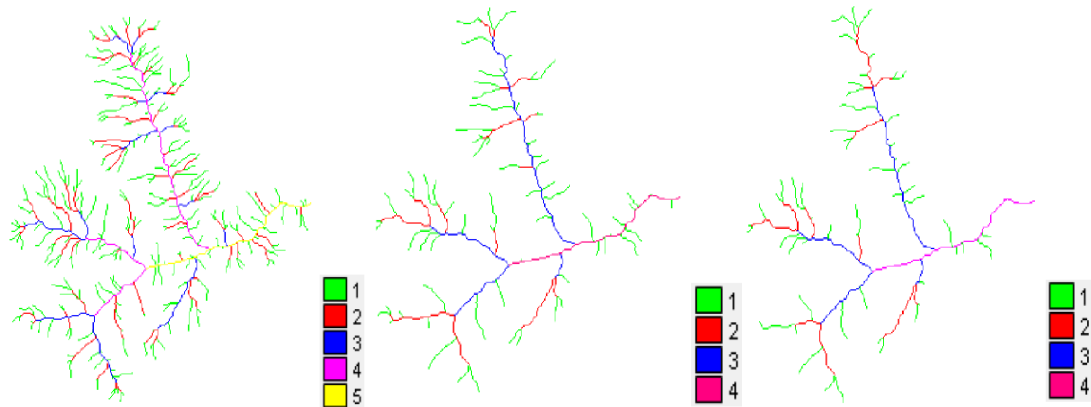
Σχήμα 5: Διανυσματική απεικόνιση υδρογραφικού δικτύου της λεκάνης απορροής του Πορταϊκού ποταμού για διάφορες τιμές κατωφλιού με το PrePro 2002.



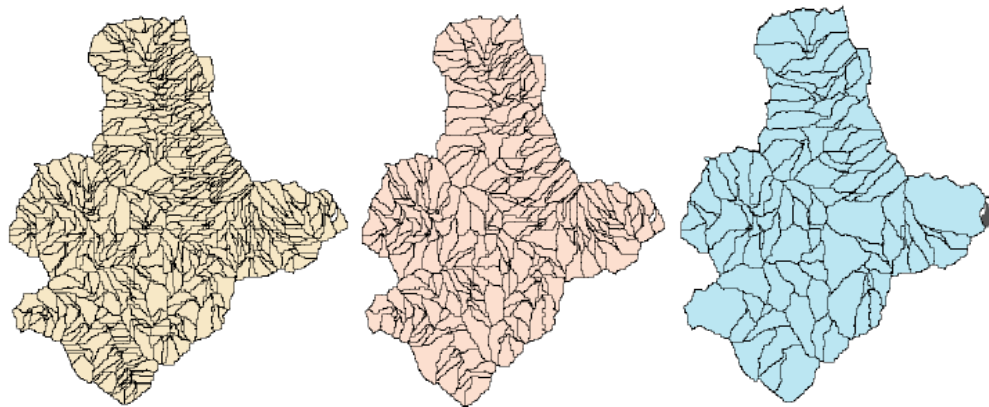
Σχήμα 6: Υπολεκάνες της λεκάνης απορροής του Πορταϊκού ποταμού για διάφορες τιμές κατωφλιού με το BASINS v4.0.

Επίσης, διαπιστώνεται ότι τα λογισμικά Arc Hydro Tools και PrePro 2002 δίνουν ταυτόσημα αποτελέσματα με ελάχιστες αποκλίσεις σε σχέση με το WSDT και το TOPAZ. Το λογισμικό BASINS v 4.0 δίνει μεν μήκος περιμέτρου που προσεγγίζει περισσότερο από

οποιοδήποτε άλλο το μήκος της περιμέτρου που προκύπτει με την Π.Μ.Χ., αλλά σημαντικές διαφορές (~23%) σε σχέση με τα άλλα προγράμματα.



Σχήμα 7: Διανυσματική απεικόνιση των υπολεκανών της λεκάνης απορροής του Πορταϊκού Ποταμού για διάφορες τιμές κατωφλιού με το BASINS v4.0.

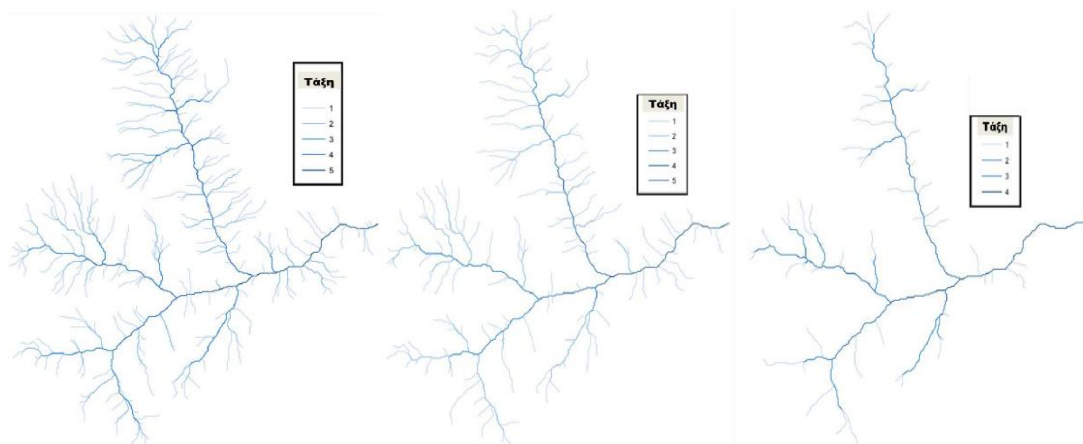


(α) Threshold 54

(β) Threshold 100

(γ) Threshold 300

Σχήμα 8: Διανυσματική απεικόνιση υπολεκανών της λεκάνης απορροής του Πορταϊκού ποταμού για διάφορες τιμές κατωφλιού με το WSDT.

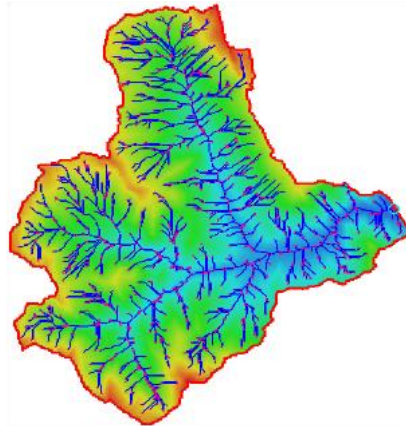


(α) Threshold 54

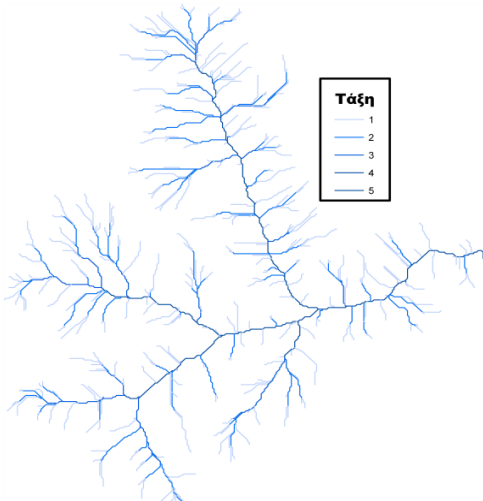
(β) Threshold 100

(γ) Threshold 300

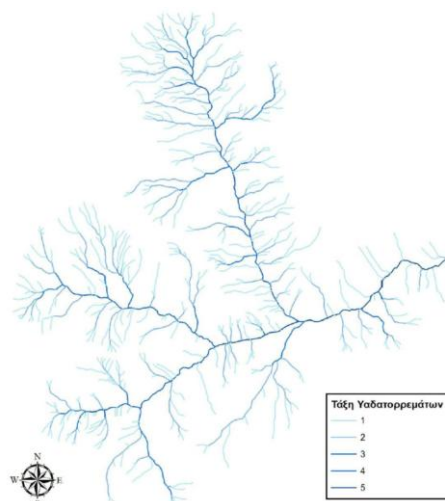
Σχήμα 9: Διανυσματική απεικόνιση του υδρογραφικού δικτύου της λεκάνης απορροής του Πορταϊκού ποταμού για διάφορες τιμές κατωφλιού με το WSDT.



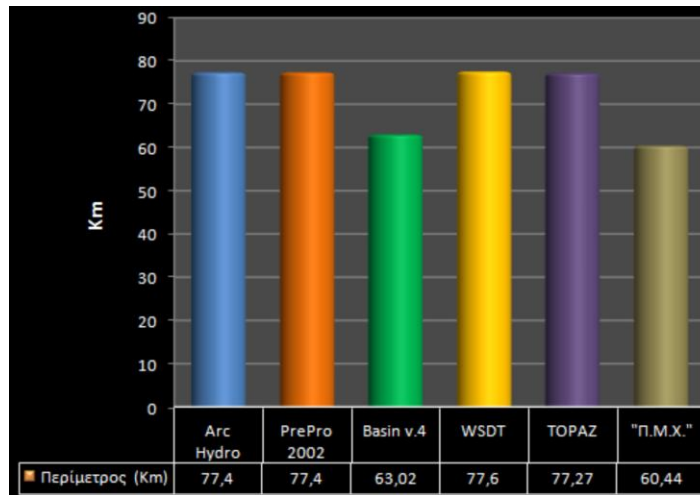
Σχήμα 10: Διανυσματική απεικόνιση της λεκάνης απορροής και του υδρογραφικού δικτύου του Πορταϊκού ποταμού για τιμή κατωφλιού 0,2 km² με το TOPAZ.



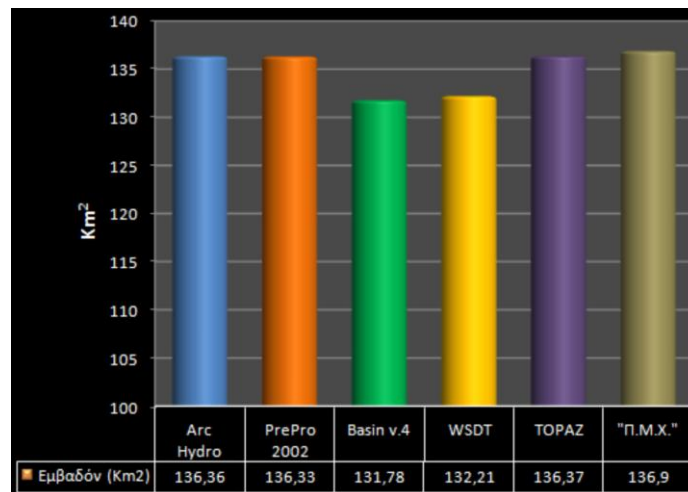
Σχήμα 11: Διανυσματική απεικόνιση του υδρογραφικού δικτύου της λεκάνης απορροής του Πορταϊκού ποταμού για τιμή κατωφλιού 0,2 km² με το TOPAZ.



Σχήμα 12: Ψηφιοποιημένο υδρογραφικό δίκτυο του Πορταϊκού ποταμού από τα Φ.Χ. κλίμακας 1:50.000 της Γ.Υ.Σ.



Σχήμα 13: Η περίμετρος της λεκάνης απορροής του Πορταϊκού ποταμού, όπως προέκυψε με τα διάφορα λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν.



Σχήμα 14: Το εμβαδόν της λεκάνης απορροής του Πορταϊκού ποταμού, όπως προέκυψε με τα διάφορα λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν.

Από το Σχήμα 14 διαπιστώνεται ότι όλα τα λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν δίνουν για το εμβαδόν της λεκάνης απορροής του Πορταϊκού ποταμού μικρότερες τιμές απ' ότι η παραδοσιακή μέθοδος χάραξης. Οι διαφορές αυτές κυμαίνονται από 0,40% περίπου (Arc Hydro Tools, PrePro 2002 και TOPAZ) μέχρι 3,74% (BASINS v 4.0). Επίσης, διαπιστώνεται ότι τα λογισμικά Arc Hydro Tools, PrePro 2002 και TOPAZ δίνουν τιμές που ελάχιστα διαφέρουν μεταξύ τους, ενώ το λογισμικό BASINS v 4.0 δίνει τιμή που είναι η μικρότερη σε σχέση με αυτές που προκύπτουν από τα υπόλοιπα λογισμικά και η οποία παρουσιάζει απόκλιση 3,74% σε σχέση με αυτή της παραδοσιακής μεθόδου χάραξης.

Στον Πίνακα 1 δίνεται ο αριθμός των ρεμάτων κάθε τάξης, όπως προέκυψαν από κάθε λογισμικό αυτόματης χάραξης και της παραδοσιακής μεθόδου χάραξης. Σημειώνεται ότι στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μόνο για την τιμή threshold 54, λόγω της μεγαλύτερης ταύτισης που παρουσίαζαν τα υδρογραφικά δίκτυα αυτόματης χάραξης με το ψηφιοποιημένο υδρογραφικό δίκτυο με την παραδοσιακή μέθοδο. Η κατάταξη των υδρογραφικών δικτύων σε τάξεις έγινε σύμφωνα με τη μέθοδο Strahler (Chow et al., 1988).

Όσον αφορά στην ταξινόμηση του υδρογραφικού δικτύου κατά Strahler, είναι μια διαδικασία που μπορεί να γίνει από ορισμένα λογισμικά (BASINS v. 4.0) αυτόματα μέσα στα πλαίσια των βημάτων επεξεργασίας του DEM, σε αντίθεση με τα υπόλοιπα λογισμικά όπου η

σχετική διαδικασία έγινε με τη χρήση ενός εργαλείου του ArcMap. Παρατηρείται ότι για όλα τα λογισμικά και για τιμή threshold 54 η λεκάνη απορροής του Πορταϊκού ποταμού είναι 5^{ης} τάξης. Επίσης, διαπιστώνεται ότι στις μεγάλες τάξεις ρεμάτων δηλαδή 5^{ης}, 4^{ης} και 3^{ης} παρατηρείται σχεδόν ταύτιση του αριθμού των ρεμάτων. Σημαντικές διαφορές σημειώνονται μόνο ως προς τον αριθμό των ρεμάτων 1^{ης} τάξης. Όμως, η παρατήρηση αυτή δεν αποτελεί πρόβλημα, αφού η χρησιμοποίηση λίγο μικρότερης τιμής threshold μπορεί να το εξαλείψει. Η τιμή threshold, που χρησιμοποιείται κάθε φορά εξαρτάται και από το ανάγλυφο της περιοχής. Συγκεκριμένα, σε λεκάνη με πεδινό ανάγλυφο και μικρές διακυμάνσεις υψομέτρου είναι απαραίτητη η χρήση μικρότερης τιμής threshold σε σχέση με λεκάνη με έντονο ανάγλυφο, έτσι ώστε η ανάλυση του υδρογραφικού δικτύου να είναι μεγαλύτερη.

Πίνακας 1: Αριθμός ρεμάτων της λεκάνης απορροής του Πορταϊκού ποταμού κατά τάξη σύμφωνα με τη μέθοδο Strahler.

Τάξη ρέματος, <i>i</i>	Λογισμικό					
	Arc Hydro Tools	PrePro 2002	BASINS v 4.0	WSDT	TOPAZ	“Π.Μ.Χ.”
1	273	266	268	267	352	413
2	65	61	66	64	88	109
3	15	14	14	14	17	25
4	3	3	3	3	4	3
5	1	1	1	1	1	1

Στον Πίνακα 2 δίνονται ο νόμος του Horton για τον αριθμό και τα μέσα μήκη των ρεμάτων (Chow et al., 1988), η εξίσωση της μεταβολής του αριθμού των ρεμάτων με την τάξη του κλάδου και ο αντίστοιχος συντελεστής προσδιορισμού R^2 , όπως προέκυψαν από καθένα λογισμικό αυτόματης χάραξης. Στον Πίνακα 2, N_i είναι ο αριθμός των ρεμάτων τάξης i και $R_b = N_i/N_{i+1}$ είναι ο λόγος των διακλαδώσεων.

Στον Πίνακα 3 δίνονται κατ' ανάλογο τρόπο, η εξίσωση του μέσου μήκους L_i των κλάδων των ρεμάτων ως προς την τάξη του κλάδου i (Chow et al., 1988) με τον αντίστοιχο συντελεστή προσδιορισμού R^2 και ο λόγος των μηκών $R_L = L_{i+1}/L_i$.

Πίνακας 2: Νόμος του Horton του αριθμού ρεμάτων.

Λογισμικό	N_i		R_b	
ArcHydro Tools	1103,8	$e^{-1,4295i}$	$R^2=0,997$	4,18
PrePro	1033	$e^{-1,4179i}$	$R^2=0,997$	4,13
Basins	1080,9	$e^{-1,4273i}$	$R^2=0,996$	4,17
WSDT	1061,2	$e^{-1,4235i}$	$R^2=0,997$	4,15
TOPAZ	1568	$e^{-1,4818i}$	$R^2=0,999$	4,40
“Π.Μ.Χ.”	2204,7	$e^{-1,564i}$	$R^2=0,991$	4,78

Πίνακας 3: Νόμος του Horton για τα μήκη των ρεμάτων.

Λογισμικό	L_i	R_L
ArcHydro Tools	0,2221 $e^{0,7529i}$	2,123
PrePro	0,2208 $e^{0,7573i}$	2,133
Basins	0,218 $e^{0,7658i}$	2,151
WSDT	0,2159 $e^{0,7599i}$	2,138
TOPAZ	0,1727 $e^{0,8028i}$	2,232
“Π.Μ.Χ.”	0,1599 $e^{0,8252i}$	2,282

Από τους Πίνακες 2 και 3 διαπιστώνεται ικανοποιητική συμφωνία για τους λόγους R_b και R_L που προκύπτουν με τα λογισμικά ArcHydro Tools, PrePro 2002, Basins και WSDT, αλλά και διαφορές ως προς την παραδοσιακή μέθοδο χάραξης. Το λογισμικό TOPAZ δίνει αποτελέσματα όσον αφορά στους λόγους R_b και R_L που πλησιάζουν περισσότερο με αυτά που προκύπτουν με την “Π.Μ.Χ.”.

Η πυκνότητα D_d (km/km^2) του υδρογραφικού δικτύου μιας λεκάνης απορροής, η μέση απόσταση, X_A , από τον υδροκρίτη μέχρι το υδατόρρεμα, η μέση διαδρομή Y_A μιας σταγόνας σε συνθήκες επίγειας ροής μέχρις ότου φθάσει στο υδρογραφικό δίκτυο δίνονται από τις εξισώσεις (Chow et al., 1988):

$$D_d = \frac{\sum L_i}{A} \quad (5.1)$$

$$X_A = \frac{1}{2D_d} \quad (5.2)$$

$$Y_A = \frac{X_A}{2} = \frac{1}{4D_d} \quad (5.3)$$

όπου $\sum L_i$ το ολικό μήκος των ρεμάτων (km) και A το εμβαδόν της λεκάνης απορροής (km^2).

Στο Πίνακα 4 δίνονται τα χαρακτηριστικά στοιχεία της λεκάνης απορροής του Πορταϊκού ποταμού, όπως προέκυψαν από τα διάφορα λογισμικά αυτόματης χάραξης που χρησιμοποιήθηκαν και την “Π.Μ.Χ.”. Διαπιστώνονται για όλα τα χαρακτηριστικά της λεκάνης του Πορταϊκού ποταμού σημαντικές διαφορές μεταξύ των αποτελεσμάτων που προκύπτουν με τα διάφορα λογισμικά αυτόματης χάραξης, τόσο μεταξύ τους, όσο και αυτών που προέκυψαν με την ψηφιοποίηση του υδρογραφικού δικτύου με την παραδοσιακή μέθοδο.

Πίνακας 4: Συνολικό μήκος υδατορρεμάτων, εμβαδό A , πυκνότητα υδρογραφικού δικτύου D_d , μέση απόσταση X_A και μέση διαδρομή Y_A υδρογραφικού δικτύου της λεκάνης απορροής του Πορταϊκού ποταμού που προέκυψαν με τα διάφορα λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν.

Λογισμικό	$\sum L_i$	A	D_d	X_A	Y_A
	(Km)	(Km^2)	(Km^{-1})	(Km)	(Km)
ArcHydro Tools	263,067	136,36	1,929	0,259	0,130
PrePro	252,329	136,33	1,851	0,270	0,135
Basins	248,12	131,78	1,883	0,267	0,133
WSDT	252,339	132,21	1,909	0,262	0,131
TOPAZ	286,897	136,37	2,104	0,238	0,119
“Π. Μ. Χ.”	327,132	136,9	2,403	0,206	0,103

Ειδικότερα, όσον αφορά στο συνολικό μήκος του υδρογραφικού δικτύου οι διαφορές κυμαίνονται από 12,3% (TOPAZ) μέχρι 24,15% (Basins v. 4.0), στην πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου από 13,41% (TOPAZ) μέχρι 23,83% (PrePro 2002), στη μέση απόσταση X_A από -15,51% (TOPAZ) μέχρι -31,3% (PrePro 2002) και τέλος, στη μέση διαδρομή Y_A της σταγόνας από -15,51% (TOPAZ) μέχρι -31,3% (PrePro 2002). Σημειώνεται σε γενικές γραμμές και για όλα τα χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής το TOPAZ δίνει αποτελέσματα που προσεγγίζουν περισσότερο με αυτά που προκύπτουν με τη “Π.Μ.Χ.”.

Προφανώς, τα παραπάνω συμπεράσματα δεν μπορούν να γενικευτούν, γιατί τα χαρακτηριστικά μιας λεκάνης απορροής εξαρτώνται και από άλλους παράγοντες, όπως είναι

π.χ. το σχήμα κ.λπ. Είναι, όμως, άξια προσοχής και θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη σε σχετικές μελέτες.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία αξιολογήθηκαν τα προγράμματα αυτόματης χάραξης του υδροκρίτη και του υδρογραφικού δικτύου μιας λεκάνης απορροής που προκύπτουν με διάφορα εμπορικά και μη προγράμματα αυτόματης χάραξης, συγκριτικά με αυτά που προκύπτουν με την παραδοσιακή μέθοδο χάραξης (“Π.Μ.Χ.”). Διαπιστώθηκε ότι τα περισσότερα προγράμματα έχουν τις ίδιες δυνατότητες επεξεργασίας του DEM και ότι όλα χρησιμοποιούν για τον προσδιορισμό της διεύθυνσης ροής τον αλγόριθμο των 8 διευθύνσεων (D8) (Fairfield, and Leymarie, 1991). Επίσης, διαπιστώθηκε ότι τα βήματα επεξεργασίας του αρχείου DEM, που ακολουθούν είναι τα ίδια με μόνη διαφορά τις περαιτέρω δυνατότητες κάποιων προγραμμάτων, όπως αυτή του BASINS v. 4.0 που μπορεί και κατατάσσει αυτόματα το υδρογραφικό δίκτυο κατά Strahler. Ακόμη, μια άλλη δυνατότητα είναι αυτή που έχει το TOPAZ, το οποίο μπορεί να υπολογίσει όλα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, τόσο της λεκάνης απορροής, όσο και του υδρογραφικού δικτύου. Οι διαφορές στα αποτελέσματα που παρουσιάζουν τα προγράμματα αυτόματης χάραξης δεν θεωρούνται σημαντικές, εφόσον πρόκειται να χρησιμοποιηθούν για υδρολογική προσομοίωση. Στην παρούσα εργασία, λόγω του ότι το ψηφιακό μοντέλο εδάφους προοριζόταν για υδρολογική προσομοίωση, δημιουργήθηκε από χαρτογραφικό υπόβαθρο κλίμακας (1:50.000) το οποίο και ικανοποιεί τις απαιτήσεις ακρίβειας (Χρηστίδης, 2010). Εφόσον, όμως πρόκειται να χρησιμοποιηθούν τα λογισμικά αυτά για εργασίες με μεγαλύτερες απαιτήσεις σε ακρίβεια, τότε θα πρέπει να χρησιμοποιούνται αρχεία DEM μεγαλύτερης ακρίβειας, τα οποία να έχουν προκύψει από χάρτες μεγαλύτερης κλίμακας (π.χ. 1:5.000) και κατά τη δόμηση του DEM να χρησιμοποιείται μικρότερο μέγεθος κελιού.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Al-Muqdad, S.W. and Merkel, B.J., 2011. *Automated Watershed Evaluation of Flat Terrain*. Journal of Water Resource and Protection, 3: 892-903.
- Alarcon, V.J. and O’Hara, C., 2006. *Using IFSAR and SRTM Elevation Data for Watershed Delineation of a Coastal Watershed*. Proceedings MAPPS/ASPRS 2006 Fall Conference, November 6 – 10, San Antonio, Texas. Available at: <http://www.asprs.org/a/publications/proceedings/fall2006/0001.pdf>
- Baker, M.E., Weller, D.E., and Jordan, T.E., 2006. *Comparison of Automated Watershed Delineations: Effects on Land Cover Areas, Percentages, and Relationships to Nutrient Discharge*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 72(2): 159–168.
- Chang, K. and Tsai, B., 1991. *The Effect of DEM Resolution on Slope and Aspect mapping*. Cartography and Geographic Information Systems, 18(1): 69-77.
- Chow, V.T., Maidment, D.R. and Mays, L.W., 1988. *Applied Hydrology*. McGraw-Hill International Editions, 572 pp.
- Farajalla, N. S. and Vieux, B. E., 1995. *Capturing the Essential Spatial Variability in Distributed Hydrologic Modelling: Infiltration Parameters*. Hydrol Process., 9(1):55-68.
- Fairfield, J. and Leymarie, P., 1991. *Drainage Networks from Grid Digital Elevation Models*. Water Resources Research, 30 (6): 1681-1692.
- Freeman, T.G., 1991. *Calculating Catchment Area with Divergent Flow Based on a Regular Grid*. Computers and Geosciences, 17(3): 413-422.

- Garbrecht, J. and Martz, L.W., 2000. *Digital Elevation Model Issues in Water Resources Modeling*. In: D. Maidment and D. Djokic (Editors), *Hydrologic and Hydraulic Modeling Support with Geographic Information Systems*, ESRI Press, pp. 1-27.
- Grimaldi, S., Nardi, F., Di Benedetto, F., Istanbuluoglu, E. and Bras, R.L., 2007. *A physically-based method for removing pits in digital elevation models*. *Advances in Water Resources*, 30: 2151–2158.
- Hutchinson, M. F., 1989. *A New Procedure for Gridding Elevation and Stream Line Data with Automated Removal of Spurious Pits*. *Journal of Hydrology*, 106:211-232.
- Jenson, S.K. and Domingue, J.O., 1988. *Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis*. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54(11):1593-1600.
- Jones, N. L., Wright, S. G. and Maidment, D. R., 1990. *Watershed Delineation with Triangle-Based Terrain Models*. *J. Hydr. Engrg., ASCE*, 116(10):1232- 1251.
- Lacroix, M.P., Martz, L.W., Kite, G.W. and Garbrecht, J., 2002. *Using Digital Terrain Analysis Modeling Techniques for the Parameterization of a Hydrologic Model*. *Environmental Modelling and Software*, 17: 127–136.
- Maidment, D., Morehouse, S. and Grise, S., 2002. *Arc Hydro Framework*. In: D.R. Maidment (editor), *Arc Hydro GIS for Water Resources*. ESRI Press, 13-32.
- Martz, L. W. and Garbrecht, J., 1992. *Numerical Definition of Drainage Network and Subcatchment Areas from Digital Elevation Models*. *Computers and Geosciences* 18(6):747-761.
- Olivera, F. and Maidment, D., 1998. *HEC-PrePro v. 2.0: An ArcView Pre-Processor for HEC's Hydrologic Modeling System*. Proceedings of the 18th ESRI International Users Conference. San Diego, California. Available at: <http://www.cwrw.utexas.edu/gis/gishyd98/runoff/webfiles/esri98/p400.htm>
- Olivera, F., 2002. *Watershed and Stream Delineation Tool*. CVEN689 - Applications of GIS to Civil Engineering. Department of Civil Engineering. Texas A&M University. Texas, U.S.A.
- Tarboton, D. G., Bras, R. L. and Rodriguez-Iturbe, I. R., 1991. *On the Extraction of Channel Networks from Digital Elevation Data*. *Hydrol. Process.*, 5(1): 81-100.
- Tarboton, D. G. and Ames, D. P., 2001. *Advances in the Mapping of Flow Networks from Digital Elevation Data*. In: *World Water and Environmental Resources Congress*, Orlando, Florida, May 20-24, ASCE.
- USEPA, 2007. *BASINS version 4.0 User's Manual* (Update 2 – March 2008). Office of Water, United States Environmental Protection Agency, EPA-823-C-07-001.
- Vieux, B. E., 1993. *DEM Aggregation and Smoothing Effects on Surface Runoff Modeling*. ASCE, *J. of Computing in Civil Engineering*, Special Issue on Geographic Information Analysis., 7(3):310-338.
- Vieux, B. E. and Farajalla, N. S., 1994. *Capturing the Essential Spatial Variability in Distributed Hydrological Modeling: Hydraulic Roughness*. *J. Hydrol. Process*, 8:221-236.
- Vieux, B. E., 2004. *Distributed Hydrologic Modeling Using GIS* (2nd ed.). Springer Academic Publ., 293 pp.
- Zhang, W., Fu, C. and Yan, X., 2005. *Automatic Watershed Delineation for a Complicated Terrain in the Heihe River Basin, Northwestern China*. *Proc. Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS '05*. IEEE International, pp. 2347 - 2350.
- Γιαννόπουλος, Σ., Κατσή, Α., Παπαμιχαήλ, Δ., και Τζιμόπουλος, Χρ., 2005. *Προσδιορισμός των Γεωμορφολογικών Χαρακτηριστικών της Λεκάνης του Πορταϊκού Ποταμού με το λογισμικό WMS*. Πρακτικά 5^{ου} Εθνικού Συνεδρίου της Ε.Ε.Δ.Υ.Π., Ξάνθη, 169-176.
- Χρηστίδης, Χ., 2010. *Διερεύνηση του μετασχηματισμού της βροχής σε απορροή με τη μέθοδο του στιγμιαίου Μοναδιαίου υδρογραφήματος του Clark και με χρήση GIS. Εφαρμογή στη λεκάνη απορροής του Πορταϊκού ποταμού*. Μεταπτυχιακή Διατριβή. Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών Α.Π.Θ., 276 σελ.

ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΥΠΟ ΠΙΕΣΗ ΑΡΔΕΥΤΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΜΕ ΑΣΑΦΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥΣ

Π.Χ. Κανάκης¹, Δ.Μ. Παπαμιχαήλ², Π.Ε. Γεωργίου³

Τομέας Εγγείων Βελτιώσεων, Εδαφολογίας και Γεωργικής Μηχανικής
Γεωπονική Σχολή Α.Π.Θ., 54124 Θεσσαλονίκη
¹kanakisp@gmail.com, ²papamich@agro.auth.gr, ³pantaz@agro.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η οικονομική βελτιστοποίηση ενός συλλογικού υπό πίεση αρδευτικού δικτύου που βρίσκεται στην περιοχή των Ν. Κερδυλίων του Ν. Σερρών και λειτουργεί με ελεύθερη ζήτηση και η ανάλυση λειτουργίας του. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του Ασαφούς Γραμμικού Προγραμματισμού για το σχεδιασμό του και το λογισμικό COPAM για την ανάλυση λειτουργίας του. Η ασάφεια ενσωματώθηκε στις απαιτούμενες πιέσεις στα υδροστόμια. Το δίκτυο που προέκυψε είναι ιδιαίτερα ευέλικτο όσον αφορά την προσαρμογή του σε μελλοντικές συνθήκες λειτουργίας, διαφορετικές από αυτές που σχεδιάστηκε. Για το λόγο αυτό έγινε ανάλυση της υδραυλικής επάρκειας του δικτύου για διάφορα σενάρια αύξησης της πίεσης και της παροχής. Επιπλέον, έγινε σύγκριση της απόδοσης του δικτύου που σχεδιάστηκε με τον ασαφή γραμμικό προγραμματισμό και αυτού που σχεδιάστηκε με την κλασική μέθοδο του Γραμμικού Προγραμματισμού.

OPTIMIZATION OF PRESSURIZED IRRIGATION NETWORKS USING FUZZY LINEAR PROGRAMMING AND PERFORMANCE ANALYSIS

P.C. Kanakis¹, D.M. Papamichail², P.E. Georgiou³

Department of Hydraulics, Soil Science and Agricultural Engineering
Faculty of Agriculture, A.U.Th., 54124 Thessaloniki
¹kanakisp@gmail.com, ²papamich@agro.auth.gr, ³pantaz@agro.auth.gr

ABSTRACT

The goal of this paper is the cost optimization of an on demand collective pressurized irrigation network located in the region of N. Kerdylia in the Prefecture of Serres and its performance analysis. For this aim, the Fuzzy Linear Programming was used as optimization method and the computer program COPAM for the performance analysis of the network. The fuzziness of the method was integrated into the pressure requirements constraints at the hydrants. The resulted network is very flexible regarding its adaptation in future operating conditions, different from the designed ones. To this effect, the behavior of the network in a possible increase in operation requirements was studied. The method was compared to the classic method of Linear Programming in terms of design cost and hydraulic performance of the network.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το πρόβλημα του βέλτιστου σχεδιασμού ενός αρδευτικού δικτύου περιλαμβάνει τον υπολογισμό των παροχών και την επιλογή των κατάλληλων διαμέτρων των αγωγών, με τρόπο ώστε το συνολικό κόστος να είναι ελάχιστο και επαρκής η υδραυλική συμπεριφορά του δικτύου. Οι τεχνικές βελτιστοποίησης που αναπτύχθηκαν κατά καιρούς διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: α) αριθμητικές και β) φυσικές. Οι κυριότερες αριθμητικές μέθοδοι είναι η Ασυνεχής μέθοδος του Γραμμικού Προγραμματισμού (Karmeli et al., 1968), η Συνεχής μέθοδος του μη Γραμμικού Προγραμματισμού (Swamee et al., 1973; Theocharis et al., 2010), η Ασυνεχής μέθοδος του Δυναμικού Προγραμματισμού (Liang, 1971) και η Ασυνεχής μέθοδος του Labye (Labye et al., 1988). Οι κυριότερες φυσικές μέθοδοι είναι οι Γενετικοί Αλγόριθμοι (Gupta et al., 1999), ο Αλγόριθμος Προσομοιωμένης Ανόπτησης (Cunha and Sousa, 1999) και οι Αλγόριθμοι βελτιστοποίησης Αποικίας Μυρμηγκιών (Zecchin et al., 2006).

Η θεωρία της ασαφούς λογικής εισήχθη από τον Zadeh (1965) στην προσπάθειά του να ενσωματώσει την ασάφεια και την αμφιβολία στη λήψη αποφάσεων και στη θεωρία ελέγχου. Έκτοτε υπάρχει μία ευρύτατη εφαρμογή της μεθόδου σε πολλά προβλήματα και ειδικότερα σε προβλήματα λήψης αποφάσεων. Η μέθοδος του Ασαφούς Γραμμικού Προγραμματισμού (Α.Γ.Π.) (Fuzzy Linear Programming) και γενικότερα της ασαφούς λογικής, χρησιμοποιήθηκε για το σχεδιασμό και την ανάλυση απόδοσης δικτύων ύδρευσης (Xu and Goulter, 1999; Bhave and Gupta, 2004; Gupta and Bhave, 2007; Spiliotis and Tsakiris, 2012). Τα τελευταία χρόνια, η μέθοδος του Α.Γ.Π. χρησιμοποιήθηκε για το σχεδιασμό υπό πίεση συλλογικών αρδευτικών δικτύων (Σπηλιώτης και Τσακίρης, 2006; Spiliotis and Tsakiris, 2007; Κανάκης, 2010). Η μέθοδος αυτή διαφοροποιείται έναντι των άλλων μεθόδων με την εισαγωγή ασάφειας είτε στην αντικειμενική συνάρτηση είτε στους περιορισμούς. Η πιο συνήθης περίπτωση είναι η χρησιμοποίηση ασάφειας (fuzziness) στην απαιτούμενη πίεση των υδροληψιών, η οποία υιοθετείται στην εργασία αυτή. Ο Lamaddalena (1997) και οι Lamaddalena and Sagardoy (2000) παρουσίασαν το πρόγραμμα COPAM (Combined Optimization and Performance Analysis Model), το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για τη βελτιστοποίηση όσο και για την ανάλυση της υδραυλικής απόδοσης των υπό πίεση αρδευτικών δικτύων, μέσω δύο μοντέλων που ενσωματώνει, του ICARE (CTGREF, 1979) και του AKLA (Lamaddalena, 1997).

Τα υπό πίεση αρδευτικά δίκτυα που λειτουργούν με ελεύθερη ζήτηση είναι σχεδιασμένα έτσι ώστε η πίεση σε όλα τα υδροστόμια να είναι ίση ή μεγαλύτερη από την ελάχιστη απαιτούμενη πίεση που καθορίζεται στο στάδιο του σχεδιασμού (Labye et al., 1988; Lamaddalena, 1997). Πιθανές αλλαγές στις απαιτήσεις πίεσης μπορεί να συμβούν στο μέλλον λόγω αλλαγών στα συστήματα άρδευσης, αποφάσεων των διαχειριστών, αλλαγών στις πρακτικές και τη συμπεριφορά των χρηστών ή τις μελλοντικές τάσεις που σχετίζονται με την αποτελεσματική εφαρμογή του νερού άρδευσης. Τέτοιες αλλαγές μπορεί να επιφέρουν διαφορετικές απαιτήσεις πίεσης στα υδροστόμια, με αποτέλεσμα να εμφανιστούν προβλήματα λειτουργίας του δικτύου (Spiliotis and Tsakiris, 2007). Στην Ελλάδα, η εμπειρία και η έρευνα (Στεφοπούλου και Δέρκας, 2011) έχουν δείξει ότι πολλά αρδευτικά υπό πίεση δίκτυα μετά από μερικά χρόνια χρήσης, έχουν μεταβληθεί αυθαίρετα από τους χρήστες ή τους διαχειριστές. Συνήθως είτε εγκαθίστανται πρόσθετα υδροστόμια είτε αφαιρούνται ρυθμιστές πίεσης και παροχής. Αυτά έχουν ως αποτέλεσμα το δίκτυο να λειτουργεί με διαφορετικές απαιτήσεις από τις σχεδιαζόμενες. Με τη μέθοδο του Ασαφούς Γραμμικού Προγραμματισμού δίνεται η δυνατότητα, προβλέποντας αυτές τις πιθανές αλλαγές, να σχεδιαστεί ένα δίκτυο το οποίο θα μπορεί να ανταποκριθεί σε τέτοιες απαιτήσεις.

Σκοπός της εργασίας είναι (α) η εφαρμογή των μεθόδων του Γραμμικού Προγραμματισμού (Γ.Π.) και του Ασαφούς Γραμμικού Προγραμματισμού (Α.Γ.Π.) για τη βελτιστοποίηση του κλειστού υπό πίεση αρδευτικού δικτύου των Ν. Κερδυλίων, (β) η ανάλυση απόδοσης με το πρόγραμμα COPAM των δικτύων που σχεδιάστηκαν με τις δύο μεθόδους και (γ) η συγκριτική αξιολόγηση της υδραυλικής απόδοσης των δικτύων υπό διάφορες συνθήκες απαιτήσεων πίεσης και παροχής.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1. ΑΣΑΦΗΣ ΓΡΑΜΜΙΚΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ

Το πρόβλημα βελτιστοποίησης ενός συλλογικού αρδευτικού δικτύου με την κλασική μέθοδο του γραμμικού προγραμματισμού διαμορφώνεται από τις σχέσεις:

$$\min F = \sum_{i=1}^{N_1} C_{1,i} \cdot X_{1,i} + \sum_{i=1}^{N_2} C_{2,i} \cdot X_{2,i} + \dots + \sum_{i=1}^{N_M} C_{M,i} \cdot X_{M,i} \quad (2.1)$$

υπό τους περιορισμούς:

$$\sum_{i=1}^{N_1} X_{1,i} = L_1, \sum_{i=1}^{N_2} X_{2,i} = L_2, \dots, \sum_{i=1}^{N_M} X_{M,i} = L_M \quad (2.2)$$

$$\sum_{i=1}^{N_1} \Delta h_{1,i} \leq Z_0 - Z_1 - H_{1,\min}, \dots, \sum_{i=1}^{N_M} \Delta h_{M,i} \leq Z_0 - Z_M - H_{M,\min} \quad (2.3)$$

$$X_{1,i}, X_{2,i}, \dots, X_{M,i} \geq 0 \quad (2.4)$$

όπου: 1, 2, ..., M ο αριθμός των κλάδων του δικτύου, i είναι ο δείκτης της διαμέτρου, N_1, N_2, \dots, N_M ο αριθμός των πιθανών διαμέτρων για κάθε κλάδο, $C_{1,i}, C_{2,i}, \dots, C_{M,i}$ το κόστος των αγωγών 1,2,...M με διάμετρο $D_{1,i}, D_{2,i}, \dots, D_{M,i}$ και μήκος $X_{1,i}, X_{2,i}, \dots, X_{M,i}$ αντίστοιχα, L_1, L_2, \dots, L_M το μήκος των κλάδων 1, 2, ..., M, $\Delta h_{M,i}$ οι απώλειες φορτίου από την κεφαλή του δικτύου μέχρι τον κόμβο M με την διάμετρο i, Z_M το πιεζομετρικό ύψος του κόμβου M, $H_{M,\min}$ το ελάχιστο απαιτούμενο φορτίο στον κόμβο M και Z_0 είναι το πιεζομετρικό ύψος στην κεφαλή του δικτύου. Η διαφοροποίηση του Α.Γ.Π. από τον κλασικό Γ.Π. είναι πως η ασάφεια ενσωματώνεται στους περιορισμούς απωλειών φορτίου. Αυτοί οι περιορισμοί μπορούν να εκφραστούν με μία γραμμική, μη φθίνουσα, ημι-τριγωνική συνάρτηση συμμετοχής που εφαρμόζεται σε κάθε κόμβο και δίνεται από τη σχέση (Spiliotis and Tsakiris, 2007):

$$\mu_{M,\min} = \begin{cases} 1 - \frac{H_{M,\min} - H_M}{t_n} & \text{αν } H_{M,\min} - t_n \leq H_M \leq H_{M,\min} \\ 1 & \text{αν } H_M \geq H_{M,\min} \\ 0 & \text{αν } H_M \leq H_{M,\min} - t_n \end{cases} \quad t_n \geq 0 \quad (2.5)$$

όπου: H_M είναι το φορτίο στον κόμβο M, t_n είναι το εύρος του ασαφούς περιορισμού και τα άλλα είναι όπως ορίστηκαν προηγούμενα. Επίσης, για την ελαχιστοποίηση του κόστους της αντικειμενικής συνάρτησης, χρησιμοποιείται μία γραμμική, μη αύξουσα, ημι-τριγωνική συνάρτηση συμμετοχής μ_c , η οποία εκφράζει ότι η τιμή F είναι ασαφής

μικρότερη από μία τιμή F^0 και ασαφώς μεγαλύτερη από μία τιμή F^1 (Zimmermann, 1987; Rommelfanger, 1996; Spiliotis and Tsakiris, 2007):

$$\mu_c(X) = \begin{cases} 1 & \text{αν } F(X) \leq F^1 \\ \frac{F^0 - F(X)}{F^0 - F^1} & \text{αν } F^1 < F(X) < F^0 \\ 0 & \text{αν } F^0 \leq F(X) \end{cases} \quad (2.6)$$

Για την επίλυση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης με τη μέθοδο του Α.Γ.Π., ενός υπό πίεση συλλογικού αρδευτικού δικτύου, ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία (Spiliotis and Tsakiris, 2007):

- Αρχικά ορίζεται το εύρος των παραμέτρων, συμπεριλαμβάνοντας την επιλογή των κατάλληλων ορίων για τους ασαφείς περιορισμούς.

- Επιλύονται δύο προβλήματα κλασικού Γ.Π. ώστε να προσδιοριστούν οι οριακές λύσεις. Το ένα πρόβλημα ονομάζεται *σταθερό (strict)* και το άλλο *ευέλικτο (flexible)*, σε αντιστοιχία με τους περιορισμούς. Το σταθερό πρόβλημα είναι ίδιο με το κλασικό πρόβλημα του Γ.Π. Το ευέλικτο πρόβλημα είναι ίδιο με το σταθερό πρόβλημα, αλλά έχει ενσωματωθεί το εύρος της ασάφειας t_n στους περιορισμούς απωλειών φορτίου.

- Αν X^1 και X^0 είναι οι λύσεις για το σταθερό και το ευέλικτο πρόβλημα αντίστοιχα, τότε ορίζονται οι σχέσεις:

$$cX^1 = F^1 \quad \text{και} \quad cX^0 = F^0 \quad (2.7)$$

- Στη συνέχεια γίνεται η διαμόρφωση των συναρτήσεων συμμετοχής. Με τις τιμές F^1 και F^0 μπορεί να κατασκευαστεί η συνάρτηση συμμετοχής για την αντικειμενική συνάρτηση [σχέση (2.6)]. Με τις τιμές του εύρους ασάφειας (t_n) και το ελάχιστο επιτρεπόμενο φορτίο σε κάθε υδροστόμιο, κατασκευάζονται οι συναρτήσεις συμμετοχής των ασαφών περιορισμών πίεσης [σχέση (2.5)].

- Το επόμενο βήμα περιλαμβάνει την τελική διατύπωση του προβλήματος. Για να επιτευχθεί μία κοινή συμβιβαστική λύση, η συνολική ικανοποίηση όλων των παραμέτρων για τη διαδικασία λήψης απόφασης μπορεί να περιγραφεί με τη χρήση της min-τομής από τη σχέση (Rommelfanger, 1996):

$$D(X) = \min[\mu_c(X), \mu_1(X), \dots, \mu_n(X), \dots, \mu_M(X)] \quad (2.8)$$

όπου: $D(X)$ είναι το ασαφές σύνολο απόφασης.

Προκειμένου να επιτευχθεί μια κλασική απόφαση (κλασικός αριθμός), προτείνεται η επιλογή της λύσης που δίνει τη μέγιστη τιμή για το σύνολο της απόφασης, με χρήση της σύνθεσης των συναρτήσεων (max-min operator) (Klir and Yuan, 1995; Ross, 2004; Spiliotis and Tsakiris, 2007):

$$\max_{X \geq 0} \min[\mu_c(X), \mu_1(X), \dots, \mu_n(X), \dots, \mu_M(X)] \quad (2.9)$$

Με τη χρήση της βοηθητικής μεταβλητής a , το πρόβλημα βελτιστοποίησης γίνεται (Rommelfanger, 1996):

$$\max a \quad (2.10)$$

υπό τους περιορισμούς:

$$\sum_{i=1}^{N_1} C_{1,i} \cdot X_{1,i} + \sum_{i=1}^{N_2} C_{2,i} \cdot X_{2,i} + \dots + \sum_{i=1}^{N_M} C_{M,i} \cdot X_{M,i} + (F^0 - F^1) \cdot a \leq F^0 \quad (2.11)$$

$$\sum_{i=1}^{N_1} \Delta h_{1,i} + \sum_{i=1}^{N_2} \Delta h_{2,i} + \dots + \sum_{i=1}^{N_M} \Delta h_{M,i} + t_n \cdot a \leq Z_o - Z_M - H_{M,\min} \quad (2.12)$$

$$\mu_c(X) \geq a \quad (2.13)$$

$$\mu_n(X) \geq a \quad n=1, \dots, M \quad (2.14)$$

$$a \in [0, 1] \quad (2.15)$$

$$X \geq 0 \quad (2.16)$$

Συνεπώς το ασαφές πρόβλημα μετατρέπεται σε πρόβλημα απλού Γ.Π. και λύνεται εύκολα.

- Τέλος, γίνεται υδραυλικός έλεγχος του δικτύου (διαθέσιμα φορτία στα υδροστόμια και επιλεγείσες διάμετροι ώστε να ικανοποιούν τα όρια ταχυτήτων). Αν διαπιστωθεί πρόβλημα, τότε εισάγονται τροποποιήσεις στις συναρτήσεις συμμετοχής.

2.2. ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΔΙΚΤΥΩΝ

Για την ανάλυση της απόδοσης των δικτύων χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα COPAM (Lamaddalena, 1997; Lamaddalena and Sagardoy, 2000). Η ανάλυση έγινε και με τα δύο ενσωματωμένα μοντέλα (ICARE και AKLA). Το μοντέλο ICARE (CTGREF, 1979), μέσω των περιεχόμενων χαρακτηριστικών καμπυλών παρέχει πληροφορίες για τη γενική απόδοση ενός δικτύου ελεύθερης ζήτησης. Για κάθε τιμή της παροχής Q στην κεφαλή του δικτύου (μεταξύ 0 και Q_{\max}), προσδιορίζεται η τιμή του αναγκαίου πιεζομετρικού φορτίου Z , για κάθε συνδυασμό ανοικτών υδροστομίων που ζητά την Q (Lamaddalena, 1997; Δέρκας και Καραντούνιας, 2003). Στη συνέχεια, υπολογίζεται η κατανομή των αναγκαίων φορτίων στην κεφαλή για να λειτουργήσει επιτυχώς ένα ποσοστό των συνδυασμών ανοικτών υδροστομίων που ζητούν την παροχή Q στην κεφαλή, π.χ. το 10%, 50%, ..., 90% των συνδυασμών. Σε υπό πίεση δίκτυα που λειτουργούν με ελεύθερη ζήτηση και τα οποία είναι σχεδιασμένα με την ασυνεχή μέθοδο Labye και τους τύπους Clément, το σημείο λειτουργίας με $Q_{\text{Clément}}$ και Z_{opt} κεφαλής βρίσκεται κοντά στη χαρακτηριστική καμπύλη του 50% (Στεφοπούλου και Δέρκας, 2009). Το κριτήριο που χρησιμοποιείται για τη χάραξη των χαρακτηριστικών καμπυλών είναι πολύ αυστηρό, αφού κάθε συνδυασμός ανοικτών υδροστομίων, όπου έστω και ένα υδροστόμιο παρουσιάζει ελάχιστο έλλειμμα πίεσης, θεωρείται ανεπιτυχής.

Το μοντέλο AKLA (Lamaddalena, 1997; Lamaddalena and Sagardoy, 2000) είναι μία βελτίωση του μοντέλου των χαρακτηριστικών καμπυλών όπου δίνει τη δυνατότητα για ανάλυση ενός δικτύου σε επίπεδο υδροστομίου. Με την ανάλυση αυτή προσδιορίζονται τα υδροστόμια που παρουσιάζουν έλλειμμα φορτίου, αφού το μοντέλο μπορεί να προσδιορίσει το φορτίο κάθε υδροστομίου $H_{j,g}$, για κάθε συνδυασμό ανοικτών υδροστομίων, που ζητά την Q . Κατόπιν υπολογίζεται το σχετικό έλλειμμα φορτίου (Relative Pressure Deficit, RPD) στο υδροστόμιο j του συνδυασμού ανοικτών υδροστομίων g , όταν το ελάχιστο απαιτούμενο φορτίο είναι H_{\min} :

$$RPD_{j,g} = \frac{H_{j,g}}{H_{\min}} - 1 \quad (2.17)$$

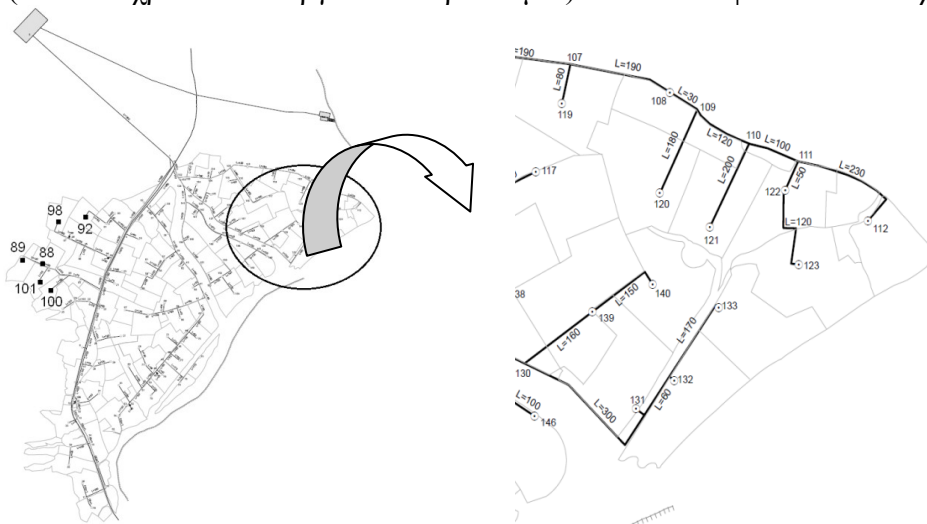
Τιμές RPD μικρότερες από -0.5 δείχνουν υδροστόμια με διαθέσιμο φορτίο μικρότερο από 50% του απαιτούμενου και χρειάζονται άμεσα διορθωτικές επεμβάσεις (Calejo et al., 2008). Εκτός από το RPD, το μοντέλο AKLA υπολογίζει ένα δείκτη αξιοπιστίας που περιγράφει πόσο συχνά το δίκτυο αποτυγχάνει. Η πιθανότητα α , ότι το σύστημα βρίσκεται σε κατάσταση ικανοποίησης, ορίζει την αξιοπιστία του συστήματος. Η αξιοπιστία ενός υδροστομίου δίνεται από τη σχέση (Lamaddalena and Sagardoy, 2000):

$$\alpha_j = \left(\frac{\sum_{g=1}^c I_{h_{j,g}} \cdot I_{p_{j,g}}}{\sum_{g=1}^c I_{h_{j,g}}} \right) \quad (2.18)$$

όπου: $I_{h_{j,g}}$ ισούται με 1 αν το υδροστόμιο j είναι ανοικτό στη διαμόρφωση g και με 0 αν είναι κλειστό, $I_{p_{j,g}}$ ισούται με 1 αν $H_{j,g} \geq H_{\min}$ και με 0 αν $H_{j,g} < H_{\min}$ και c είναι ο συνολικός αριθμός των παραγόμενων διαμορφώσεων.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στην παρούσα εργασία, η μέθοδος του Α.Γ.Π. και η κλασική μέθοδος του Γ.Π. εφαρμόστηκαν σε ένα υπό πίεση αρδευτικό δίκτυο βαρύτητας, που λειτουργεί με ελεύθερη ζήτηση. Επιλέχθηκε ελάχιστη απαιτούμενη πίεση στα υδροστόμια $H_{\min}=25$ m, που αντιστοιχεί σε αρδευτικές μεθόδους χαμηλής πίεσης. Το δίκτυο βρίσκεται στην περιοχή των Ν. Κερδυλίων του Ν. Σερρών. Διαθέτει 156 κόμβους με 97 υδροστόμια παροχής 6 l s^{-1} , λειτουργεί με βαρύτητα και η δεξαμενή του βρίσκεται 72 m πάνω από το επίπεδο της θάλασσας. Το νερό μεταφέρεται στη δεξαμενή από τον ποταμό Στρυμόνα. Η παροχή υπολογίστηκε με τον πρώτο τύπο του Clement και βρέθηκε ίση με 252 l s^{-1} (42 ταυτόχρονα λειτουργούντα υδροστόμια). Το δίκτυο φαίνεται στο Σχήμα 1.



Σχήμα 1. Το αρδευτικό δίκτυο των Ν. Κερδυλίων.

Για τον υπολογισμό των απωλειών φορτίου, για λόγους συμβατότητας με το πρόγραμμα COPAM, χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση του Darcy ή εξίσωση του Bazin (Lamaddalena and Sagardoy, 2000):

$$J = 0.000857(1 + 2gD^{-0.5})^2 D^{-5} Q^2 \quad (3.1)$$

όπου γ είναι ο συντελεστής τραχύτητας του Bazin σε $m^{0.5}$, Q είναι η παροχή του κλάδου σε $m^3 s^{-1}$ και D η διάμετρος σε m . Οι τιμές του συντελεστή γ για διάφορους αγωγούς δίνονται από τους Lamaddalena and Sagardoy (2000). Για την εφαρμογή της μεθόδου του Α.Γ.Π. πρέπει να επιλυθούν δύο προβλήματα Γ.Π., το σταθερό (strict) και το ευέλικτο (flexible) πρόβλημα. Στο ευέλικτο πρόβλημα, το ελάχιστο απαιτούμενο φορτίο στα υδροστόμια αυξάνεται κατά την τιμή του εύρους της ασάφειας, t_n , η οποία πάρθηκε ίση με 10 m. Επομένως, η ελάχιστη απαιτούμενη πίεση στα υδροστόμια είναι $H_{min}=25$ m για το σταθερό πρόβλημα και $H_{min}= 35$ m (25 m + t_n) για το ευέλικτο πρόβλημα. Υψηλή τιμή για το t_n είναι επιθυμητή, μιας και μία μικρή τιμή π.χ. 5 m θα οδηγούσε σε τιμή $H_{min}= 30$ m, η οποία δεν είναι αρκετή για να κάνει τη διαφορά για τους χρήστες του δικτύου. Το ζήτημα είναι ότι αν στο μέλλον υπάρξει μια τάση για συστήματα άρδευσης που απαιτούν μεγαλύτερη πίεση λειτουργίας, το δίκτυο θα πρέπει να είναι σε θέση να ικανοποιήσει αυτές τις απαιτήσεις. Το εύρος της ασάφειας θα πρέπει να επιλεγεί κατά τρόπο που να ικανοποιεί το στόχο αυτό. Η τιμή $t_n=10$ m ήταν η υψηλότερη που οδήγησε σε εφικτές λύσεις. Ωστόσο, η τιμή αυτή θεωρήθηκε επαρκώς υψηλή για το συγκεκριμένο πρόβλημα (10 m αύξηση του H_{min} είναι 40% πάνω από την τιμή σχεδιασμού των 25 m). Σε κόμβους χωρίς υδροστόμιο, η επιλεγμένη τιμή ελάχιστης πίεσης πάρθηκε ίση με $P_0 = 3$ m, για λόγους ασφαλείας. Τα δύο προβλήματα λύθηκαν με το πρόγραμμα LINGO. Το κόστος για το σταθερό πρόβλημα είναι $F^1=693,112$ € και για το ευέλικτο είναι $F^0=847,969$ €. Για την εύρεση της λύσης με τη μέθοδο του Α.Γ.Π., λύθηκε το γραμμικό πρόβλημα των σχέσεων (2.10)-(2.16). Η τιμή της μεταβλητής a , που έδωσε τη λύση, ήταν 0.56746. Αντικαθιστώντας στη σχέση (2.6), την $\mu_c(X)$ με την a και με τις γνωστές τιμές των F^0 and F^1 , το κόστος του δικτύου είναι:

$$0.56746 = \frac{847,969 - F(X)}{847,969 - 693,112} \Rightarrow F(X) = 760,094 \text{ €} \quad (3.2)$$

Το αποτέλεσμα δείχνει πως το δίκτυο που σχεδιάστηκε με Α.Γ.Π. κοστίζει περισσότερο από το δίκτυο του σταθερού προβλήματος (και κατά συνέπεια του Γ.Π.) και λιγότερο από το δίκτυο του ευέλικτου προβλήματος. Πιο συγκεκριμένα κοστίζει λίγο λιγότερο από το μέσο όρο των δύο προβλημάτων Γ.Π., αλλά τα διαθέσιμα φορτία που δίνει στα υδροστόμια είναι λίγο υψηλότερα από τη μέση τιμή που δίνουν τα δύο προβλήματα Γ.Π. (Πίνακες 1 και 2).

Πίνακας 1. Σύγκριση κόστους δικτύου μεθόδου Α.Γ.Π. σε σχέση με τη μέθοδο Γ.Π.

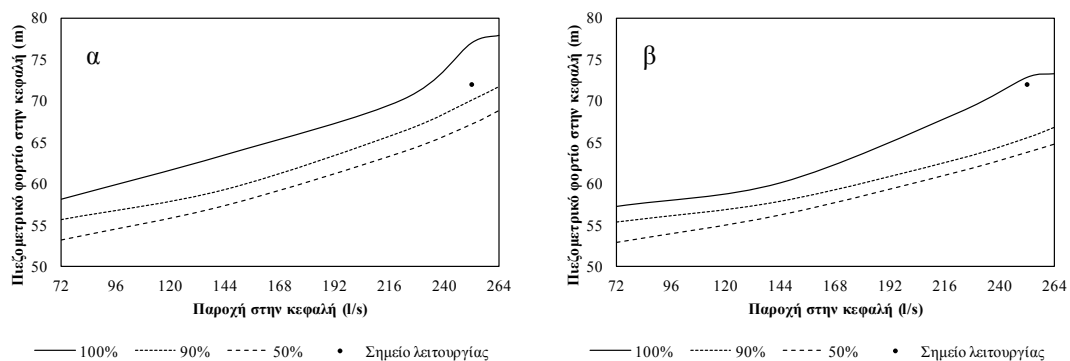
Κόστος σταθερού προβλήματος Γ.Π.	693,112 €	Τιμή μεταβλητής a	0.56746
Κόστος ευέλικτου προβλήματος Γ.Π.	847,969 €		
Κόστος μεθόδου Α.Γ.Π.	760,094 €	Μέση τιμή	770,540 €

Πίνακας 2. Σύγκριση διαθέσιμου φορτίου μεταξύ Γ.Π. και Α.Γ.Π. σε έξι τυχαίους κόμβους

Κόμβος	Διαθέσιμο Φορτίο (m)			
	Σταθερό πρόβλημα	Ευέλικτο πρόβλημα	Μέση τιμή	Α.Γ.Π.
12	37.43	47.42	42.43	43.10
24	29.06	38.74	33.9	34.42
51	32.51	39.51	36.01	35.62
57	40.29	45.36	42.83	43.29
83	38.44	45.72	42.08	42.10
94	38.04	46.79	42.42	42.90

Με στόχο να αναλυθεί ποιοτικά το δίκτυο, προσομοιώθηκε η λειτουργία του και ελέγχθηκε η απόδοσή του με χρήση των μοντέλων ICARE και AKLA του προγράμματος COPAM. Για να διαπιστωθεί η ευστάθεια της υπόθεσης, ότι το δίκτυο της μεθόδου Α.Γ.Π. έχει μικρότερο κίνδυνο αστοχίας λόγω μελλοντικών αλλαγών στις απαιτήσεις πίεσης και παροχής, όπως σχολιάστηκε προηγουμένως, σε σχέση με το δίκτυο της μεθόδου του Γ.Π., εξετάστηκαν κάποια πρόσθετα σενάρια λειτουργίας. Το πρώτο σενάριο (Σ1) έχει αυξημένη παροχή σε σχέση με το αρχικό δίκτυο (276 l s^{-1} αντί για 252 l s^{-1}), το δεύτερο σενάριο (Σ2) έχει αυξημένη την ελάχιστη απαίτηση πίεσης στα υδροστόμια (32 m έναντι 25 m) και το τρίτο σενάριο (Σ3), που είναι και το πιο απαιτητικό, έχει αυξημένες απαιτήσεις τόσο για την παροχή της κεφαλής όσο και για την ελάχιστη πίεση στα υδροστόμια (276 l s^{-1} και 32 m). Οι παροχές που ελέγχθηκαν είναι 72, 144, 222, 252 και 264 l s^{-1} στο αρχικό δίκτυο και στο σενάριο Σ2 και επιπλέον οι 276 και 300 l/s στα σενάρια Σ1 και Σ3. Για κάθε παροχή παρήχθησαν 1000 διαμορφώσεις.

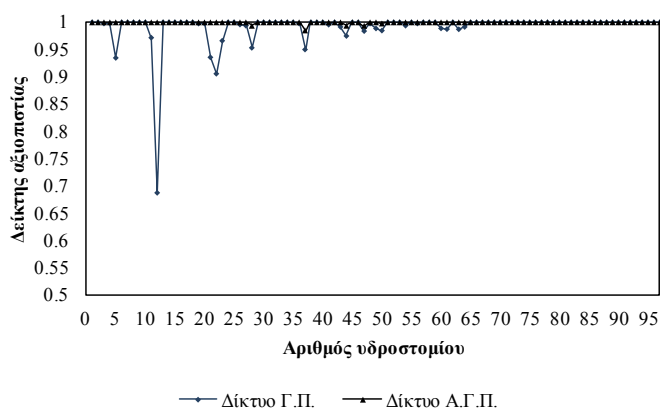
Η ανάλυση της απόδοσης του δικτύου με την παροχή και την πίεση σχεδιασμού δίνει πολύ καλά αποτελέσματα και για τις δύο μεθόδους που εφαρμόστηκαν. Το μοντέλο των χαρακτηριστικών καμπυλών, με σημείο λειτουργίας το (252,72), δίνει αποτελέσματα ανάμεσα στις χαρακτηριστικές του 90% και 100% (η μέθοδος Α.Γ.Π. δίνει περίπου 99% και η μέθοδος του Γ.Π. 93%), όπως φαίνεται στο Σχήμα 2. Είναι προφανές ότι το δίκτυο δεν χρήζει περαιτέρω ανάλυσης με το μοντέλο AKLA. Στη συνέχεια αναλύονται τα τρία πιθανά σενάρια λειτουργίας που αναφέρθηκαν παραπάνω. Στο Σ1 με σημείο λειτουργίας το (276,72), η απόδοση των δικτύων που σχεδιάστηκαν με τις δύο μεθόδους δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα. Το σημείο λειτουργίας στη μέθοδο του Α.Γ.Π. πέφτει ανάμεσα στις καμπύλες του 90% και 100% (περίπου 95%).



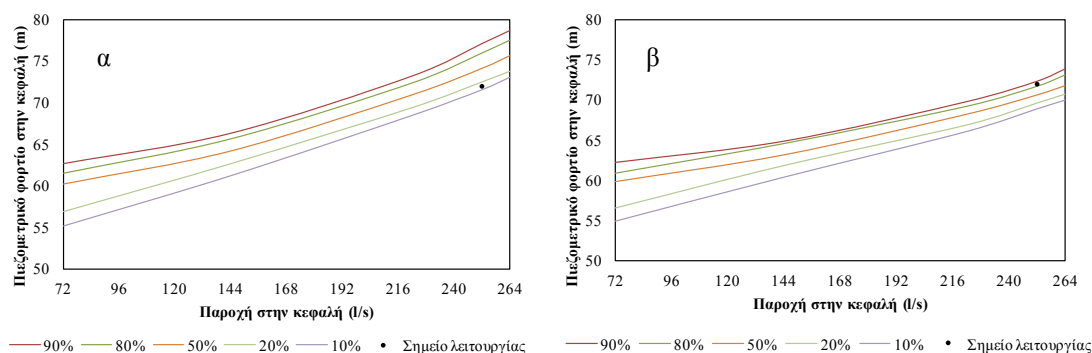
Σχήμα 2. Χαρακτηριστικές καμπύλες και σημείο λειτουργίας του δικτύου με την παροχή και πίεση σχεδιασμού με τη μέθοδο (α) Γ.Π. και (β) Α.Γ.Π.

Στη μέθοδο του Γ.Π. πέφτει σχεδόν πάνω στην καμπύλη του 80% (περίπου 78%) και αν και είναι κάπως χαμηλότερα από αυτήν του Α.Γ.Π., παρ' όλα αυτά είναι αρκετά ψηλά για να μην έχει πρόβλημα λειτουργίας το δίκτυο. Αυτό προκύπτει και από το δείκτη αξιοπιστίας του μοντέλου AKLA, που φαίνεται στο Σχήμα 3, όπου εκτός ενός υδροστομίου το οποίο έχει δείκτη αξιοπιστίας 0.69 (υδροστόμιο 12), τα υπόλοιπα έχουν πολύ υψηλές τιμές, άνω του 0.9. Στο δίκτυο του Α.Γ.Π., όλα τα υδροστόμια έχουν δείκτη αξιοπιστίας σχεδόν 1. Στο Σ2, η παροχή παραμένει ίδια με την παροχή σχεδιασμού, ερευνάται όμως η υπόθεση της αυξημένης απαίτησης για την ελάχιστη πίεση στα υδροστόμια και πιο συγκεκριμένα η αύξηση είναι 7 m. Επομένως, το σημείο λειτουργίας είναι το (252,72) με $H_{\min}=32 \text{ m}$, αντί για 25 m που ήταν προηγουμένως. Το σημείο λειτουργίας του δικτύου του Γ.Π. πέφτει πάνω σε πολύ χαμηλές καμπύλες. Συγκεκριμένα πέφτει ανάμεσα στις καμπύλες του 10% και 20% (περίπου 13%) (Σχήμα

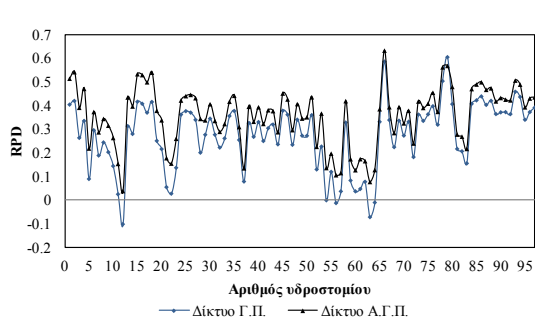
4α), που σημαίνει πως το δίκτυο πρόκειται να έχει σοβαρά προβλήματα λειτουργίας. Από την άλλη, το δίκτυο του Α.Γ.Π. δίνει πολύ καλό αποτέλεσμα (περίπου στην καμπύλη του 84%) (Σχήμα 4β), δείχνοντας την δυνατότητά του να λειτουργήσει υπό συνθήκες πιο απαιτητικές από αυτές για τις οποίες σχεδιάστηκε. Ελέγχοντας τα αποτελέσματα του σχετικού ελλείμματος φορτίου (RPD) που δίνει η ανάλυση με το μοντέλο ΑΚΛΑ, παρατηρούμε πως στο δίκτυο της μεθόδου του Γ.Π. υπάρχουν πέντε υδροστόμια τα οποία έχουν μέσες τιμές RPD αρνητικές (Σχήμα 5), δηλαδή στις περισσότερες διαμορφώσεις αυτά τα υδροστόμια είχαν έλλειψη φορτίου. Τη μικρότερη τιμή RPD είχε το υδροστόμιο 12 και ήταν -0.1 . Το δίκτυο που σχεδιάστηκε με Α.Γ.Π. δεν έχει αρνητικές μέσες τιμές RPD. Οι τιμές του δείκτη αξιοπιστίας, φαίνονται στο Σχήμα 6, απ' όπου προκύπτει η διαφορά ανάμεσα στις δύο μεθόδους, με 2 υδροστόμια να έχουν πολύ χαμηλές τιμές στο δίκτυο Γ.Π. (το 12 με 0.02 και το 63 με 0.13).



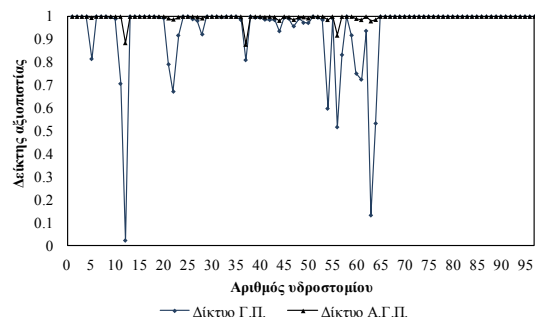
Σχήμα 3. Δείκτης αξιοπιστίας των δύο μεθόδων Γ.Π. και Α.Γ.Π. για το σενάριο Σ1.



Σχήμα 4. Χαρακτηριστικές καμπύλες και σημείο λειτουργίας του δικτύου για το σενάριο Σ2 με τη μέθοδο (α) Γ.Π. και (β) Α.Γ.Π.

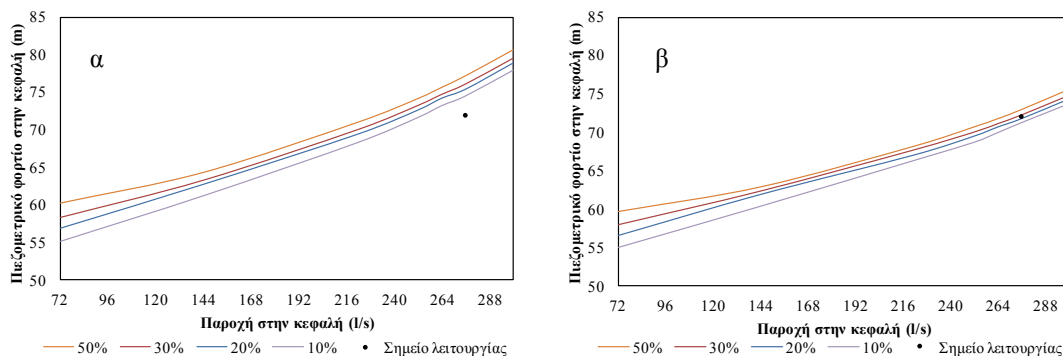


Σχήμα 5. Μέσες τιμές σχετικού ελλείμματος πίεσης των δικτύων των δύο μεθόδων Γ.Π. και Α.Γ.Π. για το σενάριο Σ2.



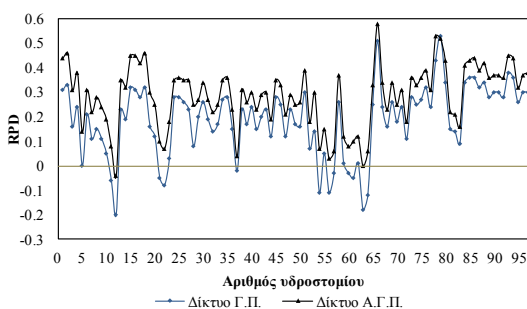
Σχήμα 6. Δείκτης αξιοπιστίας των δύο μεθόδων Γ.Π. και Α.Γ.Π. για το σενάριο Σ2.

Το Σ3 είναι το πιο απαιτητικό, αλλά είναι και αυτό το οποίο ταιριάζει περισσότερο στην πιθανή αλλαγή που μπορεί να υποστεί στο μέλλον το δίκτυο. Έχει αυξημένη τιμή τόσο στην παροχή που θα ζητηθεί από την κεφαλή δικτύου (276 l s^{-1}) όσο και στην ελάχιστη απαιτούμενη πίεση στα υδροστόμια (32 m). Το σημείο λειτουργίας είναι το (276,72) με $H_{\min}=32 \text{ m}$. Στο Σχήμα 7 φαίνονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες, από τις οποίες προκύπτει ότι το σημείο λειτουργίας πέφτει πάνω σε καμπύλες χαμηλού ποσοστού στα δίκτυα και των δύο μεθόδων. Στο δίκτυο του Γ.Π. είναι πρακτικά στην καμπύλη 0% (πολύ κάτω από την καμπύλη 10%), που σημαίνει πως καμία διαμόρφωση δεν μπορεί να δώσει την απαιτούμενη πίεση σε όλα τα ταυτόχρονα λειτουργούντα υδροστόμια. Στο δίκτυο του Α.Γ.Π. το σημείο πέφτει στην καμπύλη του 25%. Επομένως, απαιτείται μεγαλύτερη διερεύνηση της απόδοσης των δικτύων και ιδιαίτερα του δικτύου του Α.Γ.Π., για να φανεί αν μπορεί να ανταπεξέλθει σε αυτές τις απαιτήσεις.

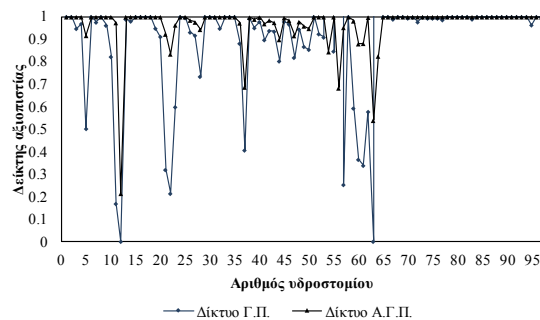


Σχήμα 7. Χαρακτηριστικές καμπύλες και σημείο λειτουργίας του δικτύου για το σενάριο Σ3 με τη μέθοδο (α) Γ.Π. και (β) Α.Γ.Π.

Στη συνέχεια εφαρμόστηκε το μοντέλο AKLA για τις συνθήκες του Σ3. Στο Σχήμα 8 φαίνεται το σχετικό έλλειμμα φορτίου RPD, για κάθε υδροστόμιο, ενώ στο Σχήμα 9 φαίνεται ο δείκτης αξιοπιστίας α , επίσης για κάθε υδροστόμιο. Από το Σχήμα 8 προκύπτει ότι υπάρχουν 12 υδροστόμια με αρνητική μέση τιμή RPD στο δίκτυο του Γ.Π. Τα πιο δυσμενή υδροστόμια είναι το 12 με μέση τιμή RPD -0.2, το 63 με -0.18, το 64 με -0.12 και τα 54 και 56 με -0.11. Αυτά τα υδροστόμια έχουν σχεδόν μόνιμα έλλειψη φορτίου και οι αρνητικές τιμές RPD φτάνουν σε ακραίες περιπτώσεις μέχρι και στο όριο του -0.5. Αντίθετα, το δίκτυο του Α.Γ.Π. έχει μόλις 1 υδροστόμιο με αρνητική τιμή RPD. Αυτό είναι το υδροστόμιο 12 με τιμή -0.04, μια τιμή που δεν είναι ικανή να δημιουργήσει πρόβλημα στη λειτουργία του δικτύου. Αξίζει να σημειωθεί πως στο 90% του συνόλου των διαμορφώσεων, η χαμηλότερη τιμή σχετικού ελλείμματος πίεσης είναι για το δίκτυο του Γ.Π. -0.3 και για το δίκτυο του Α.Γ.Π. -0.12.



Σχήμα 8. Μέσες τιμές σχετικού ελλείμματος πίεσης των δικτύων των δύο μεθόδων Γ.Π. και Α.Γ.Π. για το σενάριο Σ3.



Σχήμα 9. Δείκτης αξιοπιστίας των δύο μεθόδων Γ.Π. και Α.Γ.Π. για το σενάριο Σ3.

Ο δείκτης αξιοπιστίας επαληθεύει αυτά τα συμπεράσματα (Σχήμα 9), καθώς το δίκτυο του Γ.Π. έχει 10 υδροστόμια με αξιοπιστία μικρότερη του 0.5 (το ένα οριακά), από αυτά τα 2 έχουν αξιοπιστία 0, το 1 0.16 και 6 υδροστόμια κάτω από 0.4. Αυτά τα αποτελέσματα παρουσιάζουν ένα δίκτυο με σοβαρά λειτουργικά προβλήματα, που θα προσφέρει σχεδόν μόνιμα ελλειπή πίεση σε πολλά από τα υδροστόμιά του. Αντίθετα, το δίκτυο του Α.Γ.Π. έχει 1 υδροστόμιο με χαμηλή αξιοπιστία (0.21) και ένα με μέση αξιοπιστία (0.54). Όλα τα υπόλοιπα υδροστόμια έχουν υψηλό δείκτη αξιοπιστίας (από 0.68 και πάνω). Το δίκτυο του Α.Γ.Π. δείχνει ότι δεν υπάρχει πρόβλημα ικανοποίησης των αυξημένων απαιτήσεων του σεναρίου Σ3.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συνοψίζοντας, η ανάλυση της απόδοσης έδειξε ότι σε ένα καινούργιο δίκτυο, το οποίο πρόκειται να λειτουργήσει αυστηρά με τις απαιτήσεις σχεδιασμού, όσον αφορά την παροχή που ζητείται από την κεφαλή και τις ελάχιστες απαιτούμενες πιέσεις στα υδροστόμια, η χρήση της μεθόδου του Α.Γ.Π., για το βέλτιστο σχεδιασμό του δικτύου, είναι περιττή. Στην Ελλάδα όμως, η εμπειρία έχει δείξει ότι τα κλειστά υπό πίεση αρδευτικά δίκτυα ελεύθερης ζήτησης, μεταβάλλονται αυθαίρετα εκτός των σχεδιαστικών προδιαγραφών. Η μεταβολή είναι τέτοια που αλλάζει εντελώς η λειτουργία του δικτύου. Για τις περιπτώσεις αυτές, η παρούσα εργασία έδειξε ότι με τη μέθοδο του Α.Γ.Π. το δίκτυο μπορεί να ικανοποιήσει απαιτήσεις παροχής και πίεσης αρκετά μεγαλύτερες από τις προβλεπόμενες. Σε αντίθεση, η μέθοδος του Γ.Π. οδηγεί σε σχεδιασμό δικτύου που δεν μπορεί να ανταποκριθεί χωρίς διορθωτικές επεμβάσεις στις αυξημένες απαιτήσεις που πιθανώς να προκύψουν. Η μέθοδος του Α.Γ.Π. πρέπει να χρησιμοποιείται για την οικονομική βελτιστοποίηση νέων υπό πίεση αρδευτικών δικτύων διότι το αυξημένο κόστος που δίνει είναι πολύ μικρό συγκρινόμενο με τα πλεονεκτήματά της στην αντιμετώπιση περιπτώσεων που αναφέρονται στην Ελληνική γεωργία και σχετίζονται με την τάση για αλλαγή της κατανομής των καλλιεργειών και των συστημάτων άρδευσης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Bhave, P.R. and Gupta, R., 2004. *Optimal design of water distribution networks for fuzzy demands*. Civil Engineering and Environmental Systems, 21: 229-245.
- Calejo, M.J., Lamaddalena, N., Teixeira, J.L. and Pereira, L.S., 2008. *Performance analysis of pressurized irrigation systems operating on-demand using flow-driven simulation models*. Agricultural Water Management, 95: 154-162.
- CTGREF Division Irrigation., 1979. *Programme ICARE - Calcul des caractéristiques indicées*. Note Technique 6.
- Cunha, M.C. and Sousa, J., 1999. *Water distribution network design optimization: Simulated annealing approach*. Journal of Water Resources Planning and Management, 125: 215-221.
- Δέρκας, Ν. και Καραντούνιας, Γ., 2003. *Μεθοδολογία ανάταξης και εκσυγχρονισμού των συλλογικών αρδευτικών δικτύων υπό πίεση*. Πρακτικά 9^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου Ε.Υ.Ε., Θεσσαλονίκη, 207-215.
- Gupta, R. and Bhave, P.R., 2007. *Fuzzy parameters in pipe network analysis*. Civil Engineering and Environmental Systems, 24: 33-54.
- Gupta, I., Gupta, A. and Khanna, P., 1999. *Genetic algorithm for optimization of water distribution systems*. Environmental Modeling and Software, 14: 437-446.
- Κανάκης, Π., 2010. *Ελαχιστοποίηση κόστους με ασαφή γραμμικό προγραμματισμό και ανάλυση λειτουργίας υπό πίεση αρδευτικών δικτύων*. Μεταπτυχιακή Διατριβή.

- Μεταπτυχιακή Ειδίκευση «Γ. Μηχανικής και Υδατικών Πόρων», Γεωπονική Σχολή Α.Π.Θ..
- Karmeli, D., Gadish, Y. and Meyers, S., 1968. *Design of optimal water distribution networks*. Journal of Pipeline Division ASCE, 94: 1-10.
- Klir, G. and Yuan, B., 1995. *Fuzzy sets and fuzzy numbers – Theory and applications*. Prentice Hall PTR, 574 p.
- Labye, Y., Olson, M.A., Galand, A. and Tsiourtis, N., 1988. *Design and optimization of irrigation distribution networks*. FAO Irrigation and Drainage Paper, No 44, 247 p.
- Lamaddalena, N., 1997. *Integrated simulation modeling for design and performance analysis of on-demand pressurized irrigation systems*. Ph.D. Dissertation. Technical University of Lisbon, Lisbon.
- Lamaddalena, N. and Sagardoy, J.A., 2000. *Performance analysis of on-demand pressurized irrigation systems*. FAO Irrigation and Drainage Paper, No. 59, 132 p.
- Liang, T., 1971. *Design conduit system by dynamic programming*. Journal of the Hydraulics Division ASCE, 97: 383-393.
- Rommelfanger, H., 1996. *Fuzzy linear programming and applications*. European Journal of Operational Research, 92: 512-527.
- Ross, T.J., 2004. *Fuzzy logic with engineering applications*. New York: McGraw- Hill, Inc.
- Σπηλιώτης, Μ. και Τσακίρης, Γ., 2006. *Σχεδιασμός αρδευτικού δικτύου υπό πίεση με τη χρήση ασαφούς ακέραιου προγραμματισμού*. Πρακτικά 10^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου Ε.Υ.Ε., Ξάνθη, 793-800.
- Spiliotis, M. and Tsakiris, G., 2007. *Minimum cost irrigation network design using interactive fuzzy integer programming*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 133: 242-248.
- Spiliotis, M. and Tsakiris, G., 2012. *Water distribution network analysis under fuzzy demands*. Civil Engineering and Environmental Systems, 1-12, iFirst, doi:10.1080/10286608.2012.663359.
- Στεφοπούλου, Α. και Δέρκας, Ν., 2009. *Μαθηματικά ομοιώματα για την υδραυλική ανάλυση των αρδευτικών δικτύων υπό πίεση*. Πρακτικά Κοινού Συνεδρίου ΕΥΕ και ΕΕΔΥΠ, «Ολοκληρωμένη διαχείριση υδατικών πόρων σε συνθήκες κλιματικών αλλαγών» ΤΟΜΟΣ ΙΙ, 781-788.
- Στεφοπούλου, Α., και Δέρκας, Ν., 2011. *Διερεύνηση της υδραυλικής συμπεριφοράς του αρδευτικού δικτύου Καλυβίων-Σοχά (Ν. Λακωνίας)*. Πρακτικά 7^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου ΕΓΜΕ, Αθήνα.
- Swamee, P.K., Kumar, V. and Khanna, P., 1973. *Optimization of dead end water distribution mains*. Journal of Environmental Engineering Division ASCE, 99: 123-134.
- Theocharis, M.E., Tzimopoulos, C.D., Sakellariou-Makrantonaki, M.A, Yannopoulos, S.I. and Meletiou, I.K., 2010. *Comparative calculation of irrigation networks using Labye's method, the linear programming method and a simplified nonlinear method*. Mathematical and Computer Modelling, 51: 286-299.
- Xu, C. and Goulter, I.C., 1999. *Optimal design of water distribution networks using fuzzy optimization*. Civil Engineering and Environmental Systems, 16: 243-266.
- Zadeh, L. 1965. *Fuzzy sets*. Information and Control, 8(3): 338-353.
- Zecchin, A., Simpson, A., Maier, H., Leonard, M., Roberts, A. and Berrisford, M., 2006. *Application of two ant colony optimisation algorithms to water distribution system optimization*. Mathematical and Computer Modelling, 44: 451-468.
- Zimmermann, H. J. 1987. *Fuzzy set theory and decision analysis*. Fuzzy mathematical programming, Kluwer Academic, Boston, 71-124.

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΝΕΡΟΥ ΣΤΡΑΓΓΙΣΤΙΚΩΝ ΤΑΦΡΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ QUAL2Kw

Γεώργιος Δ. Γκίκας^{1*}, Χρήστος Δήμας, Βασίλειος Α. Τσιχριντζής²

Εργαστήριο Οικολογικής Μηχανικής και Τεχνολογίας, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνική Σχολή, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, 67100 Ξάνθη

^{1*}Τηλ./Fax: +30-25410-79381, E-mail: ggekikas@env.duth.gr

²Τηλ./Fax: +30-25410-79393, E-mail: tsihrin@otenet.gr; tsihrin@env.duth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Παρουσιάζεται η προσομοίωση της ποιότητας και ποσότητας του νερού τεσσάρων στραγγιστικών τάφρων, με τη χρήση του μοντέλου QUAL2Kw. Τα κανάλια βρίσκονται στην πεδιάδα της Χρυσούπολης στο νομό Καβάλας. Η άρδευση της περιοχής γίνεται από τον ποταμό Νέστο, με χρήση επιφανειακών δικτύων άρδευσης. Τα νερά στράγγισης συγκεντρώνονται σε τέσσερες στραγγιστικές τάφρους, οι οποίες εκβάλλουν στο Θρακικό πέλαγος. Οι κυριότεροι ρύποι στο νερό των τάφρων είναι τα νιτρικά και ο φώσφορος (θρεπτικά άλατα), τα αιωρούμενα στερεά και τα φυτοφάρμακα. Η βαθμονόμηση και επαλήθευση του μοντέλου QUAL2Kw έγινε με τη χρήση δεδομένων πεδίου, σε μια προσπάθεια να εντοπιστούν οι πηγές ρύπανσης και να προταθούν λύσεις διαχείρισης για τη βελτίωση της ποιότητας του νερού που χύνεται στην παράκτια ζώνη.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Αγροτική απορροή, Θρεπτικά, Ποιότητα νερού, Μοντέλο QUAL2Kw.

MODELING OF DRAINAGE CANAL WATER QUALITY USING QUAL2Kw

Georgios D. Gikas^{1*}, Christos Dimas, Vassilios A. Tsihrintzis²

Laboratory of Ecological Engineering and Technology, Department of Environmental Engineering, Democritus University of Thrace, 67100 Xanthi, Greece

^{1*}Ph./Fax: +30-25410-79381, E-mail: ggekikas@env.duth.gr

²Ph./Fax: +30-25410-79393, E-mail: tsihrin@otenet.gr; tsihrin@env.duth.gr

ABSTRACT

The one-dimensional model QUAL2Kw was used to model water quantity and quality in four main drainage canals located in the plain of Chrissoupolis in Kavala, North Greece. Irrigation water in the area is supplied by Nestos River, using a network of irrigation canals. Drainage water is collected in the four drainage canals of the study, which outflow into the Thracian Sea, North Aegean. Main pollutants in the canal water are nitrate and phosphorus, suspended solids and pesticides. The calibration and verification of QUAL2Kw was undertaken using collected field data, in an effort to identify the pollution sources and propose management actions for the improvement of drainage canal water quality.

KEY WORDS: Agricultural runoff, Nutrients, Water quality, QUAL2Kw.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η υποβάθμιση της ποιότητας των επιφανειακών υδάτων αποδίδεται κυρίως σε ανθρωπογενείς παράγοντες, όπως είναι η αστικοποίηση και οι βιομηχανικές και αγροτικές δραστηριότητες (Singh et al., 2005, Gikas et al., 2006a, 2006b, Boskidis et al., 2010). Ο έλεγχος των σημειακών πηγών ρύπανσης έχει αναδείξει τις μη-σημειακές πηγές ως τη σημαντικότερη αιτία της κακής ποιότητας των υδάτων (Novotny and Olem, 1994). Οι σημαντικότερες μη-σημειακές πηγές ρύπανσης είναι οι αγροτικές καλλιέργειες, οι οποίες εμπλουτίζουν τα υδατορεύματα, τους ποταμούς και τις παράκτιες περιοχές με θρεπτικά άλατα (αζώτου και φωσφόρου), ιζήματα και υπολείμματα φυτοφαρμάκων. Αποτέλεσμα αυτών των ρύπων είναι η εμφάνιση ευτροφισμού σε λίμνες, λιμνοθάλασσες και παράκτιες περιοχές (Gikas et al., 2006b, 2009a, 2009b).

Παρόλο που θα ήταν δυνατό να γίνεται συνεχής παρακολούθηση των αλλαγών της ποιότητας των υδάτων και των επιπτώσεων των ανθρώπινων δραστηριοτήτων (π.χ. αγροτικές) σε αυτές, εν τούτοις η προσέγγιση αυτή είναι και ιδιαίτερα δαπανηρή αλλά και προβληματική, επειδή, όταν εντοπιστεί κάποιο πρόβλημα σε ένα υδατικό σύστημα, μπορεί να είναι ήδη αργά για να λυθεί. Μια καλύτερη λύση είναι να εκτιμηθεί ο αντίκτυπος που έχουν διάφορες πρακτικές που εφαρμόζονται (καλλιεργητικές και άλλες) στην ποιότητα των επιφανειακών υδάτων (ποταμών, λιμνών) με τη χρήση μαθηματικών μοντέλων, δεδομένου ότι αυτό επιτρέπει την άμεση αποκατάσταση των υδατικών συστημάτων πριν δημιουργηθεί το πρόβλημα, το οποίο δύσκολα επιλύεται εκ των υστέρων. Η πρακτική αυτή είναι πολύ δημοφιλής τα τελευταία χρόνια και αποτελεί ένα εργαλείο για τη διαχείριση των υδατικών συστημάτων (Gikas et al., 2006a, 2009a, Boskidis et al., 2010, 2012, Fan et al., 2009).

Ένα μοντέλο που χρησιμοποιείται ευρέως για την μοντελοποίηση των διεργασιών σε ποτάμια και κανάλια και την αποτίμηση της επίδρασης ρύπων που προέρχονται από τη γεωργία, όπως είναι τα θρεπτικά άλατα (N, P), είναι το QUAL2K (Charpa and Pelletier, 2003). Για παράδειγμα, το μοντέλο QUAL2K έχει χρησιμοποιηθεί, μεταξύ άλλων, για την εκτίμηση της ποιότητας του νερού (pH, διαλυμένο οξυγόνο, θερμοκρασία νερού, ηλεκτρική αγωγιμότητα και θολερότητα) και υδραυλικών χαρακτηριστικών (παροχή και ταχύτητα) του ποταμού Κάνχα της Βραζιλίας (Bottino et al., 2010). Επίσης, αναφορές στη βιβλιογραφία υπάρχουν και για την νεότερη έκδοση QUAL2Kw (Kannel et al., 2007a, 2007b). Στην Ελλάδα οι αναφορές για τη χρήση του μοντέλου είναι περιορισμένες (π.χ., Αντωνόπουλος, 1989α, 1989β, Αντωνόπουλος και Παπαδημητρίου, 2003, Αντωνόπουλος κ.ά., 2005, Ζαρνταβά κ.ά., 2005).

Στη παρούσα εργασία παρουσιάζεται η εφαρμογή του μοντέλου QUAL2Kw σε στραγγιστικά κανάλια στην πεδιάδα της Χρυσούπολης του Ν. Καβάλας με χρήση μετρήσεων πεδίου, με σκοπό την προσομοίωση της παροχής και της ποιότητας των υδατικών αυτών συστημάτων. Συγκεκριμένα παρουσιάζεται η βαθμονόμηση και επαλήθευση του μοντέλου για την τάφρο T1 και γίνεται χωρική και χρονική εκτίμηση των φορτίων του αζώτου (N) και του φωσφόρου (P) που προέρχονται από τις αγροτικές καλλιέργειες.

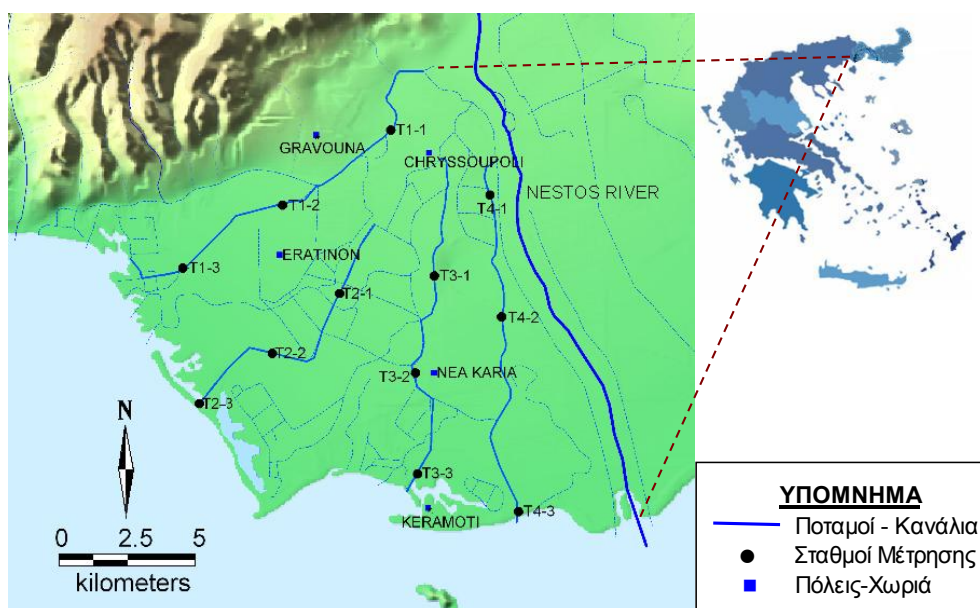
2. ΜΕΘΟΔΟΣ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ

2.1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η περιοχή μελέτης είναι η πεδιάδα της Χρυσούπολης, η οποία έχει έκταση περίπου 190 km² και βρίσκεται στο δυτικό κομμάτι του δέλτα του ποταμού Νέστου στη Βόρεια Ελλάδα. Η καλλιεργούμενη έκταση ανέρχεται περίπου σε 140 km², με κύριες

τις εαρινές καλλιέργειες (π.χ., καλαμπόκι, πατάτες, τομάτες, ρύζι, βαμβάκι, κτλ), οι οποίες καλύπτουν το 89,6% της καλλιεργούμενης έκτασης. Το 1,9% της καλλιεργούμενης έκτασης αποτελείται από επίσπορες καλλιέργειες (π.χ., φασόλια, καλαμπόκι) και το 4,7% αποτελείται από δενδρώδεις καλλιέργειες (οπωρώνες, λεύκες). Τέλος, μόνο το 3,1% της καλλιεργούμενης έκτασης αποτελείται από χειμερινές καλλιέργειες και μόλις το 0,7% παραμένει ακαλλιεργητό. Οι καλλιέργειες αρδεύονται από τον ποταμό Νέστο με το σύστημα των επιφανειακών δικτύων άρδευσης. Παράλληλα ένα δίκτυο στραγγιστικών τάφρων στραγγίζει την περιοχή από το βρόχινο νερό και συλλέγει το επιστρεφόμενο αρδευτικό νερό και το οδηγεί στη θάλασσα. Μέρος του δικτύου αυτού αποτελούν οι ακόλουθες τέσσερες στραγγιστικές τάφροι (Σχήμα 1): T1 (μήκος 16,6 km, πλάτος 2–22 m), T2 (μήκος 13,0 km, πλάτος 1,5–2,0 m), T3 (μήκος 16,5 km, πλάτος 3–8 m), T4 (μήκος 15,1 km, πλάτος 1,7–8,8 m).

Στην παράκτια περιοχή του Δέλτα του ποταμού Νέστου υπάρχουν μία σειρά από εννέα λιμνοθάλασσες, οι οποίες έχουν πολύ μεγάλη οικολογική σημασία, προστατεύονται από τη συνθήκη «Ramsar» και αποτελούν μέρος του δικτύου Natura 2000 (Dafis et al., 1997). Οι λιμνοθάλασσες χρησιμοποιούνται για ιχθυοκαλλιέργεια και συμβάλουν σημαντικά στην οικονομία της περιοχής. Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται πτώση της ιχθυοπαραγωγής στην περιοχή και αυτό αποδίδεται σε ρύπους (άλατα αζώτου και φωσφόρου) που εισέρχονται στις λιμνοθάλασσες από τις σημειακές και μη-σημειακές πηγές ρύπανσης της περιοχής.



Σχήμα 1. Η περιοχή μελέτης, τα στραγγιστικά κανάλια και οι σταθμοί μέτρησης

2.2. ΜΕΤΡΗΣΗ ΠΟΣΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΝΕΡΟΥ ΣΤΡΑΓΓΙΣΤΙΚΩΝ ΤΑΦΡΩΝ

Από τον Μάιο 2006 μέχρι τον Ιούνιο του 2008 πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις πεδίου και δειγματοληψίες νερού για την εκτίμηση της ποιότητας του νερού των κύριων στραγγιστικών τάφρων (Takamanis et al., 2007). Σε κάθε τάφρο ορίστηκαν τρεις σταθμοί μετρήσεων και δειγματοληψιών (T1-1 έως T4-3, Σχήμα 1). Επί τόπου μετρούνταν η παροχή, το διαλυμένο οξυγόνο (DO), η θερμοκρασία (T), η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) και το pH. Στο εργαστήριο τα δείγματα αναλύονταν για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης του BOD, του COD, των ολικών αιωρούμενων

στερεών (TSS), του ολικού αζώτου Kjeldahl (TKN), του αμμωνιακού αζώτου (NH₄-N), του αζώτου νιτρικών (NO₃-N) και νιτρωδών (NO₂-N), των ορθοφωσφορικών (OP) και του ολικού φωσφόρου (TP), χρησιμοποιώντας τις πρότυπες μεθόδους (standard methods, APHA, 1998).

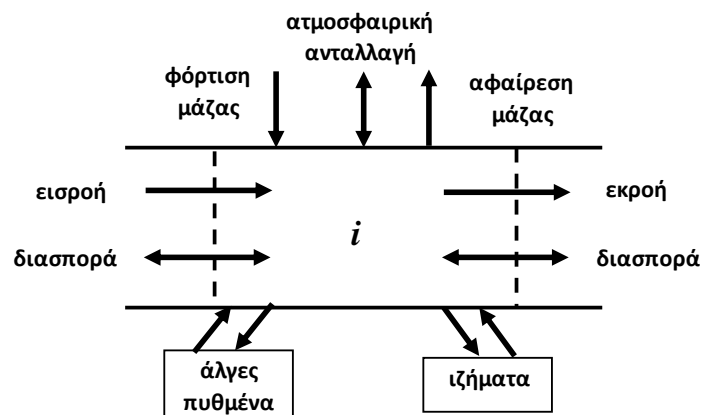
2.3. ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ QUAL2Kw

Το μοντέλο QUAL2Kw είναι η νεότερη και πλέον βελτιωμένη έκδοση του QUAL2K, το οποίο είναι η εξέλιξη του μοντέλου QUAL2E (Pelletier and Chapra, 2005, Pelletier et al., 2006, Turner et al., 2009). Είναι ένα μονοδιάστατο μοντέλο και έχει τη δυνατότητα να προσομοιώνει την παροχή και την ποιότητα του νερού σε ποτάμια και κανάλια. Πιο συγκεκριμένα με το QUAL2Kw προσομοιώνεται το BOD, τα αιωρούμενα στερεά, η θερμοκρασία, το διαλυμένο οξυγόνο, η ηλεκτρική αγωγιμότητα, το pH, το αμμωνιακό και το νιτρικό άζωτο, το οργανικό άζωτο, τα ορθοφωσφορικά, ο οργανικός φώσφορος, ο ολικός φώσφορος και το φυτοπλαγκτό (Chapra et al., 2003, 2008, Pelletier et al., 2006).

Για την εφαρμογή του μοντέλου, το κανάλι χωρίζεται σε επιμέρους τμήματα (reaches) στα οποία εφαρμόζεται το ισοζύγιο μάζας (Chapra et al., 2008). Κάθε τμήμα θεωρείται ότι λειτουργεί ως αντιδραστήρας πλήρους ανάμιξης. Στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται τμήμα του ποταμού και το ισοζύγιο μάζας το οποίο χρησιμοποιείται στον υπολογισμό του κάθε στοιχείου (άζωτο, φώσφορο κλπ) από το μοντέλο. Η γενική εξίσωση του ισοζυγίου μάζας που χρησιμοποιείται από το μοντέλο, για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης ενός συστατικού (c_i), στην υδάτινη στήλη ενός τμήματος (i) είναι η εξής:

$$\frac{dc_i}{dt} = \frac{Q_{i-1}}{V_i} C_{i-1} - \frac{Q_i}{V_i} C_i - \frac{Q_{ab,i}}{V_i} C_i + \frac{E_{i-1}}{V_i} (C_{i-1} - C_i) + \frac{E_i}{V_i} (C_{i+1} - C_i) + \frac{W_i}{V_i} + S_i \quad (1)$$

όπου: Q_i = η παροχή εισροής στο τμήμα i (m³/d), Q_{ab,i} = η παροχή εκροής από το τμήμα i (m³/d), V_i = ο όγκος του τμήματος (m³), E_i = συντελεστής διασποράς μεταξύ τμημάτων i και i+1 (m³/d), E_{i-1} = συντελεστής διασποράς μεταξύ τμημάτων i-1 και i (m³/d), W_i = η εξωτερική φόρτιση του στοιχείου στο τμήμα i (g/d ή mg/d), S_i = πηγές/αποθήκες των στοιχείων λόγω αντιδράσεων και μηχανισμοί μεταφοράς μάζας (g/m³/d ή mg/m³/d).

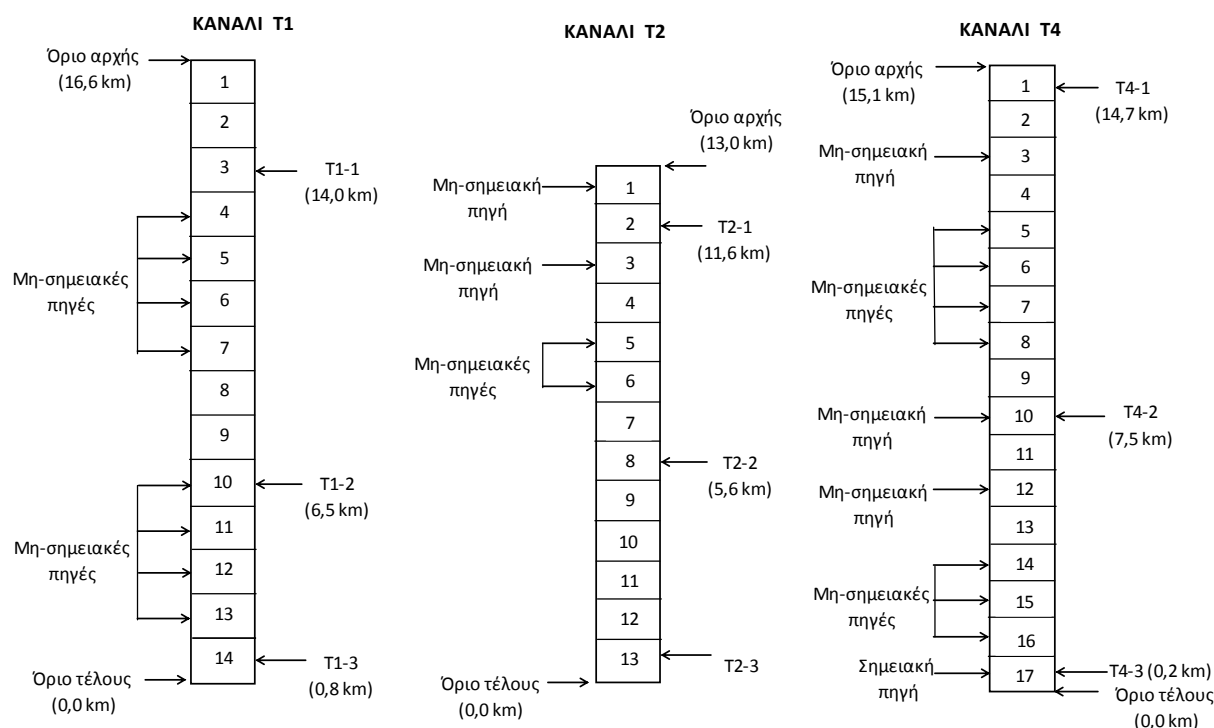


Σχήμα 2: Ισοζύγιο μάζας στο τμήμα i του καναλιού (Pelletier and Chapra, 2005).

2.3.1. Εφαρμογή και βαθμονόμηση του μοντέλου

Το μοντέλο εφαρμόστηκε για συνθήκες σταθερής ροής και βαθμονομήθηκε για τις στραγγιστικές τάφρους T1, T2 και T4. Για την εφαρμογή του μοντέλου οι τάφροι T1, T2 και T4 διαιρέθηκαν σε 14, 13 και 17 τμήματα (segments), αντίστοιχα (Σχήμα 3). Το βασικό κριτήριο της διαίρεσης αυτής ήταν τα υδραυλικά χαρακτηριστικά τους, όπως: πλάτος, κλίση πυθμένα, φυτοκάλυψη, συντελεστής Manning κλπ.

Τα δεδομένα που εισήχθησαν στο μοντέλο ήταν η παροχή των τάφρων (από τις μετρήσεις πεδίου) και τα μετεωρολογικά δεδομένα, τα οποία προήλθαν από την NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, <http://www.ready.noaa.gov>) και αφορούσαν στη θερμοκρασία αέρα, τη θερμοκρασία του σημείου δρόσου, την ταχύτητα του ανέμου και τη νεφοκάλυψη.



Σχήμα 3. Διακριτοποίηση των στραγγιστικών τάφρων T1, T2, T4 σε τμήματα και οι θέσεις των σταθμών μέτρησης και των πηγών ρύπανσης.

Οι παράμετροι για τις οποίες βαθμονομήθηκε το μοντέλο ήταν: η παροχή, το pH, η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC), το αμμωνιακό άζωτο ($\text{NH}_4\text{-N}$), το άζωτο νιτρικών ($\text{NO}_3\text{-N}$) και ο φώσφορος των ορθοφωσφορικών (OP). Για τη βαθμονόμηση ακολουθήθηκαν τα εξής βήματα: έγινε βαθμονόμηση για την παροχή, χρησιμοποιώντας σαν παράμετρο που μεταβάλλονταν μέσα σε συγκεκριμένα όρια τον συντελεστή Manning. Οι στραγγιστικές τάφροι δέχονται νερό σχεδόν σε όλο το μήκος της διαδρομής τους από διάχυτες πηγές, λόγω των αρδεύσεων. Οι αρδεύσεις αυτές δεν γίνονται συγχρόνως σε όλες τις καλλιέργειες με την ίδια συχνότητα και με την ίδια ποσότητα νερού. Επομένως, προκειμένου να υπάρχει συμφωνία των αποτελεσμάτων του μοντέλου για την παροχή με τις τιμές που μετρήθηκαν στους διάφορους σταθμούς, γινόταν προσθήκη επιπλέον ποσοτήτων νερού (m^3/s) στα διάφορα τμήματα (segments) της τάφρου. Στη συνέχεια, έγινε βαθμονόμηση για τις διάφορες μορφές του αζώτου, όπως άζωτο αμμωνιακών και νιτρικών. Στην περίπτωση αυτή η παράμετρος που μεταβάλλονταν ήταν οι συντελεστές νιτροποίησης, και απονιτροποίησης. Τέλος, έγινε

βαθμονόμηση για τον φώσφορο ρυθμίζοντας το συντελεστή υδρόλυσης του οργανικού φωσφόρου. Οι παράμετροι νιτροποίησης, απονιτροποίησης και υδρόλυσης του οργανικού φωσφόρου μεταβάλλονταν μεταξύ ορίων που καθορίζονται από το μοντέλο και οι τελικές τιμές για την T1 ήταν 2 1/d, 0,01 1/d και 0,32 1/d, αντίστοιχα. Όπως στην περίπτωση της παροχής, έτσι και στην περίπτωση των θρεπτικών, ήταν απαραίτητο να προστεθούν επιπλέον ποσότητες αμμωνιακού και νιτρικού αζώτου και φωσφόρου από διάχυτες πηγές, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί το σφάλμα μεταξύ μετρούμενων τιμών στο πεδίο και εκτιμώμενων από το μοντέλο τιμών. Η προσθήκη του νιτρικού και αμμωνιακού αζώτου και του ανόργανου φωσφόρου γίνεται σε μονάδες συγκέντρωσης (μg/L).

Για να ελεγχθεί η ακρίβεια των προβλέψεων του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν:

α) η οπτική μέθοδος, όπου γίνεται οπτικός έλεγχος σε διαγράμματα όπου εμφανίζονται από κοινού οι τιμές που προβλέπει το μοντέλο και αυτές που μετρήθηκαν στο πεδίο.

β) η τετραγωνική ρίζα του μέσου σφάλματος (RMSE) και η κανονικοποιημένη αντικειμενική συνάρτηση (NOF), που υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{N}} \quad (2.1)$$

$$NOF = \frac{RMSE}{O_{mean}} \quad (2.2)$$

όπου: P_i και O_i είναι οι προβλεφθείσες και μετρημένες τιμές, αντίστοιχα, O_{mean} είναι η μέση τιμή των μετρημένων τιμών και N ο αριθμός των μετρήσεων στο πεδίο. Η ιδανική τιμή του συντελεστή NOF είναι το 0,0. Ωστόσο, τιμές του συντελεστή που βρίσκονται στο διάστημα από 0 έως 1, είναι αποδεκτές (Boskidis et al., 2010, 2011, Gikas et al., 2006a).

Το μοντέλο προσομοιώνει την παροχή της τάφρου και την ποιότητα του νερού σε ημερήσια βάση. Η βαθμονόμηση του μοντέλου έγινε για το έτος 2006 και για δύο περιόδους, την καλλιεργητική περίοδο (Μάιος έως Αύγουστος) και την μη καλλιεργητική περίοδο (Οκτώβριο έως Δεκέμβριο) κάθε μήνα ξεχωριστά, διότι όπως προαναφέρθηκε υπάρχουν διαφορετικές καλλιεργητικές συνθήκες από μήνα σε μήνα. Η επαλήθευση του μοντέλου έγινε για το έτος 2007 και τις αντίστοιχες περιόδους. Στην επαλήθευση χρησιμοποιήθηκε για τη σύγκριση διαφορετικό σετ δεδομένων πεδίου και μετεωρολογικών δεδομένων, ενώ για τις μεταβλητές εισαγωγής του μοντέλου (π.χ. συντελεστές νιτροποίησης, απονιτροποίησης κλπ) διατηρήθηκαν οι τιμές που προέκυψαν από τη βαθμονόμηση του μοντέλου.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

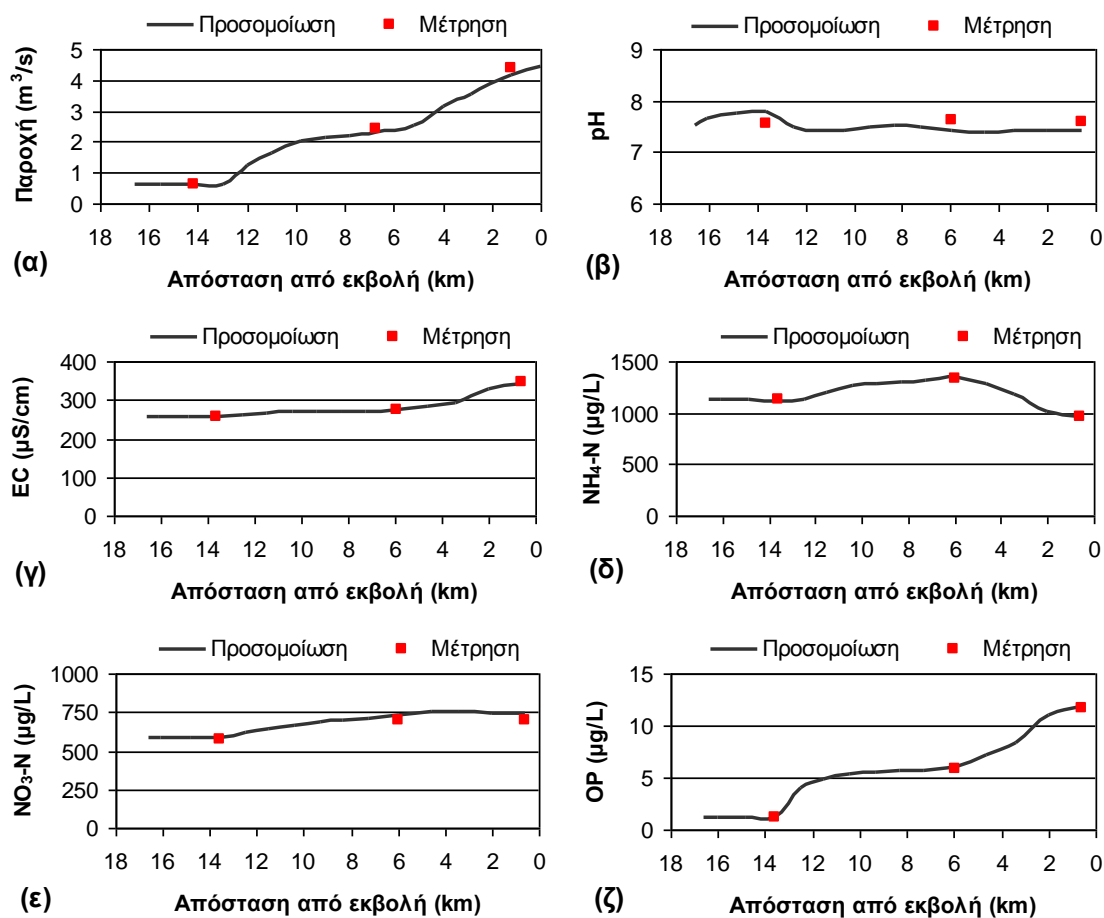
Παρουσιάζονται ενδεικτικά τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης του μοντέλου QUAL2Kw για το μήνα Ιούνιο 2006 (καλλιεργητική περίοδος) και το μήνα Δεκέμβριο 2006 (μη καλλιεργητική περίοδος) στην τάφρο T1. Επίσης, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της επαλήθευσης του μοντέλου.

Στον Πίνακα 1 συνοψίζονται οι τιμές των παραμέτρων, για τις οποίες γίνεται η βαθμονόμηση του μοντέλου που μετρήθηκαν στο πεδίο. Στο Σχήμα 4 παρουσιάζονται

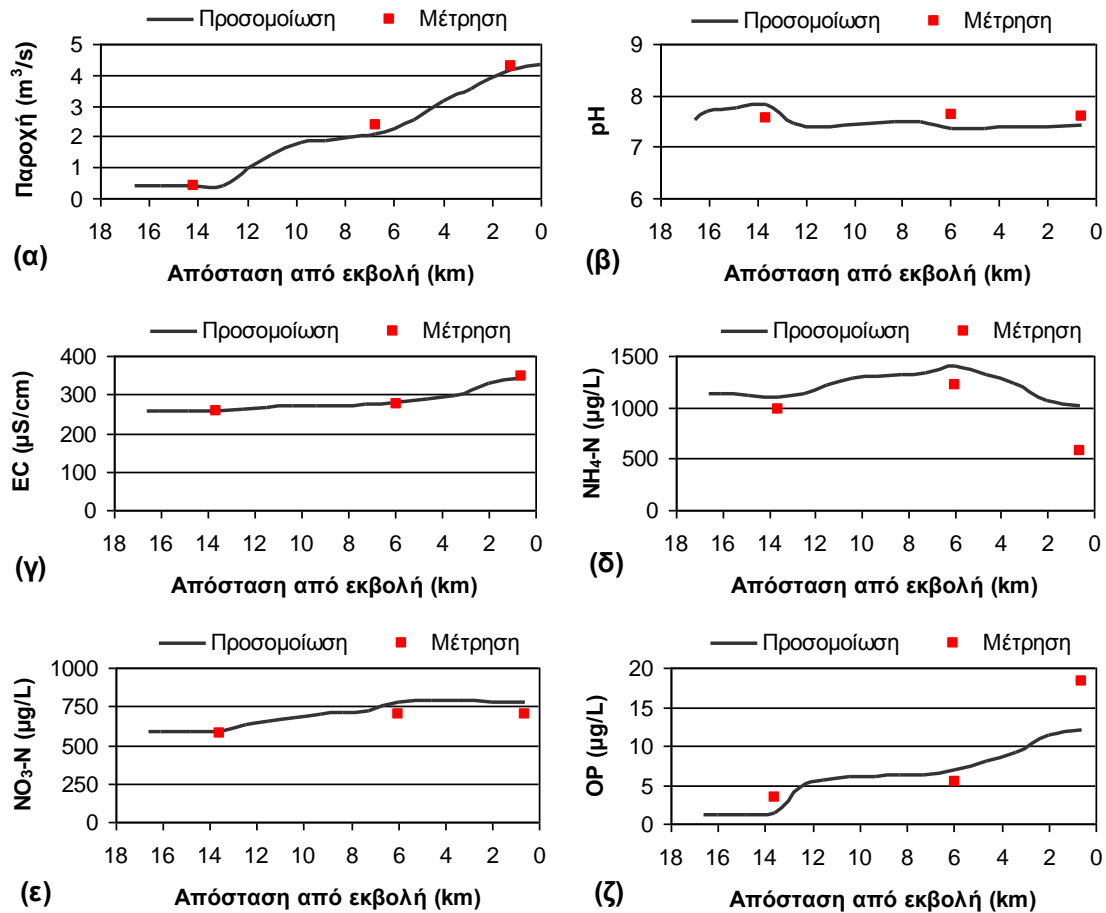
τα διαγράμματα της βαθμονόμησης του μοντέλου για το μήνα Ιούνιο του 2006, ενώ στο Σχήμα 5 φαίνονται τα αποτελέσματα της επαλήθευσης του μοντέλου για το μήνα Ιούνιο του 2007. Στα διαγράμματα φαίνονται τα αποτελέσματα που εκτιμά το μοντέλο, κατά μήκος της τάφρου για μια συγκεκριμένη ημέρα, σε σχέση με αυτά που μετρήθηκαν στο πεδίο. Στον οριζόντιο άξονα κάθε διαγράμματος εμφανίζεται η απόσταση (km) ανάντη από τις εκβολές της τάφρου (απόσταση 0 είναι η εκβολή). Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του κριτηρίου NOF από τη βαθμονόμηση και την επαλήθευση του μοντέλου.

Πίνακας 1. Μετρήσεις παροχής και παραμέτρων ποιότητας νερού την καλλιεργητική περίοδο (Ιούνιος 2006) και την μη καλλιεργητική περίοδο (Δεκέμβριος 2006) στην τάφρο T1.

Ημερομηνία	Σταθμός	Παροχή (m ³ /s)	pH	EC (μS/cm)	NH ₄ -N (μg/L)	NO ₃ -N (μg/L)	OP (μg/L)
29/06/2006	T1-1	0,634	7,54	258,0	1136,0	577,6	1,18
	T1-2	2,408	7,63	272,0	1325,8	695,6	5,91
	T1-3	4,363	7,59	344,0	955,5	699,9	11,68
07/12/2006	T1-1	0,055	7,38	642,0	446,9	284,4	12,6
	T1-2	0,416	7,34	646,0	304,0	411,4	17,6
	T1-3	0,779	7,69	736,0	339,5	372,7	24,2



Σχήμα 4. Βαθμονόμηση του μοντέλου για το μήνα Ιούνιο του 2006 στην τάφρο T1.



Σχήμα 5. Επαλήθευση του μοντέλου για το μήνα Ιούνιο του 2007 στην τάφρο T1.

Πίνακας 2. Τιμές του κριτηρίου NOF για την βαθμονόμηση και επαλήθευση του μοντέλου.

	Ημερομηνία	Παροχή	pH	EC	NH ₄ -N	NO ₃ -N	OP
Βαθμονόμηση	26/06/2006	0,05	0,03	0,01	0,01	0,05	0,01
	07/12/2006	0,14	0,08	0,03	0,18	0,13	0,06
Επαλήθευση	21/06/2007	0,08	0,03	0,01	0,94	0,10	0,44
	07/12/2007	0,12	0,06	0,10	0,52	0,83	0,52

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 4α, η βαθμονόμηση του μοντέλου για την παροχή είναι ικανοποιητική καθώς η τιμή του συντελεστή NOF είναι πολύ κοντά στη τιμή 0,0 (Πίνακας 2). Η επαλήθευση του μοντέλου για την παροχή (Σχήμα 5α) είναι ικανοποιητική καθώς η τιμή του NOF είναι 0,08 (κοντά στη τιμή 0,0).

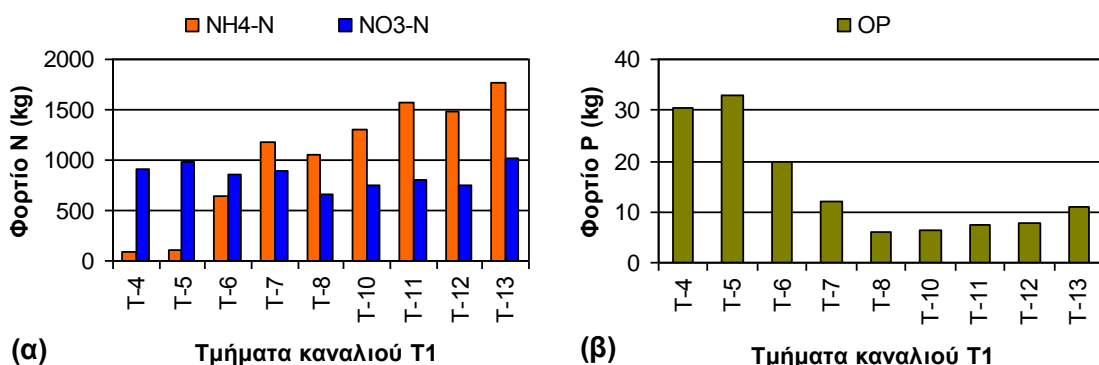
Ικανοποιητική είναι η βαθμονόμηση και για τις άλλες παραμέτρους, pH, EC, NH₄-N, NO₃-N και OP, όπως φαίνεται από τα Σχήματα 4β, γ, δ, ε και ζ, αντίστοιχα. Οι τιμές του NOF για όλες τις παραμέτρους στη βαθμονόμηση του μοντέλου είναι μικρότερες του 1,0 και πολύ κοντά στη τιμή 0,0 (Πίνακας 2). Ικανοποιητικά είναι και τα αποτελέσματα της επαλήθευσης του μοντέλου για όλες τις παραμέτρους. Στα Σχήματα 5β, γ, δ, ε, ζ, οι τιμές που προβλέπει το μοντέλο είναι πολύ κοντά σε αυτές που μετρήθηκαν στο πεδίο. Εξαιρέση αποτελούν το αμμωνιακό άζωτο και τα ορθοφωσφορικά, τα οποία δεν προσομοιώνονται πολύ καλά στην εκβολή της τάφρου,

πιθανόν λόγω της παλίρροιας από τη θάλασσα (Σχήμα 5δ,ζ). Στην περίπτωση του αμμωνιακού αζώτου, το μοντέλο υπερεκτιμά την συγκέντρωση, ενώ στην περίπτωση των ΟΡ το μοντέλο υποεκτιμά τη συγκέντρωση του φωσφόρου. Παρόλα αυτά η τιμή του NOF είναι αποδεκτή καθώς είναι μικρότερη του 1,0 (Πίνακας 2).

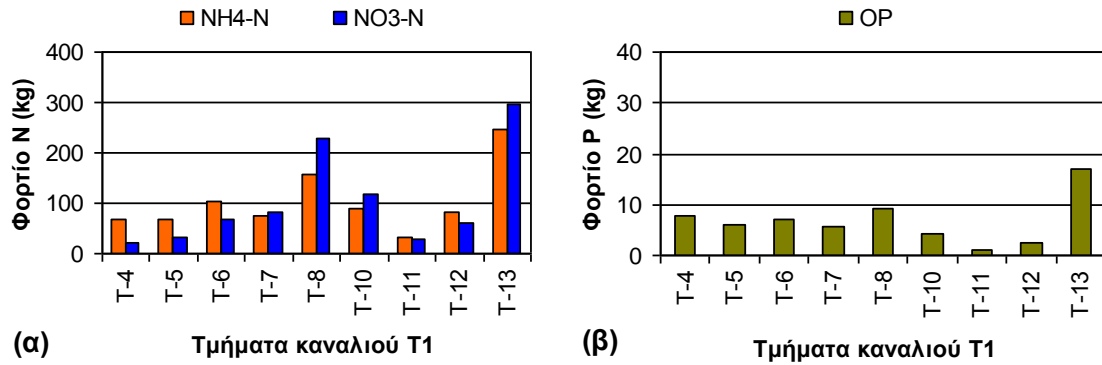
3.1. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΦΟΡΤΙΩΝ ΘΡΕΠΤΙΚΩΝ ΣΤΗΝ ΤΑΦΡΟ

Όπως προαναφέρθηκε για τη βαθμονόμηση του μοντέλου έπρεπε να προστίθενται φορτία θρεπτικών προκειμένου να ελαχιστοποιείται το σφάλμα μεταξύ εκτιμώμενων από το μοντέλο και τιμών που μετρήθηκαν στο πεδίο. Στο Σχήμα 6 φαίνονται τα φορτία των θρεπτικών αλάτων (N, P) που προστέθηκαν σε κάθε τμήμα της τάφρου T1 τον Ιούνιο του 2006 (καλλιεργητική περίοδος) από τις μη σημειακές πηγές. Τα φορτία του νιτρικού αζώτου κυμαίνονται από 650 kg στο τμήμα 8 (T-8) έως 1010 kg στο τμήμα 13 (T-13, Σχήμα 3, Σχήμα 6α). Το φορτίο του αμμωνιακού αζώτου είναι μικρό στα τμήματα T-4 και T-5 (93 kg και 107 kg, αντίστοιχα) και αυξάνεται στα υπόλοιπα τμήματα από 600 kg στο T-6 έως 1770 kg στο T-13. Το συνολικό φορτίο του αζώτου που εισέρχεται στην τάφρο από τις διάχυτες πηγές είναι 9206 kg και 7627 kg για το αμμωνιακό και νιτρικό άζωτο, αντίστοιχα. Όσον αφορά στο φώσφορο των ορθοφωσφορικών, μεγαλύτερη εισροή γίνεται στην αρχή της τάφρου (τμήματα T-4, T-5, T-6) και μικρότερη στα υπόλοιπα τμήματα (Σχήμα 6β). Η συνολική ποσότητα του φωσφόρου που εισέρχεται στο κανάλι T1 από μη-σημειακές πηγές είναι 133 kg.

Το Δεκέμβριο του 2006 (μη καλλιεργητική περίοδος) τα φορτία των θρεπτικών (N, P) που εισέρχονται στην τάφρο από μη-σημειακές πηγές (Σχήμα 7) είναι μικρότερα σε σχέση με αυτά που εισέρχονται την καλλιεργητική περίοδο. Η συνολική ποσότητα του αμμωνιακού αζώτου είναι 924 kg, του αζώτου νιτρικών 937 kg και του φωσφόρου 60 kg. Η κατανομή των φορτίων είναι σχεδόν ομοιόμορφη σε όλα τα τμήματα της τάφρου για το άζωτο και για το φώσφορο, με εξαίρεση το τμήμα T-8 και T-13 που δέχονται μεγαλύτερα φορτία από τα υπόλοιπα τμήματα, πιθανόν λόγω φθινοπωρινών καλλιεργειών στην περιοχή που γειτνιάζει με τα τμήματα αυτά των τάφρων (Σχήμα 7α,β).



Σχήμα 6. Φορτίο θρεπτικών ανά τμήμα της τάφρου T1, από τις μη σημειακές πηγές (Ιούνιος 2006): (α) αζώτου, (β) φωσφόρου



Σχήμα 7. Φορτίο θρεπτικών ανά τμήμα της τάφρου T1, από τις μη σημειακές πηγές (Δεκέμβριος 2006): (α) αζώτου, (β) φωσφόρου

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα μελέτη έδειξε ότι το μοντέλο QUAL2Kw μπορεί να προσομοιώσει την παροχή, καθώς και παραμέτρους ποιότητας του νερού στις στραγγιστικές τάφρους στην Πεδιάδα της Χρυσούπολης. Με βάση τη βαθμονόμηση του μοντέλου για την καλλιεργητική και μη-καλλιεργητική περίοδο υπολογίστηκαν τα φορτία των θρεπτικών αλάτων (N, P) που εισρέουν στην τάφρο T1 από τις μη-σημειακές πηγές. Την καλλιεργητική περίοδο τα φορτία αζώτου και φωσφόρου που εισρέουν στην τάφρο είναι πολλαπλάσια σε σύγκριση με τα φορτία που εισρέουν στη διάρκεια της μη-καλλιεργητικής περιόδου. Επίσης, εντοπίστηκαν τα τμήματα της τάφρου που δέχονται τις μεγαλύτερες φορτίσεις, γεγονός που βοηθάει στη λήψη κατάλληλων μέτρων βέλτιστης διαχείρισης για τη μείωση της ρύπανσης. Αυτό μπορεί να γίνει, μεταξύ άλλων, με κατάλληλες οδηγίες προς τους αγρότες για τη σωστή λίπανση των καλλιεργειών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Αντωνόπουλος, Β. 1989α. *Προσομοίωση της μεταφοράς μάζας και των μετασχηματισμών ποιοτικών παραμέτρων σε μικρά υδατορεύματα*. Πρακτικά Συνεδρίου "Προστασία Περιβάλλοντος και Γεωργική Παραγωγή", ΓΕΩΤΕΕ, Θεσσαλονίκη, σελ. 525-543.
- Αντωνόπουλος, Β. 1989β. *Μαθηματικό μοντέλο μεταφοράς μάζας του αζώτου σε υδατορεύματα από απόβλητα σημειακών πηγών*. Λεκκας Θ. (εκδ.), "Περιβαλλοντική Επιστήμη και Τεχνολογία", Μυτιλήνη, σελ. 434-444.
- Αντωνόπουλος, Β.Ζ. και Παπαδημητρίου, Β. 2003. *Προσομοίωση της ποιότητας του νερού του ποταμού Αίσωνα στην Πιερία με το μαθηματικό μοντέλο QUAL2E*. Πρακτικά 9^{ου} Συνεδρίου ΕΥΕ, Θεσσαλονίκη, σελ. 217-224.
- Αντωνόπουλος, Β. και Παπαδημητρίου, Β. 2005. *Διερεύνηση της ποιότητας του ποταμού Αίσωνα στην Πιερία ως αποδέκτη των επεξεργασμένων λυμάτων της Κατερίνης*, Πρακτικά Συνεδρίου HELLECO '05, ΤΕΕ, Αθήνα, 1-10.
- Ζαρνταβά, Κ., Κιουρτσίδης, Χ. και Γκανούλης, Ι. 2005. *Προσομοίωση ρύπανσης από μη σημειακά νιτρικά φορτία σε λεκάνες απορροής*. Πρακτικά 5^{ου} Συνεδρίου ΕΕΔΥΠ, Ξάνθη, 215-220.
- APHA, AWWA 1998. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th Edition*. Washington D.C., USA.

- Boskidis, I., Gikas, G.D., Pinaras, V. and Tsihrintzis, V.A. 2010. *Spatial and temporal changes of water quality, and SWAT modeling of Vosvozis river basin, North Greece*. Journal of Environmental Science and Health-Part A, 45(11): 1421-1440.
- Boskidis, I., Gikas, G.D., Sylaios, G. and Tsihrintzis, V.A. 2011. *Water quantity and quality assessment of lower Nestos river, Greece*. Journal of Environmental Science and Health-Part A, 46: 1050-1067.
- Boskidis, I., Gikas, G.D., Sylaios, G. and Tsihrintzis, V.A. 2012. *Hydrologic and water quality modeling of lower Nestos river basin*. Water Resources Management, DOI 10.1007/s11269-012-0064-7.
- Bottino, F., Ferraz, I.C., Mendiondo, E.M. and Calijuri, MC. 2010. *Calibration of QUAL2K model in Brazilian micro watershed: effects of the land use on water quality*. Acta Limnologica Brasiliensia, 22(4): 474-485.
- Chapra, S., Pelletier, G. and Tao, H. 2008. *QUAL2K: A modeling framework for simulating river and stream water quality, Version 2.11: Documentation and users manual*. Civil and Environmental Engineering Dept., Tufts University, Medford, MA.
- Chapra, S.C. and Pelletier, G.J. 2003. *QUAL2K: A modeling framework for simulating river and stream water quality (Beta Version): Documentation and users manual*. Civil and Environmental Engineering Dept., Tufts University.
- Dafis, S., Papastergiadou, E., Georgiou, K., Babalonas, D., Georgiadis, T., Papageorgiou, M., Lazaridou, T. and Tsiaoussi, V. 1997. *Directive 92/43/EEC: the project "Habitat" in Greece: Network Natura 2000*. Life contract B4-3200/84/756, DG XI commission of the European Communities. The Goulandris Museum of Natural History, Greek Biotope/Wetland Center.
- Fan, C., Ko, C. and Wang, W. 2009. *An innovative modeling approach using QUAL2K and HEC-RAS integration to assess the impact of tidal effect on river water quality simulation*. Journal of Environmental Management, 90: 1824-1832.
- Gikas, G.D., Yiannakopoulou, T. and Tsihrintzis, V.A. 2006a. *Modeling of non-point source pollution in a Mediterranean drainage basin*. Environmental Modeling and Assessment, 11: 219-233.
- Gikas, G.D., Yiannakopoulou, T. and Tsihrintzis, V.A. 2006b. *Water quality trends in a coastal lagoon impacted by non-point source pollution after implementation of protective measures*. Hydrobiologia, 563: 385-406.
- Gikas, G.D., Yiannakopoulou, T. and Tsihrintzis, V.A. 2009a. *Hydrodynamic and nutrient modeling in a Mediterranean coastal lagoon*. Journal of Environmental Science and Health-Part A, 44(13): 1400-1423.
- Gikas, G.D., Tsihrintzis, V.A., Akrotos, C.S. and Haralambidis, G. 2009b. *Water quality trends in Polyphytos reservoir, Aliakmon River, Greece*. Environmental Monitoring and Assessment, 149(1-4): 163-181.
- Kannel, P.R., Lee, S., Kanel, S.R., Lee, Y. and Ahn, K.-H. 2007a. *Application of QUAL2Kw for water quality modeling and dissolved oxygen control in the river Bagmati*. Environmental Monitoring Assessment, 125: 201-217.
- Kannel, P.R., Lee, S., Lee, Y.-S., Kanel, S.R. and Pelletier G.J. 2007b. *Application of automated QUAL2Kw for water quality modeling and management in the Bagmati River, Nepal*. Ecological Modelling, 202: 503-517.
- Novotny, V. and Olem, H. 1994. *Water Quality: Prevention, Identification and Management of Diffuse Pollution*. Van Nostrand Reinhold, USA.

- Pelletier, G.J., Chapra, S.C. and Tao H. 2006. *QUAL2Kw-A framework for modeling water quality in streams and rivers using a genetic algorithm for calibration*. Environmental Modeling and Software, 21: 419-425.
- Pelletier, G.J. and Chapra, C.S. 2005. *QUAL2Kw theory and documentation: A Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality Version 5.1*. Available from: <http://www.ecy.wa.gov/programs/eap/models/>. Access on: 7 April 2010.
- Singh, K.P., Malik, A. and Sinha, S. 2005. *Water quality assessment and apportionment of pollution sources of Gomti river (India) using multivariate statistical techniques - a case study*. Analytica Chimica Acta, 538: 355–374.
- Takamanis, H., Demertzidis, N., Gikas, G.D., Gemitzi, A., Mposkidis, I., Tsihrintzis, V.A., Petalas, C. and Ouzounis, K. 2007. *Quality of irrigation return water and proposals for its reuse in Chryssoupolis plain, Kavala, Greece*, Proceedings of the 10th International Conference on Environmental Science and Technology (CEST2007), September 5-7, Kos Island, Greece.
- Turner, D.F., Pelletier, G.J. and Kasper, B. 2009. *Dissolved oxygen and pH modeling of a periphyton dominated, nutrient enriched river*. Journal of Environmental Engineering, 135: 645-652.

**ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ PIZER HYDRA ΣΤΗΝ
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΟΜΒΡΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ ΤΟΥ ΔΗΜΟΥ
ΝΕΑΠΟΛΗΣ Ν. ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ**

Σταύρος Γιαννόπουλος*, Γρηγόριος Κωτούλας, Χρήστος Μυριούνης*****

Αριστοτέλειο Παν/στήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων
Μηχανικών, Τομέας Συγκ/νιακών και Υδραυλικών Έργων, 54124 Θεσσαλονίκη
*giann@vergina.eng.auth.gr, **gr.kot@hotmail.com, ***cmyriounis@gmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η ανάλυση και προσομοίωση τμήματος του δικτύου ομβρίων υδάτων του Δήμου Νεάπολης Ν. Θεσσαλονίκης. Αρχικά, πραγματοποιήθηκε ο σχεδιασμός του δικτύου σύμφωνα με τις ισχύουσες Τεχνικές Προδιαγραφές στην Ελλάδα (Π.Δ. 696/1974) και στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε η υδρολογική και υδραυλική προσομοίωσή του με τη βοήθεια του λογισμικού HYDRA της PIZER. Γενικότερα, διαπιστώνεται η πολύ καλή ανταπόκριση του δικτύου στα διάφορα σενάρια προσομοίωσης που πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση του λογισμικού αυτού. Τέλος, σχολιάζονται οι ισχύουσες Τεχνικές Προδιαγραφές (Τ.Π.) εκπόνησης μελετών δικτύων αποχέτευσης που ισχύουν στην Ελλάδα, επισημαίνονται οι αδυναμίες τους και γίνονται προτάσεις για τη βελτίωσή τους.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Δίκτυο ομβρίων, μοντέλο προσομοίωσης, ανάλυση ευαισθησίας, τεχνικές προδιαγραφές, ArcGIS, HYDRA

**SIMULATION OF STORMWATER DRAINAGE SYSTEM USING THE
SOFTWARE PIZER HYDRA – IMPLEMENTATION IN THE
MUNICIPALITY NEAPOLI, PREFECTURE OF THESSALONIKI
Stavros Yannopoulos*, Grigorios Kotoulas**, Christos Myriounis*****

Aristotle University of Thessaloniki, School of Rural and Surveying Engineering,
Dept. of Transportation and Hydraulic Engineering, Aristotle University,
54124 Thessaloniki, Greece

*giann@vergina.eng.auth.gr, **gr.kot@hotmail.com, ***cmyriounis@gmail.com

ABSTRACT

In the present study, are analyzed and simulated a part of the stormwater drainage system in Municipality of Neapoli, Prefecture Thessaloniki. At start, the current Greek Technical Specifications (P.D. 696/1974), were used to design the stormwater drainage system, and after the PIZER HYDRA software was used to simulate hydrological and hydraulic conditions. Generally was concluded that the stormwater drainage system responses successfully to different simulation scenarios that were examined. Finally, comments and recommendations for the improvement of the current Technical Specifications of stormwater design procedures in Greece were presented.

KEY WORDS: Stormwater network, model simulation, sensitivity analysis, technical guidelines, ArcGIS, HYDRA

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Μια σημαντική λειτουργία των δικτύων ομβρίων είναι να συγκεντρώνουν τα νερά της βροχής που απορρέουν από τις διάφορες επιφάνειες, όπως είναι τα κτίρια, οι δρόμοι, τα πεζοδρόμια, οι πλατείες κ.λπ. και να τα μεταφέρουν με βαρύτητα (κυρίως) οικονομικά και με ασφάλεια στον τελικό αποδέκτη (λίμνη, ποτάμι, θάλασσα κ.λπ.). Σε περιοχές που παρατηρείται έλλειψη ενός αποτελεσματικού δικτύου ομβρίων, σε κάθε βροχή παρατηρείται μετατροπή των δρόμων σε χείμαρρους, ενώ σημειώνονται απώλειες σε ανθρώπινες ζωές και περιουσίες (Martz, 1987). Τα έργα αποχέτευσης (όμβρια και ακάθαρτα) αποτελούν εξαιρετικής σημασίας έργα μιας αστικής περιοχής και μαζί με τα έργα ύδρευσης και οδοποιίας αποτελούν τα σημαντικότερα έργα υποδομής αρμοδιότητας Μηχανικού.

Όμως, αρκετές φορές, η σημασία των δικτύων αποχέτευσης παραβλέπεται, επειδή αφενός μεν είναι έργα υπόγεια και αφετέρου δεν προσφέρονται για προβολή και πολιτική εκμετάλλευση. Επίσης, δεν έχουν άμεσα οικονομικά αποτελέσματα και η υπηρεσία, που προσφέρουν δεν είναι εύκολο να αποτιμηθεί άμεσα, όπως συμβαίνει π.χ. με το νερό της ύδρευσης. Ακόμη, υπάρχουν και ψυχολογικοί παράγοντες, που δημιουργούν αποστροφή προς τα έργα αυτά και υποβαθμίζουν τη σημασία τους, επειδή συνδέονται με όχι τόσο άξιες προβολής στιγμές της ανθρώπινης ζωής (Κουτσογιάννης, 2011). Οι λόγοι αυτοί προκαλούν την καθυστέρηση της κατασκευής νέων έργων αποχέτευσης ή τη συντήρηση και ανακαίνιση των υφισταμένων παρά την επιτακτική ανάγκη για την κατασκευή τους για λόγους προστασίας της ζωής, της υγείας και της περιουσίας των πολιτών.

Η προσομοίωση στον τομέα των αποχετεύσεων συνίσταται στη δημιουργία του μοντέλου του αποχετευτικού δικτύου και στη μελέτη της συμπεριφοράς αυτού σε σχέση με τους διάφορους παράγοντες, που μπορούν να το επηρεάσουν (Yen, 1986). Σκοπός της προσομοίωσης είναι ο ποσοτικός και ποιοτικός προσδιορισμός των υδραυλικών παραμέτρων και των μεγεθών (παροχή, ταχύτητα και βάθος ροής, περιεκτικότητα σε ρύπους και φερτά υλικά κ.λπ.) σε κάθε σημείο του δικτύου, καθώς και η παρακολούθηση της διακύμανσης τους ανά διακριτά χρονικά διαστήματα, έτσι ώστε να είναι δυνατός ο έλεγχος της λειτουργίας του δικτύου ανά πάσα στιγμή κάτω από διαφορετικές συνθήκες. Με την προσομοίωση είναι δυνατή: (α) η δημιουργία σεναρίων, που να αφορούν στην απόκριση του συστήματος σε συγκεκριμένες συνθήκες (π.χ. ακραία καιρικά φαινόμενα, αύξηση της κατανάλωσης νερού, αστοχία τμημάτων του δικτύου κ.λπ.) και (β) η ανάλυση ευαισθησίας ορισμένων βασικών παραμέτρων αυτού. Το μοντέλο ενός αποχετευτικού δικτύου πρέπει να περιλαμβάνει, τόσο τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά αυτού (αγωγοί, φρεάτια, εγκαταστάσεις, συνδεσμολογία αγωγών κ.λπ.) και του περιβάλλοντα χώρου του (οικιστικό περιβάλλον, αστικές υπολεκάνες απορροής), όσο και εννοιολογικά χαρακτηριστικά (πληθυσμιακές πυκνότητες, ειδικές καταναλώσεις, κ.λπ.). Οι παράγοντες ή αλλιώς εξωτερικές διεγέρσεις που επηρεάζουν το μοντέλο ενός δικτύου αποχέτευσης μπορούν να έχουν ανθρωπογενή χαρακτήρα (ακάθαρτα νερά από το οικιστικό περιβάλλον), υδρολογικό-φυσικό (βροχοπτώσεις) ή στοχαστικό (βλάβες, αστοχίες υλικού, αποφράξεις αγωγών κ.λπ.).

Στη βιβλιογραφία έχει παρουσιαστεί ένας σημαντικός αριθμός μοντέλων προσομοίωσης της ποιότητας και της ποσότητας των απορροών από τις αστικές περιοχές. Βιβλιογραφική ανασκόπηση των μοντέλων αυτών και των δυνατοτήτων τους έχει γίνει από τον Zorrou (2001) και τον Zhao (2001). Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό HYDRA v.6.1 της PIZER, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το σχεδιασμό, την ανάλυση και την προσομοίωση χωριστικών και παντοροϊκών δικτύων αποχέτευσης (PIZER, 2000).

Οι τεχνικές προδιαγραφές εκπόνησης μελετών δικτύων αποχέτευσης ομβρίων και ακαθάρτων, που ισχύουν στην Ελλάδα (Π.Δ/γμα 696/1974, άρθρα 208 έως 219) έχουν μια διάρκεια ζωής 38 ετών, χωρίς να έχουν υποστεί μέχρι σήμερα καμία απολύτως ουσιαστική βελτίωση ή διόρθωση. Επίσης, στις προδιαγραφές αυτές δεν γίνεται καμία μνεία για τη δημιουργία μοντέλου προσομοίωσης του δικτύου ομβρίων και συνεπώς, ο Μελετητής δεν

υποχρεούνται να εξετάσει διάφορα σενάρια λειτουργίας του δικτύου. Η μελέτη, λοιπόν, των δικτύων αποχέτευσης, ομβρίων και ακαθάρτων, βασίζεται σε συγκεκριμένες παραδοχές και δεσμεύσεις, οι οποίες αναλύονται και σχολιάζονται.

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η περίπτωση του σχεδιασμού και της προσομοίωσης της ροής ενός δικτύου ομβρίων και ο έλεγχος της λειτουργίας του για διάφορα σενάρια με εφαρμογή στο Δήμο Νεάπολης Θεσσαλονίκης. Αρχικά, έγινε η επίλυση του δικτύου σύμφωνα με τις ισχύουσες Τεχνικές Προδιαγραφές στην Ελλάδα (Π.Δ. 696/1974) και στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε η υδραυλική και υδρολογική προσομοίωση της λειτουργίας του με τη βοήθεια του λογισμικού HYDRA. Διαπιστώνεται ότι το δίκτυο ανταποκρίνεται σε όλα τα σενάρια που εξετάστηκαν. Κατόπιν, πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας ορισμένων βασικών παραμέτρων, που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση του δικτύου και έγινε έλεγχος των ενδεχόμενων επιπτώσεων, που παρουσιάζονται στη λειτουργία του. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν δείχνουν ότι το δίκτυο είναι ευαίσθητο ως προς τη μεταβολή ορισμένων από τις παραμέτρους αυτές. Τέλος, αναλύονται και σχολιάζονται οι ισχύουσες Τεχνικές Προδιαγραφές (Τ.Π.) εκπόνησης μελετών δικτύων ύδρευσης που ισχύουν στην Ελλάδα, επισημαίνονται οι αδυναμίες τους και γίνονται προτάσεις για τη βελτίωση τους.

2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ – ΠΡΩΤΟΓΕΝΗ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Ο Δήμος Νεάπολης βρίσκεται στο βορειοδυτικό τμήμα του Πολεοδομικού Συγκροτήματος της Θεσσαλονίκης, έχει έκταση 1.160 στρεμμάτων και κατοικείται από 30.279 κατοίκους, (απογραφή έτους 2001). Ο Δήμος συνορεύει βόρεια με το Δήμο Σταυρούπολης, βόρεια-βορειοδυτικά με το Δήμο Πολίχνης, νότια - νοτιοδυτικά με το Δήμο Συκεών, νότια-νοτιοανατολικά με το Δήμο Θεσσαλονίκης και τέλος, νότια με το Δήμο Αμπελοκήπων. Ο Δήμος Νεάπολης αποτελείται από 8 πολεοδομικές ενότητες (Νεάπολη, Άνω Αναγέννηση, Κάτω Αναγέννηση, Πυροπαθείς, Τρωάδα, Ρήγα Φεραίου, Υδραγωγείο και Κουντουριώτη) τα όρια των οποίων απεικονίζονται στην Εικόνα 1.



Εικόνα 1: Πολεοδομικές ενότητες του Δήμου Νεάπολης

Για την ανάλυση και τη διερεύνηση της λειτουργίας του δικτύου ομβρίων υδάτων, ήταν απαραίτητη η χρήση πρωτογενών στοιχείων, τα οποία είναι τα εξής (Κωτούλας, 2010): (α) Το τοπογραφικό υπόβαθρο, το οποίο είναι χάρτης σε ψηφιακή μορφή (αρχείο DEM) με τις ρυμοτομικές γραμμές και τις ισοϋψείς καμπύλες της ευρύτερης περιοχής. (β) Δορυφορική

εικόνα της ευρύτερης περιοχής της Θεσσαλονίκης, που χρησιμοποιήθηκε για τον εντοπισμό και τον καθορισμό των ζωνών χρήσεων γης του Δήμου Νεάπολης, αλλά και για λόγους πληρότητας του Γεωγραφικού Συστήματος Πληροφοριών. (γ) Υδρολογικά στοιχεία της περιοχής μελέτης. Επειδή δεν υπάρχουν μετρήσεις βροχής – απορροής, χρησιμοποιήθηκαν οι εξισώσεις όμβριων καμπυλών (IDF) (ΘΕΣΜΕΑ, 1973):

$i = 2,581 t^{-0,62} \quad (2.1)$	$i = 4,028 t^{-0,65} \quad (2.2)$	$i = 4,496 t^{-0,64} \quad (2.3)$
-----------------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------

όπου i είναι η ένταση της βροχόπτωσης (mm/min) και t είναι ο χρόνος συγκέντρωσης (min). Σημειώνεται ότι οι εξισώσεις (2.1), (2.2) και (2.3) ισχύουν για περιόδους επαναφοράς 2, 5 και 10 ετών, αντιστοίχως.

3. ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΟΜΒΡΙΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΙΣ ΙΣΧΥΟΥΣΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Το δίκτυο αποχέτευσης ομβρίων υδάτων του Δήμου Νεάπολης επιλύθηκε αρχικά σύμφωνα με τις ισχύουσες Τ.Π. (Π.Δ. 696/1974), οι οποίες ορίζουν ότι ο σχεδιασμός των αγωγών πρέπει να γίνεται, έτσι ώστε η ροή σε αυτούς να είναι με ελεύθερη επιφάνεια, οπότε το ανώτερο τμήμα της γεωμετρικά κλειστής διατομής τους χρησιμοποιείται ως περιθώριο ασφαλείας για αερισμό και όχι από υδραυλικής απόψεως.

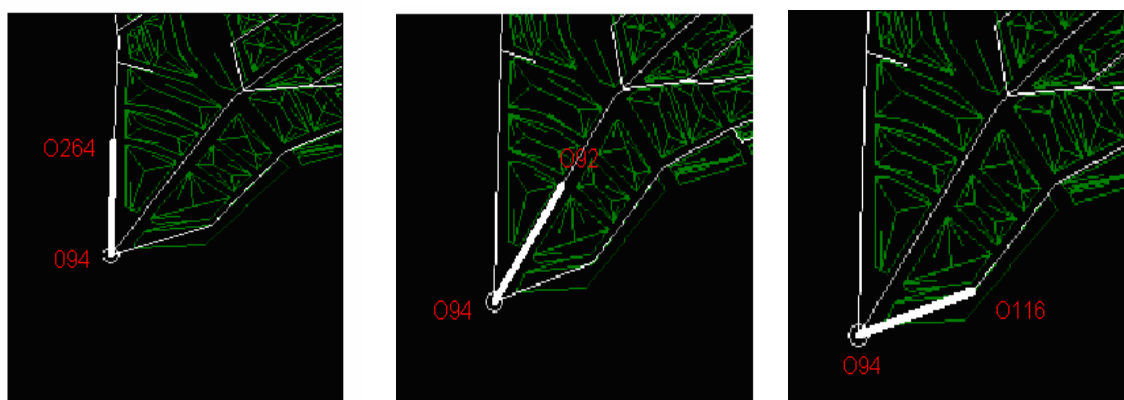
Οι παραδοχές που γίνονται κατά τους υδραυλικούς υπολογισμούς των δικτύων ομβρίων είναι: (α) Μόνιμες συνθήκες ροής. (β) Ροή ομοιόμορφη κατά τμήματα. (γ) Τα όμβρια θεωρούνται ως «καθαρό νερό» (από υδραυλικής απόψεως). (δ) Οι διορθωτικοί συντελεστές της κινητικής ενέργειας, α , και της ορμής, β , λαμβάνονται ίσοι με τη μονάδα. Σχολιασμός των παραδοχών αυτών γίνεται από τους Chin (2000), Γιαννόπουλος (2002), Κουτσογιάννης (2011). Οι υδραυλικοί υπολογισμοί για αγωγούς κυκλικής διατομής με ελεύθερη επιφάνεια έγιναν με τη βοήθεια των σχέσεων (Γιαννόπουλος, 2002):

$V = \frac{1}{n} \left(1 - \frac{\sin \theta}{\theta}\right)^{2/3} \left(\frac{D}{4}\right)^{2/3} J^{1/2}$	$V_o = \frac{1}{n} \left(\frac{D}{4}\right)^{2/3} J^{1/2}$	$\frac{V}{V_o} = \left(1 - \frac{\sin \theta}{\theta}\right)^{2/3}$
$Q = 0,0496 \frac{1}{n} \theta \left(1 - \frac{\sin \theta}{\theta}\right)^{5/3} D^{8/3} J^{1/2}$	$Q_o = 0,3115 \frac{D^{8/3} J^{1/2}}{n}$	$\frac{Q}{Q_o} = \frac{\theta}{2\pi} \left(1 - \frac{\sin \theta}{\theta}\right)^{5/3}$
$\frac{y}{D} = \frac{1 - \cos(\theta/2)}{2}$	$V_o = \frac{4 Q}{\pi D^2}$	$V_{10\%} = 0,639 V_o$

όπου στις εξισώσεις αυτές V (m/s) και Q (m³/s) είναι η μέση ταχύτητα και η παροχή για μερική πληρότητα βάθους ροής, y , αντιστοίχως, V_o (m/s) και Q_o (m³/s) είναι η μέση ταχύτητα και η παροχή για ολική πληρότητα του αγωγού κυκλικής διατομής διαμέτρου D (m) και συντελεστή τραχύτητας n αντιστοίχως, J είναι η κλίση της γραμμής ενέργειας που για ομοιόμορφη ροή ισούται με την κλίση του αγωγού και θ (rad) η επίκεντρος γωνία (Γιαννόπουλος, 2002, Κουτσογιάννης, 2011). Σε συνθήκες μερικής πληρότητας ο συντελεστής τραχύτητας, n , εξαρτάται από το βάθος ροής, y . Όμως, δεν υπάρχει σχετική πρόνοια στις ισχύουσες Τεχνικές Προδιαγραφές στην Ελλάδα (Π.Δ. 696/1974) για το θέμα αυτό. Γι' αυτό κατά τους υδραυλικούς υπολογισμούς θεωρήθηκε ότι ο συντελεστής τραχύτητας, n , δεν μεταβάλλεται με το βάθος ροής. Εξάλλου σύμφωνα με την ASCE (1982), η χρήση σταθερού ή μεταβλητού συντελεστή τραχύτητας, n , ανήκει, υπό προϋποθέσεις, στη διακριτική ευχέρεια του Μελετητή Μηχανικού, ο οποίος είναι υπεύθυνος να αποφασίσει.

Οι ισχύουσες Τ.Π. στην Ελλάδα ορίζουν, επίσης, για τους αγωγούς ομβρίων και τα εξής: (α) Ελάχιστη επιτρεπόμενη εσωτερική διάμετρος αγωγού κυκλικής διατομής 400mm. (β). Ποσοστό πλήρωσης $y/D \leq 0,70$ ανεξάρτητα από το μέγεθος της διατομής, όπου το περιθώριο ασφαλείας δεν πρέπει υπερβαίνει το 1,0 m. (Το ποσοστό αυτό ισχύει γενικά για νέους αγωγούς ομβρίων). (γ) Ελάχιστες επιτρεπόμενες κλίσεις τέτοιες ώστε η ταχύτητα που αντιστοιχεί στο 10% της παροχτευτικότητας του αγωγού να υπερβαίνει την τιμή 0,60m/s. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί σε ελάχιστη ταχύτητα για πλήρη ροή ίση με 0,94m/s. (δ) Μέγιστη ταχύτητα ροής για αγωγό πλήρους ροής 6m/s. Για τον υπολογισμό της παροχής σχεδιασμού χρησιμοποιήθηκε η ορθολογική μέθοδος (Chow et al., 1988, Chin, 2000). Η εκτέλεση των υπολογισμών έγινε σε ειδικά διαμορφωμένο φύλλο του Excel 2007 της Microsoft.

Η οριζοντιογραφική θέση του μοναδικού φρεατίου εκροής (Outfall Node) O94 του δικτύου και των αγωγών που καταλήγουν σε αυτό (O264–O94, O92 – O94 και O116–O94) απεικονίζονται στην Εικόνα 2. Οι διαμέτροι των ανωτέρω αγωγών οι οποίοι καταλήγουν στο φρεάτιο εκροής O94, είναι κυκλικής διατομής, διαμέτρου 1200mm, 1200mm και 1000mm και τα ποσοστά πλήρωσης είναι 62%, 56% και 51% αντίστοιχα.



Εικόνα 2: (α). Αγωγός O264 – O94, (β). Αγωγός O92 – O94 και (γ). Αγωγός O116 – O94 που καταλήγουν στο φρεάτιο εκροής O94.

4. ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ HYDRA ΤΗΣ PIZER

Το λογισμικό HYDRA μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το σχεδιασμό, την ανάλυση και την προσομοίωση μοντέλων χωριστικών και παντοροϊκών δικτύων αποχέτευσης. Επίσης, μπορεί να αποτελέσει και εργαλείο διαχείρισης δικτύων αποχέτευσης, γιατί έχει τη δυνατότητα κωδικοποίησης, οργάνωσης και οπτικοποίησης των στοιχείων του δικτύου και των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης σε βάσεις δεδομένων και ψηφιακούς χάρτες. Η λειτουργία του λογισμικού βασίζεται σε βασικές και θεμελιώδεις αρχές της υδραυλικής και της υδρολογίας. Η PIZER ακολουθεί τη λογική του κλειστού κώδικα ή black box και συνεπώς, δεν είναι γνωστή η θεωρητική τεκμηρίωση του λογισμικού αυτού. Το HYDRA δημιουργήθηκε ειδικά για την ανάλυση, το σχεδιασμό και τη διαχείριση δικτύων ομβρίων και ακαθάρτων, όπου ο σχεδιασμός του δικτύου γίνεται σε περιβάλλον Autocad 2000 με τη βοήθεια του επικαθήμενου σε αυτό προγράμματος GISMaster της PIZER (Pizer, 2000). Νεότερες εκδόσεις του HYDRA χρησιμοποιούν και νεότερες εκδόσεις του Autocad της Autodesk. Αναλυτική παρουσίαση του λογισμικού HYDRA v.6.1. με εφαρμογή σε παντοροϊκό δίκτυο γίνεται από τον Κωνσταντινίδη (2004) και με εφαρμογή σε δίκτυο ομβρίων χωριστικού δικτύου από τον Κωτούλα (2010).

5. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΜΕ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ HYDRA ΤΗΣ PIZER

Με το λογισμικό HYDRA μπορεί να γίνει, τόσο υδρολογική, όσο και υδραυλική ανάλυση ενός δικτύου ομβρίων. Οι υδρολογικές μέθοδοι που διαθέτει το HYDRA είναι η τροποποιημένη ορθολογική μέθοδος, η μέθοδος Santa Barbara S.C.S. και η μέθοδος Hydrologic True Simulation.

Η τροποποιημένη ορθολογική μέθοδος (Modified Rational Method – M.R.M.) αποτελεί επέκταση της απλής ορθολογικής μεθόδου για επεισόδια βροχής, τα οποία διαρκούν περισσότερο από το χρόνο συγκέντρωσης. Η μέθοδος επεκτείνει την κεντρική ιδέα της ορθολογικής μεθόδου με τη δημιουργία υδρογραφημάτων, που αποτυπώνουν το σύνολο του απορρέοντος υδάτινου όγκου και όχι μόνο την παροχή αιχμής. Η μορφή του παραγόμενου υδρογραφήματος απορροής είναι συνήθως ένα τραπέζιο του οποίου ο ανερχόμενος και κατερχόμενος κλάδος ορίζονται από το χρόνο συγκέντρωσης, t_c , ενώ η αιχμή της πλημμύρας προκύπτει από επεισόδια βροχής διαφόρων διαρκειών (Pain and Akan, 2001).

Η μέθοδος Santa Barbara SCS αναπτύχθηκε αρχικά από την SCS και αργότερα τροποποιήθηκε από την Santa Barbara County της Καλιφόρνια για να είναι πιο κατάλληλη για μικρές λεκάνες απορροής αστικών περιοχών (PIZER, 2000).

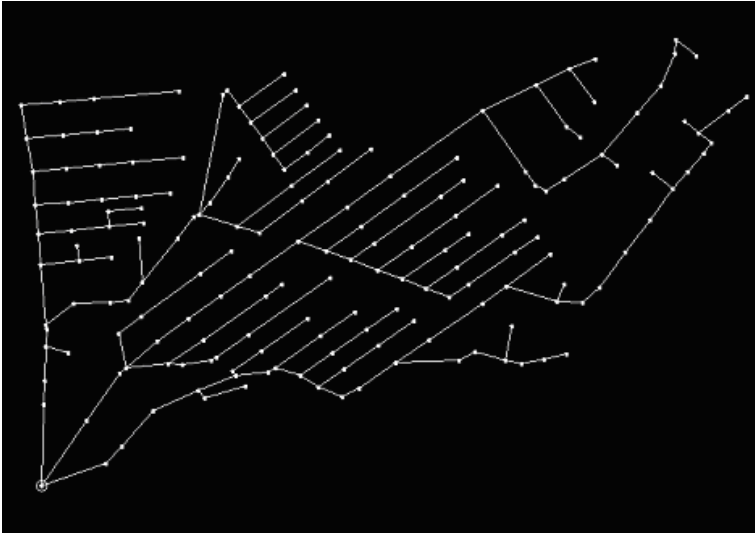
Η μέθοδος Hydrologic True Simulation (H.T.S.) αναπτύχθηκε από την εταιρία PIZER και βασίζεται στο μοντέλο συνεχούς προσομοίωσης Stanford Watershed Model (SWM) για τη μετατροπή της βροχής σε απορροή, που αναπτύχθηκε από τους Crawford and Linsley (1966). Η αρχική χρήση του μοντέλου αυτού δεν προοριζόταν για χρήση σε αστικές περιοχές, ωστόσο με τη μέθοδο Hydrologic True Simulation, έγινε προσαρμογή του και για αστικές περιοχές (PIZER, 2000). Οι αναλυτικές εξισώσεις της μεθόδου αυτής δεν είναι διαθέσιμες από την PIZER και ούτε δίνονται στους χρήστες του λογισμικού HYDRA.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται η τροποποιημένη ορθολογική μέθοδος και η μέθοδος Hydrologic True Simulation.

Το δίκτυο, που διαστασιολογήθηκε με βάση τις Τεχνικές Προδιαγραφές που ισχύουν στην Ελλάδα, αποτέλεσε τη βάση για: (α) τη σύγκριση της τροποποιημένης ορθολογικής μεθόδου και της Hydrologic True Simulation στην υδραυλική προσομοίωση του δικτύου, (β) τη δημιουργία εναλλακτικών σεναρίων, ως προς ενδεχόμενες αλλαγές σε χρήσεις γης, και (γ) την απόκριση του αποχετευτικού συστήματος σε διαφορετικά επεισόδια βροχής σχεδιασμού. Η εισαγωγή του δικτύου στο λογισμικό HYDRA έγινε σε περιβάλλον AUTOCAD 2000 της AUTODESK με τη βοήθεια του επικαθήμενου στο HYDRA λογισμικού GISMaster της PIZER (PIZER, 2000).

Στη μελέτη του δικτύου ομβρίων περιελήφθησαν μόνο οι έξι Πολεοδομικές Ενότητες (Π.Ε.) του Δήμου Νεάπολης (εξαιρέθηκαν η Άνω και Κάτω Αναγέννηση) λόγω αδυναμίας του HYDRA να συμπεριλάβει ολόκληρη την περιοχή. Όμως, για τις πολεοδομικές ενότητες που δεν συμπεριλαμβάνονται στη μελέτη ελήφθησαν υπόψη οι απορροές τους. Ορίστηκαν 373 αστικές υπολεκάνες με συνολικό εμβαδό 71,53 ha και υπολογίστηκαν για καθεμία από αυτές το μήκος (m), η μέση κλίση (m/m), το ποσοστό της επιφάνειας της λεκάνης απορροής το οποίο είναι δομημένο ή ασφαλτοστρωμένο, το ποσοστό της δομημένης επιφάνειας, το οποίο καλύπτεται από στέγες (κατ' εκτίμηση) κ.λπ. Το συνολικό μήκος των 180 αγωγών του δικτύου ανέρχεται σε 12,6 km, ενώ ο συνολικός αριθμός των φρεατίων σε 181. Η χάραξη του δικτύου έγινε σε περιβάλλον CAD, ενώ οι υπολογισμοί σε περιβάλλον G.I.S. Στην Εικόνα 3 απεικονίζεται το δίκτυο ομβρίων του Δήμου Νεάπολης στο περιβάλλον του HYDRA.

Ο προσδιορισμός των εδαφολογικών χαρακτηριστικών της περιοχής μελέτης, έγινε με σκοπό των καθορισμό των παραμέτρων εισόδου στο μοντέλο, για την προσομοίωση της επιφανειακής ροής των ομβρίων υδάτων. Όσον αφορά στην τροποποιημένη ορθολογική μέθοδο, εκτιμήθηκε ο συντελεστής απορροής C για τις δομημένες περιοχές (που αποτελούσαν και την πλειοψηφία) ότι είναι 0,90 και για τους χώρους πρασίνου 0,25.



Εικόνα 3: Το δίκτυο ομβρίων του Δήμου Νεάπολης στο περιβάλλον του HYDRA

Στην περίπτωση της μεθόδου Hydrologic True Simulation, εκτιμήθηκαν στοιχεία, όπως ο συντελεστής τραχύτητας, το μέσο βάθος και οι κλίσεις των εδαφικών κοιλοτήτων, το ποσοστό της βροχόπτωσης που πληρώνει τις εδαφικές κοιλοότητες, το ποσοστό του νερού που παραμένει στις εδαφικές κοιλοότητες, ο χρόνος που χρειάζεται για την αποστράγγιση των εδαφικών κοιλοτήτων και ο όγκος του νερού που απορρέει ανά μονάδα (ha) επιφάνειας (Κωτούλας, 2010). Τα στοιχεία αυτά ελήφθησαν με βάση τιμές που χρησιμοποιούνται ευρέως στις Η.Π.Α, καλύπτοντας ένα ευρύ φάσμα εδαφικών τύπων. Οι τιμές αυτές προέκυψαν, τόσο από σχετικές βιβλιογραφικές αναφορές, όσο και από αναλυτικές παρατηρήσεις και μετρήσεις του Allen Peyser και των συνεργατών του, οι οποίες παρατίθενται αναλυτικά στο εγχειρίδιο χρήσης του λογισμικού HYDRA (PIZER, 2000). Το γεγονός ότι χρησιμοποιήθηκαν προσεγγιστικές τιμές, οφείλεται στο ότι δεν υπήρχαν διαθέσιμα ανάλογα δεδομένα στην περιοχή μελέτης.

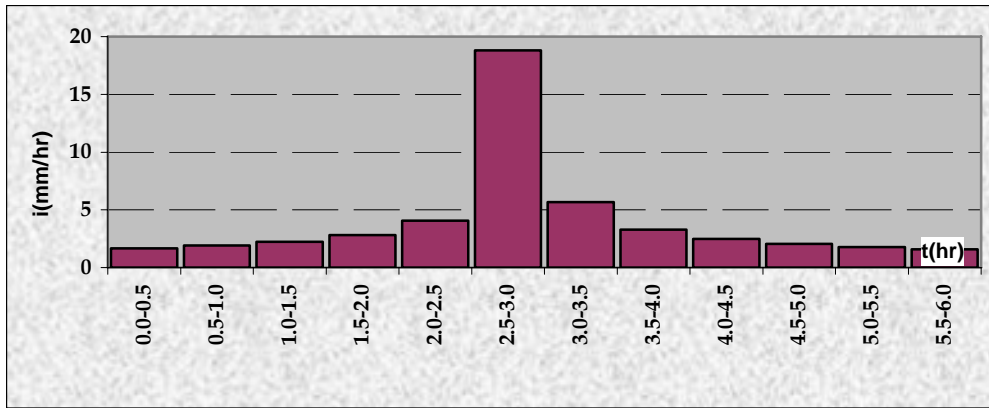
5.1. ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ

Για την υδρολογική προσομοίωση του δικτύου πραγματοποιήθηκαν εννέα συνολικά υδρολογικές αναλύσεις για ισάριθμα συνθετικά υετογραφήματα, που προέκυψαν για βροχές σχεδιασμού διάρκειας 6, 12 και 24 hr και περιόδους επαναφοράς 2, 5 και 10 ετών (σχέσεις 2.1, 2.2 και 2.3). Με βάση τα δεδομένα αυτά κατασκευάστηκαν συνθετικά υετογραφήματα σχεδιασμού (synthetic design storm) με τη μέθοδο των εναλασσόμενων υψών βροχής (Chow et. al, 1988). Για τον καθορισμό του χρονικού βήματος Δt των υετογραφήματων σχεδιασμού ελήφθησαν υπόψη οι Οδηγίες της Transport Association of Canada (RTAC, 1982) και του Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε. (2002).

Στο Σχήμα 1 απεικονίζεται, σαν χαρακτηριστικό παράδειγμα, το συνθετικό υετογράφημα βροχής σχεδιασμού διάρκειας 6 hr με χρονικό βήμα $\Delta t=0,5$ hr με τη μέθοδο των εναλασσόμενων υψών βροχής και για περίοδο επαναφοράς 2 έτη.

5.2. ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ

Το ενδιαφέρον της υδραυλικής προσομοίωσης, όσον αφορά στην εκτίμηση των παροχών, εστιάστηκε στους αγωγούς O264-O94, O92-O94 και O116-O94, που καταλήγουν στο μοναδικό φρεάτιο εκροής του δικτύου 94 και οι οποίοι αποτελούν τους ρυθμιστές για το κατάντη τμήμα του δικτύου ομβρίων.



Σχήμα 1: Συνθετικό υετογράφημα βροχής σχεδιασμού 6 hr με χρονικό βήμα $\Delta t = 0,5$ hr με τη μέθοδο των εναλλασσόμενων υψών βροχής και για περίοδο επαναφοράς $T=2$ έτη.

Στους Πίνακες 1 και 2 δίνονται οι εκτιμώμενες παροχές αιχμής και οι μέσες ταχύτητες ροής στους τρεις αγωγούς που καταλήγουν στο μοναδικό φρεάτιο εκροής O94 του συστήματος, σύμφωνα με την τροποποιημένη ορθολογική μέθοδο (Modified Rational Method - M.R.M.) και τη Hydrologic True Simulation (H.T.S.).

Πίνακας 1: Παροχές αιχμής (m^3/s) στο φρεάτιο εξόδου O94 με τις μεθόδους M.R.M. και H.T.S.

T (έτη)	t (hr)	Αγωγός					
		O264 – O94		O92 – O94		O116 – O94	
		M.R.M.	H.T.S.	M.R.M.	H.T.S.	M.R.M.	H.T.S.
2	6	3,08	0,86	3,32	1,03	2,02	0,59
	12	3,08	0,86	3,32	1,03	2,02	0,59
	24	3,08	0,86	3,32	1,03	2,02	0,59
5	6	4,70	1,20	4,99	1,43	3,04	0,81
	12	4,70	1,20	4,99	1,43	3,04	0,81
	24	4,70	1,20	4,99	1,43	3,04	0,81
10	6	5,35	1,32	5,71	1,59	3,49	0,90
	12	5,35	1,32	5,71	1,59	3,49	0,90
	24	5,35	1,32	5,71	1,59	3,49	0,90

Από τον Πίνακα 1 προκύπτει ότι η τροποποιημένη ορθολογική μέθοδος (M.R.M.) δίνει πολύ μεγαλύτερες παροχές (69%-75%) σε σχέση με αυτές της Hydrologic True Simulation (H.T.S.), για όλα τα υετογραφήματα βροχής σχεδιασμού διάρκειας 6, 12 και 24 hr, ενώ από τον Πίνακα 2 προκύπτει ότι οι μέσες ταχύτητες ροής βρίσκονται μέσα στα επιτρεπτά όρια.

Με τη βοήθεια σχετικών συνδυαστικών ερωτημάτων (Queries) προσδιορίστηκαν οι αγωγοί στους οποίους η ταχύτητα ροής υπερβαίνει τη μέγιστη επιτρεπόμενη, υπολείπεται της ελάχιστης επιτρεπόμενης και ο αριθμός των αγωγών που βρίσκονται υπό πίεση.

Τα αποτελέσματα σε συνοπτική μορφή δίνονται στον Πίνακα 3, από τον οποίο προκύπτει ότι με τη μέθοδο H.T.S. όλοι οι αγωγοί του δικτύου ικανοποιούν το μέγιστο όριο ταχύτητας, ενώ σημαντικός αριθμός από αυτούς υπολείπεται της ελάχιστης επιτρεπόμενης ταχύτητας. Επιπλέον, διαπιστώνεται ότι ο αριθμός των αγωγών του δικτύου που βρίσκονται με ροή υπό πίεση είναι πολύ μεγαλύτερος με τη μέθοδο M.R.M. σε σχέση με τη μέθοδο H.T.S. Τέλος,

διαπιστώνεται ότι ο αριθμός των αγωγών που υπερβαίνουν τη μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα είναι πολύ μεγαλύτερος με τη μέθοδο M.R.M. σε σχέση με τη μέθοδο H.T.S.

Πίνακας 2: Ταχύτητες ροής (m/s) στο φρεάτιο εξόδου O94 με τις μεθόδους M.R.M. και H.T.S.

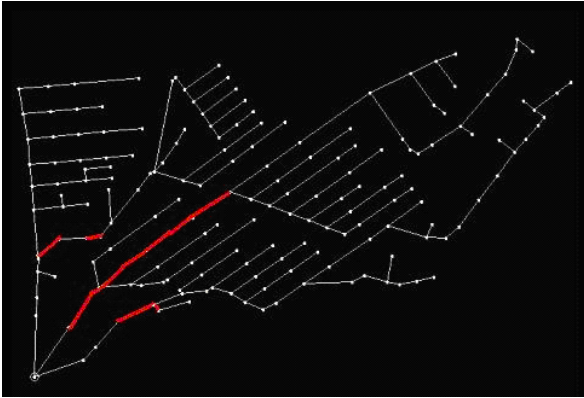
<i>T</i> (έτη)	<i>t</i> (hr)	Αγωγός					
		O264 – O94		O92 – O94		O116 – O94	
		M.R.M.	H.T.S.	M.R.M.	H.T.S.	M.R.M.	H.T.S.
2	6	4,17	2,83	5,08	3,57	5,06	3,55
	12	4,17	2,83	5,08	3,57	5,06	3,55
	24	4,17	2,83	5,08	3,57	5,06	3,55
5	6	4,71	3,13	5,75	3,93	5,74	3,84
	12	4,71	3,13	5,75	3,93	5,74	3,84
	24	4,71	3,13	5,75	3,93	5,74	3,84
10	6	4,73	3,24	5,98	4,07	5,98	3,95
	12	4,73	3,24	5,98	4,07	5,98	3,95
	24	4,73	3,24	5,98	4,07	5,98	3,95

Πίνακας 3: Σύγκριση των αποτελεσμάτων της υδραυλικής προσομοίωσης του δικτύου σύμφωνα με τις μεθόδους M.R.M. και H.T.S.

<i>T</i> (έτη)	<i>t</i> (hr)	Αριθμός των αγωγών					
		με ταχύτητα $V \leq V_{max}$		με ταχύτητα $V \leq V_{min}$		με ροή υπό πίεση	
		M.R.M.	H.T.S.	M.R.M.	H.T.S.	M.R.M.	H.T.S.
2	6	2	-	7	13	35	2
	12	2	-	7	13	35	2
	24	2	-	7	13	35	2
5	6	11	-	7	10	65	5
	12	11	-	7	10	65	5
	24	11	-	7	10	65	5
10	6	13	-	7	10	99	9
	12	13	-	7	10	99	9
	24	13	-	7	10	99	9

Επίσης, από τον Πίνακα 3 προκύπτει ότι, ανεξάρτητα από τη μέθοδο που χρησιμοποιείται (M.R.M. ή H.T.S.), ο αριθμός των αγωγών των οποίων η ροή είναι υπό πίεση αυξάνει με την αύξηση της περιόδου επαναφοράς. Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο, αφού μεγαλύτερη περίοδος επαναφοράς συνεπάγεται μεγαλύτερα ύψη βροχής και συνεπώς, μεγαλύτερη φόρτιση του δικτύου.

Το HYDRA έχει τη δυνατότητα να παρουσιάσει γραφικά τον εντοπισμό των αγωγών που υπερβαίνουν τη μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα ή των αγωγών που υπολείπονται της ελάχιστης επιτρεπόμενης, καθώς επίσης και τους αγωγούς που βρίσκονται υπό πίεση. Στην Εικόνα 4 απεικονίζεται, σαν χαρακτηριστικό παράδειγμα, ο γραφικός εντοπισμός των αγωγών στους οποίους η ταχύτητα ροής υπερβαίνει τη μέγιστη επιτρεπόμενη για περίοδο επαναφοράς 5 έτη με τη μέθοδο M.R.M.



Εικόνα 4: Γραφικός εντοπισμός των αγωγών (11 αγωγοί) των οποίων η ταχύτητα ροής υπερβαίνει τη μέγιστη επιτρεπόμενη για περίοδο επαναφοράς 5 ετών με τη μέθοδο M.R.M.

Το λογισμικό HYDRA έχει τη δυνατότητα να εντοπίζει και να απεικονίζει γραφικά στην οριζοντιογραφία του δικτύου τα φρεάτια που υπερχειλίζουν. Στην παρούσα εφαρμογή, παρατηρήθηκαν υπερχειλίσεις φρεατίων μόνο για την περίπτωση της τροποποιημένης ορθολογικής μεθόδου για περιόδους επαναφοράς 5 ετών (1 αγωγός) και 10 ετών (13 αγωγοί).

6. ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ

Σύμφωνα με τους Overton and Meadows (1976) στην απόδοση ενός μοντέλου η έρευνα για την ευαισθησία των παραμέτρων αυτού είναι αναπόσπαστο και βασικής σημασίας τμήμα της διαδικασίας προσομοίωσης. Ο Nix (1994) υπογραμμίζει ότι η επαλήθευση ενός μοντέλου δεν είναι ολοκληρωμένη χωρίς την πλήρη ανάλυση της ευαισθησίας των παραμέτρων αυτού. Συγκεκριμένα, οι παράμετροι ενός μοντέλου που έχουν προκύψει από μια διαδικασία βαθμονόμησης (π.χ. βέλτιστη προσαρμογή), η ανάλυση ευαισθησίας επιδιώκεται με τη διατήρηση σταθερών όλων των παραμέτρων του μοντέλου εκτός από μια και μεταβάλλοντας (διαταράσσοντας) την παράμετρο αυτή να εξεταστεί η επίδραση της στην αντικειμενική συνάρτηση ή στο τελικό αποτέλεσμα. Σε περίπτωση που μικρές διακυμάνσεις της παραμέτρου αυτής συνεπάγονται σημαντικές μεταβολές στην αντικειμενική συνάρτηση ή στο τελικό αποτέλεσμα, τότε το σύστημα θεωρείται ότι είναι ευαίσθητο στην παράμετρο αυτή. Αυτό είναι ένα μέτρο της ακρίβειας με την οποία πρέπει να εκτιμηθεί η συγκεκριμένη παράμετρος για την ακρίβεια της προσομοίωσης. Σε περίπτωση που η αντικειμενική συνάρτηση ή το τελικό αποτέλεσμα δεν είναι ευαίσθητο στη διακύμανση της παραμέτρου, τότε η παράμετρος αυτή δεν απαιτείται να εκτιμηθεί με μεγάλη ακρίβεια. Στην περίπτωση που το σύστημα είναι εξαιρετικά αδιάφορο στη διακύμανση της παραμέτρου, τότε αυτή σε συνδυασμό και με τη συνιστώσα του συστήματος που την αφορά μπορεί να θεωρηθεί ως «αδιάφορη» (περιττή) και συνεπώς, να αφαιρεθεί από το μοντέλο.

Στην παρούσα εργασία που αφορά στην προσομοίωση της ροής ενός δικτύου ομβρίων που βρίσκεται στη φάση της μελέτης και δεν είναι κατασκευασμένο, δεν υφίστανται μετρήσεις των απορροών (μετρημένα υδρογραφήματα) σε συγκεκριμένες θέσεις του δικτύου, οπότε δεν μπορεί να γίνει ρύθμιση των παραμέτρων αυτού και επαλήθευση του (Khandan, 2002). Γι' αυτό γίνεται ανάλυση ευαισθησίας, που συνίσταται στη μεταβολή ορισμένων παραμέτρων, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση του δικτύου του Δήμου Νεάπολης και στον έλεγχο των ενδεχόμενων επιπτώσεων, που παρουσιάζονται στη λειτουργία αυτού.

Κατ' αρχήν εξετάστηκε η ευαισθησία του μοντέλου ως προς το συντελεστή τραχύτητας Manning, n , των αγωγών του δικτύου. Κατά την προσομοίωση του δικτύου ελήφθη μια τιμή του συντελεστή αυτού ίση με 0,015. Για να εξεταστεί η ευαισθησία του δικτύου ως προς το συντελεστή αυτό έγινε προσομοίωση για τιμές $n_1=0,018$ (αύξηση κατά 20%) και $n_2=0,020$

(αύξηση κατά 33,3%) και υπολογίστηκαν οι παροχές αιχμής, Q , και τα βάθη ροής, h , στους κύριους αγωγούς του δικτύου O264 – O94, O92 – O94, O116 – O94. Η προσομοίωση έγινε με τη μέθοδο Hydraulic True Simulation για βροχή σχεδιασμού 24 hr και περίοδο επαναφοράς 10 έτη (Πίνακας 4).

Πίνακας 4: Παροχές αιχμής και βάθος ροής των αγωγών που απορρέουν στον τελικό αποδέκτη για διαφορετικές τιμές του συντελεστή τραχύτητας Manning, n .

Συντελεστής τραχύτητας Manning, n	Αγωγός					
	O264 – O94		O92 – O94		O116 – O94	
	Q (m ³ /s)	h (m)	Q (m ³ /s)	h (m)	Q (m ³ /s)	h (m)
0,015	1,32	0,47	1,59	0,44	0,91	0,33
0,018	1,30	0,50	1,55	0,49	0,89	0,36
0,020	1,28	0,54	1,51	0,52	0,87	0,37

Από τον Πίνακα 4 προκύπτει ότι για μεταβολή του συντελεστή τραχύτητας κατά 20% η μεταβολή της παροχής είναι της τάξεως του -2,5% και για μεταβολή κατά 33,3% η μεταβολή είναι της τάξεως του -5%, ενώ όσον αφορά στο βάθος ροής οι μεταβολές αυτές είναι της τάξης του +11% και +18% αντιστοίχως. Συνεπώς, διαπιστώνεται η αβεβαιότητα στην εκτίμηση του συντελεστή τραχύτητας έχει μεγαλύτερες επιπτώσεις στο βάθος ροής και όχι στην παροχή. Πάντως, για όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν δεν διαπιστώθηκε ροή υπό πίεση στους αγωγούς του δικτύου και υπερχειλίσεις στα φρεάτια.

Στη μέθοδο Hydraulic True Simulation υπεισέρχεται ο συντελεστής τραχύτητας n_{surf} της επιφανειακής απορροής, ο οποίος εξαρτάται από το υλικό επικάλυψης του εδάφους. Για την περίπτωση του Δήμου Νεάπολης, όπου κυριαρχούν οι ασφαλτοστρωμένες επιφάνειες ελήφθη υπόψη κατά την προσομοίωση τιμή ίση με 0,010. Προκειμένου να εξεταστεί η ευαισθησία του μοντέλου ως προς την παράμετρο αυτή εξετάστηκαν δύο περιπτώσεις για τιμές n_{surf} ίσες με 0,007 και 0,013 δηλαδή μεταβολή $\pm 30\%$. Οι προσομοιώσεις έγιναν για βροχή σχεδιασμού 24 hr και περίοδο επαναφοράς 10 έτη (Πίνακας 5).

Πίνακας 5: Παροχές αιχμής Q (m³/s) των αγωγών που απορρέουν στον τελικό αποδέκτη για τρεις διαφορετικές τιμές του συντελεστή τραχύτητας n_{surf} .

Συντελεστής τραχύτητας, n_{surf}	Αγωγοί		
	O264 – O94	O92 – O94	O116 – O94
0,010	1,32	1,59	0,91
0,013	1,32	1,59	0,91
0,007	1,32	1,59	0,91

Από τον Πίνακα 5 διαπιστώνεται ότι η μεταβολή της παραμέτρου n_{surf} δεν επηρεάζει τις παροχές των κυρίων αγωγών O264 - O94, O92 - O94 και O116 - O94.

Στην τροποποιημένη ορθολογική μέθοδο υπεισέρχεται ο συντελεστής απορροής C , ο οποίος κατά την προσομοίωση ελήφθη ίσος με 0,90, επειδή ο Δήμος Νεάπολης αποτελείται κυρίως από δομημένες, πλακοστρωμένες και ασφαλτοστρωμένες επιφάνειες. Για να εξεταστεί η ευαισθησία του μοντέλου ως προς C υπολογίστηκε μια μέση τιμή C_{av} αυτού ως ο βαρυκεντρικός μέσος όρος των συντελεστών απορροής C_i των επιφανειών i εμβαδού A_i διαφόρων χρήσεων σύμφωνα με τη σχέση (6.1), όπου N είναι ο αριθμός των επιφανειών.

$$C_{av} = \frac{\sum_{i=1}^N (A_i C_i)}{\sum_{i=1}^N A_i} \quad (6.1)$$

Από τη σχέση (6.1) προέκυψε $C_{av} = 0,8$. Η προσομοίωση έγινε για βροχή σχεδιασμού 24 hr και περίοδο επαναφοράς 10 έτη (Πίνακας 6).

Πίνακας 6: Παροχή Q (m^3/s) για τους κύριους αγωγούς για διάφορες τιμές του συντελεστή απορροής C .

Αγωγός	$C = 0,90$	$C_{av} = 0,80$	Διαφορές (%)
	Q (m^3/s)		
O264 – O94	5,35	4,72	11,8
O92 – O94	5,71	5,49	3,9
O116 – O94	3,49	3,11	10,9

Από τον Πίνακα 6 διαπιστώνεται ότι οι παροχές που προκύπτουν για τους τρεις κύριους αγωγούς του δικτύου O264 – O94, O92 – O94 και O116 – O94 με το σταθμημένο συντελεστή απορροής C_{av} (σχέση 6.1) είναι σημαντικά μικρότερες σε σχέση με αυτές που προκύπτουν με το συντελεστή απορροής C , που εκτιμήθηκε για ολόκληρη την περιοχή του δικτύου. Συνεπώς, ο συντελεστής απορροής αποτελεί μια κρίσιμη παράμετρο, της οποίας η επιλογή θα πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη προσοχή.

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την εφαρμογή του λογισμικού HYDRA της PIZER διαπιστώθηκε ότι αυτό αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για το μηχανικό, για την προσομοίωση και την αξιολόγηση ενός δικτύου αποχέτευσης, καθώς ενσωματώνει υπολογιστικές ρουτίνες για την παροχέτευση ομβρίων και ακαθάρτων υδάτων, δίνοντας τη δυνατότητα σαφούς εικόνας του δικτύου σε πληθώρα πιθανών καταστάσεων και σεναρίων. Παράλληλα, αποτελεί ένα εξειδικευμένο Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών (G.I.S) για τα δίκτυα αποχετεύσεων. Ο G.I.S χαρακτήρας του HYDRA είναι πολύ σημαντικός, καθώς οπτικοποιεί και οργανώνει τα στοιχεία του δικτύου, του περιβάλλοντα χώρου (χωρικά και εννοιολογικά) και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης σε βάσεις δεδομένων, καθιστώντας τα δεδομένα αυτά εύκολα προσπελάσιμα. Έτσι, το HYDRA, μπορεί να αποτελέσει ένα ουσιαστικό εργαλείο λήψης αποφάσεων, για τους ποικίλους φορείς που εμπλέκονται σε θέματα αστικών υποδομών, χωροταξίας και αστικής ανάπτυξης. Σημειώνεται, επίσης, η καλή συνεργασία που παρουσιάζει το HYDRA με άλλα ευρέως διαδεδομένα και χρησιμοποιούμενα λογισμικά C.A.D και G.I.S, όπως είναι το AutoCAD, το ArcGIS κ.λπ., οπότε είναι εύκολη η εισαγωγή χωρικών και εννοιολογικών δεδομένων στο περιβάλλον του HYDRA.

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτέλεσε η δημιουργία του ολοκληρωμένου μοντέλου ενός δικτύου ομβρίων και όχι η ενδελεχής έρευνα πάνω σε σύνθετα προβλήματα υδραυλικής φύσεως που ανακύπτουν σε ένα δίκτυο αποχέτευσης. Στο μοντέλο του δικτύου που δημιουργήθηκε με το λογισμικό HYDRA, ενώ ήταν δυνατή η αποτίμηση των αποτελεσμάτων από εναλλακτικές παρεμβάσεις σε στοιχεία του δικτύου (αλλαγή διαμέτρων και κλίσεων των αγωγών, αλλαγές στην οριζοντιογραφική χάραξη κ.λπ.), δεν έγιναν παρεμβάσεις, καθώς το αντικείμενο της μελέτης αφορούσε στη μελέτη της συμπεριφοράς ενός δικτύου που μελετήθηκε με τις ισχύουσες Τ.Π. στην Ελλάδα εκπόνησης μελετών αποχέτευσης σε εναλλακτικά σενάρια και όχι στην αλλαγή στοιχείων του δικτύου, αν και αυτό θα ήταν εύκολο να γίνει. Εξάλλου από την επεξεργασία των στοιχείων που έγινε για βροχές σχεδιασμού διαφόρων διαρκειών και περιόδων επαναφοράς, σε γενικές γραμμές, δεν διαπιστώθηκε τέτοιου είδους ανάγκη.

Η πλήρης αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, προϋποθέτει την ύπαρξη πραγματικών δεδομένων (μετρήσεις) όσον αφορά στις υδρολογικές παρατηρήσεις (βροχόπτωση, υετογραφήματα) και στις υδραυλικές παραμέτρους του μοντέλου (παροχή, ταχύτητα, μετρήσεις στάθμης που αντιστοιχούν στο συγκεκριμένο επεισόδιο βροχής), έτσι ώστε να μπορεί να γίνει άμεση σύγκριση μεταξύ των υπολογισμένων και των μετρημένων μεγεθών. Η ύπαρξη μετρήσεων μπορεί να οδηγήσει στη βαθμονόμηση (calibration) του μοντέλου και στη ρύθμιση των παραμέτρων αυτού. Στην παρούσα εργασία δεν έγινε βαθμονόμηση των παραμέτρων του μοντέλου, γιατί το δίκτυο βρίσκεται στη φάση της μελέτης και συνεπώς δεν είναι δυνατή, ούτε η πλήρης αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, ούτε η βαθμονόμηση του μοντέλου. Παρόλα αυτά έγινε μία προσπάθεια ανάλυσης ευαισθησίας ορισμένων παραμέτρων του μοντέλου για τις διάφορες μεθόδους που διαθέτει το HYDRA και διαπιστώθηκαν (α) η αβεβαιότητα στην εκτίμηση του συντελεστή τραχύτητας Manning, n , έχει μεγαλύτερες επιπτώσεις στο βάθος ροής και πολύ μικρότερη στην παροχή των αγωγών, (β) η αβεβαιότητα στο συντελεστή τραχύτητας n_{surf} της επιφανειακής απορροής δεν επηρεάζει τις παροχές των αγωγών και συνεπώς, το βάθος ροής και (γ) ο συντελεστής απορροής, C , αποτελεί μια κρίσιμη παράμετρο, της οποίας η επιλογή θα πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη προσοχή.

Στην Ελλάδα οι Τ.Π. εκπόνησης μελετών ύδρευσης (Π.Δ. 696/1974, άρθρα 208-219) στο μεγάλο χρονικό διάστημα που ισχύουν δεν παρακολούθησαν την πρόοδο και τις εξελίξεις στην επιστήμη των αποχετεύσεων, των ηλεκτρονικών υπολογιστών κ.λπ. Η εκτίμηση της παροχής σχεδιασμού γίνεται με την χρήση της ορθολογικής μεθόδου, η οποία περιλαμβάνει δύο βασικές παραμέτρους, των οποίων η εκτίμηση παρουσιάζει σημαντική αβεβαιότητα.

Η μια από τις παραμέτρους είναι ο συντελεστής απορροής C , στην οποία η ορθολογική μέθοδος είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη, γι αυτό και χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή της. Η εκτίμηση του C γίνεται από πίνακες με βάση τοπογραφικά, φυσιογραφικά και πολεοδομικά χαρακτηριστικά, που δίνουν τη δυνατότητα επιλογής σημαντικού εύρους τιμών. Το Π.Δ/γμα 696/1974 (άρθρο 209, παρ. 9) ορίζει κάποιες τιμές του συντελεστή C , που ισχύουν για μη αστικές λεκάνες απορροής και επισημαίνει ότι «οι συντελεσταί απορροής εξ εκτάσεων εντός πόλεως λαμβάνονται πάντοτε ως τουλάχιστον ίσοι προς τους καθοριζόμενους δια την ιδίαν περιοχήν, εάν αυτή ήτο εκτός πόλεως».

Η άλλη παράμετρος είναι η ένταση της κρίσιμης βροχόπτωσης, η οποία υπολογίζεται από τις όμβριες καμπύλες (IDF) της περιοχής του έργου και το χρόνο συρροής. Όμως, όμβριες καμπύλες για την περιοχή ενός τεχνικού έργου (π.χ. δίκτυο ομβρίων) δεν δίνονται επίσημα από κάποια δημόσια υπηρεσία ή αρχή (π.χ. Ε.Μ.Υ., Υ.Π.Ε.Κ.Α., Περιφέρειες κ.λπ.). Στα δίκτυα ομβρίων ο χρόνος συρροής αναλύεται σε δύο συνιστώσες δηλαδή στο χρόνο εισόδου, t_e , που είναι ο χρόνος που χρειάζεται η απορροή να οδηγηθεί στο δίκτυο μέσω των φρεατίων υδροσυλλογής και στο χρόνο ροής, t_p , κατά μήκος του αγωγού ομβρίων μέχρι μια συγκεκριμένη θέση. Ο χρόνος ροής μπορεί να υπολογιστεί με σχετική ακρίβεια από τους υδραυλικούς υπολογισμούς της ελεύθερης ροής σε αγωγούς με κλειστή γεωμετρική διατομή. Το Π.Δ/γμα 696/1974 για το χρόνο εισόδου ορίζει μια γενική τιμή ίση με 10min (άρθρο 209, παρ. 9), αν και διεθνώς οι τιμές κυμαίνονται από 3-30min (Κουτσογιάννης, 2011).

Σημειώνεται, επίσης, ότι τα διάφορα λογισμικά που υπάρχουν στη διεθνή βιβλιογραφία (π.χ. SWMM, HYDRA κ.λπ.) απαιτούν πληροφορίες για τις οποίες δεν υπάρχουν δεδομένα στην Ελλάδα. Οι διαπιστώσεις αυτές οδηγούν στο συμπέρασμα ότι οι ισχύουσες Τ.Π. για την εκπόνηση μελετών δικτύων αποχέτευσης στην Ελλάδα χρειάζονται πλήρη αναθεώρηση, ώστε να ληφθούν υπόψη η πρόοδος και οι εξελίξεις της επιστήμης στο τομέα των αποχετεύσεων, των ηλεκτρονικών υπολογιστών, των GIS, της θεωρίας λήψεως αποφάσεων, των βάσεων δεδομένων κ.λπ. Μια τέτοια εξέλιξη θα μπορούσε να συμβάλλει σημαντικά στην απάλειψη μελετητικών και κατασκευαστικών αστοχιών, γεγονός που θα οδηγούσε σε μείωση του κόστους συντήρησης των δικτύων και σε άμβλυνση των οχλήσεων που επιβαρύνουν τους

πολίτες. Επιπλέον, οι Δ.Ε.Υ.Α. θα μπορούσαν και πρέπει να δημιουργήσουν μοντέλα των δικτύων αποχέτευσης (ακάθαρτα, όμβρια) που διαχειρίζονται, αφού η εμπειρία έχει δείξει ότι αρκετές από αυτές δεν διαθέτουν τα απαραίτητα στοιχεία (γεωμετρικά και υδραυλικά χαρακτηριστικά ολόκληρων τμημάτων των δικτύων τους).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ASCE (American Society of Civil Engineers), 1982. *Gravity Sanitary Sewer Design and Construction*. ASCE Manuals and Reports on Engin. Practice, No. 60, New York, 275 pp.
- Chin, D.A., 2000. *Water Resources Engineering*. Prentice Hall, New Jersey, 750 pp.
- Chow, V.T., Maidment, R. and Mays, L.W., 1988. *Applied Hydrology*. McGraw-Hill, New York, 570 pp.
- Crawford, N. H. and Linsley, R. K., 1966. *Digital Simulation in Hydrology: Stanford Watershed Model IV*. Dept. of Civil Engineer., Stanford Univ., California, U.S.A., 210 pp.
- Khandan, N. N., 2002. *Modeling Tools for Environmental Engineers and Scientists*. CRC Press, 313 pp.
- Martz, G., 1987. *Υδραυλική των οικισμών. Αποχετεύσεις*. Εκδόσεις Μ. Γκιούρδας, Αθήνα.
- Nix, S.J., 1994. *Urban Stormwater Modeling and Simulation*. Lewis Pub., Florida, 212 pp.
- Overton, D. E. and Meadows, M. E., 1976. *Stormwater Modeling*. Academic Press, New York, 358 pp.
- Pain, J.N. and Akan, A.O., 2001. *Design of Detention Systems*. In: L.W. Mays (Editor), *Stormwater Collection Systems Design Handbook*, Mc Graw-Hill, New York, 7.1-7.66.
- Pizer, 2000. *HYDRA: Software for the Analysis, Design and Management of Storm, Sanitary and Combined Sewer Systems*. Hydra version 6.1. User' s Manual. Revised May 26. PIZER Inc., Seattle, WA, USA.
- RTAC (Roads and Transport Association of Canada), 1982. *Drainage Manual*.
- Yen, B. C., 1986. *Hydraulics of Sewers*. In: B. C. Yen (Editor), *Advances in Hydrosience*, vol. 14, Academic Press, Orlando, FL, 1–122.
- Zhao, B., 2001. *Computer Models for Stormwater Systems Design*. In: L.M. Mays (Editor), *Stormwater Collection Systems Design Handbook*. McGraw-Hill, New York, 21.1-21.23
- Zoppou, C. (2001). *Review of urban storm water models*. *Environmental Modelling & Software*, 16: 195–231.
- Γιαννόπουλος, Σ., 2002. *Σημειώσεις Αποχετεύσεων: Τεύχος Β*. Έκδοση της Υπηρεσίας Δημοσιευμάτων Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, 72 σελ.
- ΘΕΣΜΕΑ Κοινοπραξία Τεχνικών Γραφείων, 1973. *Βασικά Έργα Αποχέτευσης Μείζονος Θεσσαλονίκης. Δίκτυα Ομβρίων Υδάτων Περιοχής Περιοχής Δενδροποτάμου (Οριστική Μελέτη)*. Τεύχος ΟΟΔ-1.2. Υδραυλικοί Υπολογισμοί. Υ.Δ.Ε.
- Κουτσογιάννης, Δ., 2011. *Σχεδιασμός αστικών δικτύων αποχέτευσης (Έκδοση 4.0)*. Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα, 180 σελ.
- Κωνσταντινίδης, Στ., 2004. *Δόμηση Γεωγραφικού Συστήματος Πληροφοριών και προσομοίωση Παντοροϊκού Δικτύου Αποχέτευσης με το λογισμικό PIZER HYDRA*. Μεταπτυχιακή Διατριβή, Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών Α.Π.Θ., 133 σελ.
- Κωτούλας, Γ., 2010. *Ολοκληρωμένη Διαχείριση και Προσομοίωση Δικτύου Ομβρίων με το Λογισμικό PIZER HYDRA*. Μεταπτυχιακή Διατριβή, Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών Α.Π.Θ., 221 σελ.
- Υ.Π.Ε.ΧΩ.Δ.Ε., 2002. *Οδηγίες Μελετών Οδικών Έργων, Τεύχος 8: Αποχέτευση – Στράγγιση, Υδραυλικά Έργα Οδών (ΟΜΟΕ – ΑΣΥΕΟ)*, Αθήνα.

**ΧΡΗΣΗ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΚΑΙ
Γ.Σ.Π. ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΡΤΙΣΗ ΧΑΡΤΩΝ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ ΚΑΙ
ΣΧΕΔΙΟΥ ΠΡΟΕΙΔΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΤΑ ΠΛΑΙΣΙΑ ΜΕΛΕΤΗΣ
ΘΡΑΥΣΗΣ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ**

Λίζα Μπενσασσών, Μανώλης Αθανασάκης

Εξάρχου Νικολόπουλος Μπενσασσών Α.Ε. - Γράμμου 62-64, 151 24 Μαρούσι,
Αθήνα -Τηλ.: 210-61 21 782 - Fax: 210-61 24 492 - e-mail: mail@enm.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Επί του ρέματος Μακροπόταμος, στη θέση «Καρβουνόρεμα» του Δ. Κάτω Νευροκοπίου, προβλέπεται η κατασκευή χωμάτινου, αντιπλημμυρικού φράγματος, ύψους 27 m, με ταμιευτήρα χωρητικότητας 3,5 hm³, περίπου. Στα πλαίσια της οριστικής μελέτης του φράγματος, προσομοιώθηκε η κίνηση του πλημμυρικού κύματος από τυχόν κατάρρευσή του σε συνδυασμό με διαφορετικές υδρολογικές συνθήκες ανάντη και κατόντη του φράγματος. Τα αποτελέσματα κάθε σεναρίου εισάχθηκαν σε Σ.Γ.Π. για την κατάρτιση θεματικών χαρτών ως προς τα βάθη ροής. Επισημάνθηκαν κατοικημένες περιοχές, τεχνικά έργα και καλλιεργούμενες εκτάσεις που πλήττονται και καταρτίστηκε σχέδιο προειδοποίησης με μέτρα αντιμετώπισης των καταστροφών από τη δράση του πλημμυρικού κύματος.

**USE OF MATHEMATICAL MODELS AND GIS TOOLS FOR THE
PREPARATION OF FLOOD MAPS AND A CONTINGENCY PLAN
FOR THE FRAMEWORK OF DAM COLLAPSE STUDY**

Lisa Bensasson, Manolis Athanassakis

Exarchou Nikolopoulos Bensasson S.A. Consulting Engineers - Grammou 62-64,
151 24 Maroussi, Athens - Tel.: (30)21061 21 782, Fax: (30)21061 24 492 -e-mail:
mail@enm.gr

ABSTRACT

The Vrondou Dam, an earthen dam of 27m height aimed for flood protection is to be constructed on the Makropotamos stream, in the region of Drama in Northern Greece. Its reservoir will have a capacity of approximately 3.5 hm³. The final design of the dam comprises studying the flood wave resulting from dam collapse in combination with different hydrological conditions, upstream as well as downstream of the dam. The results of each scenario, imported in G.I.S., allow for mapping of the inundated areas and flow depths. Residential areas, structures and agricultural land affected by the flood wave were identified and a warning plan, including preparedness measures, is implemented.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η καταστροφή ενός φράγματος δημιουργεί γενικά ένα πλημμυρικό κύμα με καταστρεπτικές συνέπειες στην κατάντη περιοχή. Η μελέτη της δημιουργίας και της διάδευσης του πλημμυρικού κύματος λόγω θραύσης φράγματος επιβάλλεται σήμερα από την νομοθεσία σε πολλές χώρες, μεταξύ των οποίων και στην Ελλάδα. Το παρόν κείμενο πραγματεύεται τα συνήθη αλλά καιίρια ερωτήματα που αφορούν στο αντικείμενο της μελέτης (τι), στη σκοπιμότητά της (γιατί), στη μεθοδολογία εκπόνησης (πώς), στα αποτελέσματά που μπορεί να δώσει και πώς αυτά θα αξιοποιηθούν και από ποιους. Ως μελέτη αναφοράς επιλέγεται η πρόσφατη μελέτη πλημμυρικού κύματος λόγω θραύσης του αντιπλημμυρικού φράγματος Κάτω Βροντούς στη θέση Καρβουνόρεμα Δράμας, η οποία αξιοποίησε τις δυνατότητες που προσφέρουν σύγχρονα εργαλεία υδραυλικής προσομοίωσης σε συνδυασμό με Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (Γ.Σ.Π.).

2. ΤΙ ΕΙΝΑΙ Η ΘΡΑΥΣΗ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ;

Όταν ένα φράγμα καταρρεύσει ο αποθηκευμένος όγκος νερού διαφεύγει δια μέσου της κατάντη κοιλάδας, δημιουργώντας καταστροφικές πλημμύρες. Παρότι, στις μέρες μας τα φράγματα μελετώνται κατά κανόνα με αποδεκτούς συντελεστές ασφαλείας και η κατασκευή τους είναι επιμελημένη, η πιθανότητα κατάρρευσής τους δεν μπορεί να αγνοηθεί, λόγω της σοβαρότητας των επιπτώσεών της (επικινδυνότητα).

Τα αίτια που μπορούν να προκαλέσουν μερική ή ολική κατάρρευση φράγματος, όπως αναφέρονται στη βιβλιογραφία (ASCE 1979), είναι κυρίως τα ακόλουθα:

- Υπερπήδηση της στέγης του φράγματος που μπορεί να οφείλεται είτε σε ανεπαρκή διοχετευτικότητα του υπερχειλιστή ασφαλείας κατά το διάστημα εξαιρετικής πλημμύρας, είτε στην έλλειψη έγκαιρων χειρισμών θυροφραγμάτων του υπερχειλιστή, είτε στην κατολίσθηση σημαντικών μαζών από ασταθή πρηνή του ταμιευτήρα, κ. ά.
- Εσωτερική διάβρωση που οφείλεται στη διασωλήνωση (Internal erosion ή piping), ήτοι η προοδευτική διάβρωση λόγω συγκεντρωμένων διαρροών που αναπτύσσονται στο σώμα του φράγματος ή στη θεμελίωσή του. Μπορεί να προκληθεί από αστοχίες κατά τη συμπύκνωση, διαφορικές καθιζήσεις, ακαταλληλότητα φίλτρων, χαλαρές ζώνες θεμελίωσης κ.ά.
- Κατολίσθηση τμημάτων του κατάντη πρηνούς του φράγματος ή της θεμελίωσης. Η βαθειά κατολίσθηση που επεκτείνεται μέχρι το άνω πρηνές και μάλιστα κάτω από τη στάθμη του νερού του ταμιευτήρα είναι η πιο σοβαρή περίπτωση που προκαλεί και την πιο γρήγορη κατάρρευση του φράγματος.
- Λιγότερο συχνή, αλλά με σοβαρές επιπτώσεις αιτία, είναι η ανάπτυξη υψηλών πιέσεων πόρων και πιθανή ρευστοποίηση κορεσμένων ζωνών των χαλαρών κοκκωδών υλικών, στο σώμα του φράγματος και στη θεμελίωση, κατά τη διάρκεια σεισμικών δονήσεων μεγάλης έντασης. Το αποτέλεσμα μπορεί να επιφέρει υπερβολικές καθιζήσεις, κατολισθήσεις ή μεγάλες παραμορφώσεις στο σώμα του φράγματος.

3. ΓΙΑΤΙ ΑΠΑΙΤΕΙΤΑΙ ΜΕΛΕΤΗ ΘΡΑΥΣΗΣ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ;

Η κατάρρευση ενός φράγματος, αν και απίθανη, μπορεί να προκαλέσει πολύ σοβαρές επιπτώσεις, όπως καταστροφές σε κατοικημένες περιοχές, σε αγροτικές εκτάσεις, σε τεχνικά έργα, τραυματισμούς, ακόμα και απώλειες ανθρώπινων ζωών. Συνεπώς, οι περιοχές κατάντη φραγμάτων διατρέχουν πολύ σοβαρό κίνδυνο

πλημμύρας, σύμφωνα με τον ορισμό¹ που δίνεται στην Οδηγία 2007/60/ΕΚ της 23ης Οκτωβρίου 2007 για την αξιολόγηση και τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας, η οποία ενσωματώθηκε στο Εθνικό Δίκαιο με την Κ.Υ.Α. 31822/1542/Ε103/20-07-2010 (ΦΕΚ 1108/Β/2010). Σύμφωνα με την προαναφερόμενη Οδηγία, οι περιοχές με κίνδυνο πλημμύρας πρέπει να εντοπιστούν και να συμπεριληφθούν σε χάρτες επικινδυνότητας πλημμύρας² για διάφορα σενάρια και σε χάρτες κινδύνου πλημμύρας, που να περιγράφουν τις δυνητικές αρνητικές συνέπειες που συνδέονται με τις πλημμύρες υπό τις συνθήκες των προηγούμενων σεναρίων (Άρθρο 6 Οδηγίας). Οι προαναφερόμενοι χάρτες πρέπει να καταρτιστούν σε επίπεδο περιοχών λεκανών απορροής ποταμών έως τις 22 Δεκεμβρίου 2013, ενώ για τις ίδιες περιοχές πρέπει να εκπονηθούν έως τις 22 Δεκεμβρίου 2015 σχέδια διαχείρισης των κινδύνων πλημμύρας που να εστιάζουν στην πρόληψη, την προστασία και την ετοιμότητα, συμπεριλαμβανομένων των προβλέψεων πλημμυρών και των συστημάτων έγκαιρης προειδοποίησης (Άρθρο 6 Οδηγίας). Συνεπώς, οι στόχοι της Οδηγίας 2007/60/ΕΚ επιβάλλουν ουσιαστικά την εκπόνηση μελέτης θραύσης φράγματος και διόδευσης πλημμυρικού κύματος αν και δεν υπάρχει σε αυτή ρητή απαίτηση.

Στην Υπουργική Απόφαση με αρ. πρωτοκόλλου ΔΜΕΟ/α/ο/1257 με Θέμα «Έγκριση Κανονισμού Προεκτιμωμένων Αμοιβών μελετών και υπηρεσιών κατά τη διαδικασία της παρ. 7 του άρθρου 4 του Ν.3316/2005-ΦΕΚ 1162/Β/2005» η μελέτη θραύσης φράγματος και διόδευσης του πλημμυρικού κύματος περιλαμβάνεται στο αντικείμενο της μελέτης φραγμάτων χωμάτινων, λιθόρριπτων και βαρύτητας (Άρθρο ΥΔΡ.9).

Μια μελέτη θραύσης φράγματος εκπονείται προκειμένου να διερευνηθούν οι επιπτώσεις από ενδεχόμενη αστοχία ενός φράγματος και περιλαμβάνει (ενδεικτικά και όχι περιοριστικά):

- την πλήρη διερεύνηση της κινήσεως του πλημμυρικού κύματος που θα προέλθει από τυχόν κατάρρευση του φράγματος,
- την επισήμανση των κατοικημένων περιοχών, συγκοινωνιακών και άλλων τεχνικών έργων, γεωργικών εκτάσεων, κλπ, που υπόκεινται σε προσβολή από το πλημμυρικό κύμα, καθώς και των πιθανών καταστροφών από τη δράση του πλημμυρικού κύματος,
- την κατάρτιση σχεδίου προειδοποίησης και μέτρων αντιμετώπισης των καταστροφών από τη δράση του πλημμυρικού κύματος.

Η εκπόνηση μελέτης θραύσης φράγματος και διόδευσης του πλημμυρικού κύματος επιβάλλεται όχι μόνο για κάθε ανεγειρόμενο φράγμα αλλά για όσα υφιστάμενα φράγματα δεν έχει ήδη εκπονηθεί. Επισημαίνεται ότι μελέτες φραγμάτων έχουν εκπονηθεί με το προηγούμενο θεσμικό πλαίσιο περί μελετών ενδέχεται είτε να μην περιλαμβάνουν μελέτη θραύσης, είτε αυτή να μην διαθέτει την απαιτούμενη πληρότητα. Στις περιπτώσεις αυτές η εκπόνηση τέτοιας μελέτης επιβάλλεται, είτε κατά την διαδικασία έκδοσης ή ανανέωσης περιβαλλοντικών όρων, είτε κατά την διαδικασία ελέγχου και επικαιροποίησης μελετών τεχνικών έργων, στα πλαίσια της ένταξης του έργου για χρηματοδότησης στο ΕΣΠΑ (Υπουργική Απόφαση αρ. 20554/ΕΥΣ 3430-ΦΕΚ Β'644). Λαμβάνοντας υπόψη ότι παλαιότερες μελέτες

¹ «Κίνδυνος πλημμύρας»: ο συνδυασμός της πιθανότητας να λάβει χώρα πλημμύρα και των δυνητικών αρνητικών συνεπειών για την ανθρώπινη υγεία, το περιβάλλον, την πολιτιστική κληρονομιά και τις οικονομικές δραστηριότητες, που συνδέονται μ' αυτή την πλημμύρα, ως Άρθρο 2 Οδηγίας 2007/60/ΕΚ.

² «Επικινδυνότητα πλημμύρας»: Η δυνατότητα εμφάνισης πλημμύρας σε συγκεκριμένο χώρο (ποσοτικοποιούμενη μέσω του βάθους νερού, της ταχύτητας ροής ή άλλου χαρακτηριστικού υδρολογικού ή υδραυλικού μεγέθους) που αντιστοιχεί σε δεδομένη πιθανότητα υπέρβασης, ως Άρθρο 2 Κ.Υ.Α. 31822/1542/Ε103/20-07-2010 (ΦΕΚ 1108/Β/2010).

κατέφευγαν σε χρήση εμπειρικών μόνο μεθόδων εκτίμησης χωρίς αναλυτικούς υπολογισμούς ή είχαν περιορισμένη αξιοποίηση στοιχείων της τοπογραφίας της περιοχής κατάντη του φράγματος, η αξιολόγησή τους στα πλαίσια των ως άνω διαδικασιών είναι επιβεβλημένη τόσο για προγραμματιζόμενα, όσο και για υφιστάμενα φράγματα.

4. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ

4.1. Η ΜΕΛΕΤΗ ΑΝΑΦΟΡΑΣ

Η μεθοδολογία που παρουσιάζεται εφαρμόστηκε κατά την εκπόνηση της μελέτης θραύσης φράγματος και διόδευσης πλημμυρικού κύματος που εκπονήθηκε στα πλαίσια της μελέτης: "Μελέτη κατασκευής αντιπλημμυρικού φράγματος Κάτω Βροντούς στη θέση Καρβουνόρεμα Ν. Δράμας", για λογαριασμό του Νομαρχιακού Διαμερίσματος Δράμας της τέως Νομαρχιακής Αυτοδιοίκησης Δράμας - Καβάλας - Ξάνθης και ολοκληρώθηκε το 2011.

4.2. ΘΕΣΗ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ

Η θέση του φράγματος Κάτω Βροντούς τοποθετείται επί του Ρ. Καρβουνόρεμα, 13,5 km, περίπου, νοτιοδυτικά της πόλης του Κάτω Νευροκοπίου και σε απόσταση δύο χιλιομέτρων, περίπου, από τα νότιο – δυτικά όρια του οικισμού Κάτω Βροντούς. Υπάγεται διοικητικά, σύμφωνα με το σχέδιο Καλλικράτης, στο Δήμο Κ. Νευροκοπίου.

Η λεκάνη απορροής του χειμάρρου έχει συνολική έκταση 12,20 km², με ιδιαίτερα αναπτυγμένο υδρογραφικό δίκτυο. Αποτελείται από τον κύριο κλάδο του Καρβουνορέματος και από πλήθος σχετικά μεγάλων δευτερευόντων κλάδων, καθώς και από άλλα μικρότερα πλευρικά ρέματα.

Τα χαρακτηριστικά του φράγματος και του ταμιευτήρα Κ. Βροντούς παρατίθενται στον παρακάτω Πίνακα 1.

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά Φράγματος, Ταμιευτήρα και Λεκάνης απορροής

Μέγεθος	Μονάδα	Τιμή
Λεκάνη απορροής		
Επιφάνεια λεκάνης απορροής	km ²	12,20
Μέγιστο υψόμετρο λεκάνης (ρέματος)	μυσθ ³	1.040,00
Μέσο υψόμετρο λεκάνης	μυσθ	859,00
Ελάχιστο υψόμετρο λεκάνης	μυσθ	590
Μέση ετήσια βροχόπτωση (1954 ÷ 2008)	mm	921
Μέση ετήσια απορροή στη θέση του φράγματος	x10 ⁶ m ³	4,5
Ειδική στερεοπαροχή	m ³ /km ² /έτος	215
Τεχνητή Λίμνη		
Κανονική ΑΣΥ λίμνης (στάθμη στέψης υπερχειλιστή)	μυσθ	618,50
Κανονική ΚΣΥ λίμνης (στάθμη υδροληψίας)	μυσθ	597,00
Συνολική χωρητικότητα λίμνης	x10 ⁶ m ³	3,35
Νεκρός όγκος	x10 ⁶ m ³	0,15
Επιφάνεια καθρέπτη στη στάθμη στέψης υπερχειλιστή	στρ.	275

³ μυσθ : Μέσο υψόμετρο από την στάθμη της θάλασσας

Μέγεθος	Μονάδα	Τιμή
Φράγμα		
Τύπος φράγματος	Λιθόρριπτο - χωμάτινο με αργιλικό πυρήνα	
Ύψος φράγματος (από τη φυσική κοίτη του χειμάρρου)	m	32,00
Μήκος στέψης	m	345
Μέγιστο ύψος φράγματος (από θεμελίωση πυρήνα)	m	42,00
Πλάτος στέψης	m	10,00
Ονομαστικό υψόμετρο στέψης φράγματος	μυσθ	622,00
Στάθμη υπερέκφωσης κεντρικού τμήματος φράγματος	μυσθ	622,50
Συνολικός όγκος αναχώματος φράγματος (και προφράγματος)	$\times 10^3 \text{ m}^3$	715
Συνολικός όγκος πυρήνα φράγματος	$\times 10^3 \text{ m}^3$	128
Συναφή έργα		
Τύπος υπερχειλιστή ασφαλείας	Ελεύθερης υπερχειλίσης με λεκάνη εκτόξευσης και λεκάνη αποτόνωσης	
Μήκος στέψης υπερχειλιστή	m	20,00
Μήκος υπερχειλιστή έως τη λεκάνη εκτίναξης	m	105,00
Μέγιστη παροχή πλημμύρας εισόδου (για PMP ₆)	m^3/s	135,00
Μέγιστη παροχή πλημμύρας υπερχειλιστή (για PMP ₆)	m^3/s	95,00
Μέγιστη πλημμυρική στάθμη λίμνης	μυσθ	+620,18
Παροχή εισόδου για το σχεδιασμό υπερχειλιστή (T=1.000)	m^3/s	75,00
Παροχή σχεδιασμού υπερχειλιστή (T=1.000)	m^3/s	50,00
Στάθμη λίμνης για την παροχή σχεδιασμού του υπερχειλιστή	μυσθ	+619,61

4.3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΚΑΤΑΝΤΗ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ

Κατάντη του φράγματος της κοινότητας Κ. Βροντούς, το ρέμα Καρβουνόρεμα συμβάλλει στο ρέμα Μακροπόταμος. Στο ίδιο ρέμα συμβάλλουν και οι απορροές από υπολεκάνες που βρίσκονται εκατέρωθεν του ρέματος μέχρι αυτό να καταλήξει σε καταβόθρες στην πεδιάδα του Οχυρού, σε υψόμετρο 534 m περίπου. Η χρήση γης, τόσο εκατέρωθεν του ρέματος Μακροποτάμου όσο και περιμετρικά των καταβοθρών, είναι αγροτική, ενώ δεν εντοπίζονται οικισμοί, βιοτεχνικές ή βιομηχανικές εγκαταστάσεις ή συγκοινωνιακά έργα, με εξαίρεση τρεις (3) αγροτικές οδούς.

Ο συνολικός όγκος νερού που συσσωρεύεται στην παρούσα κατάσταση ανάντη των καταβοθρών, σε περίπτωση πλημμύρας, λόγω της χαμηλής παροχετευτικότητας αυτών, είναι της τάξης των $5,5 \times 10^6 \text{ m}^3$. Από την καμπύλη Στάθμης-Επιφάνειας-Όγκου της πεδιάδας, η οποία καταρτίστηκε από τα Διαγράμματα ΓΥΣ 1:5000 με τη χρήση εργαλείων Γ.Σ.Π., προκύπτει πως για να αποθηκευτεί ανάντη των καταβοθρών ο παραπάνω όγκος, η στάθμη νερού ανεβαίνει μέχρι το υψόμετρο +540,4m περίπου, κατακλύζοντας περί τα 350 στρέμματα αγροτικής γης.

5. ΠΩΣ ΕΚΠΟΝΗΘΗΚΕ Η ΜΕΛΕΤΗ ΘΡΑΥΣΗΣ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ;

5.1. ΤΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΕΡΓΑΛΕΙΟ

Η προσομοίωση της θραύσης του φράγματος Κ. Βροντούς και η διερεύνηση της κίνησης του πλημμυρικού κύματος γίνεται με τη βοήθεια του λογισμικού μονοδιάστατης υδραυλικής προσομοίωσης Mike 11 (DHI Water and Environment).

Ειδικότερα, χρησιμοποιείται η υπορουτίνα Dambreak. Για την εφαρμογή της υπορουτίνας αυτής ο χρήστης ορίζει τη γεωμετρία του φράγματος, τη μέθοδο υπολογισμού και τη μορφή (θέση και γεωμετρία) της αρχικής αστοχίας του φράγματος, ενώ μέσω της υπορουτίνας υπολογίζεται η εξέλιξη της αστοχίας στο χώρο και στο χρόνο. Οι ενσωματωμένες στο Mike11 εξισώσεις μάζας και ενέργειας (Saint Venant) υπολογίζουν τις υδραυλικές συνθήκες που δημιουργεί η θραύση του φράγματος κατάντη.

5.2. ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΙΣΟΔΟΥ

Από τις μεθόδους προσομοίωσης που διαθέτει η υπορουτίνα Dambreak, χρησιμοποιείται στην παρούσα εφαρμογή η **MIKE 11 Energy Equation** και ειδικότερα η μέθοδος **Erosion Based Mode**, κατάλληλη για αστοχία που εξαρτάται από τη διάβρωση. Τα δεδομένα που εισάγονται στο μοντέλο αφορούν στη γεωμετρία της διατομής του φράγματος, στα υλικά του πυρήνα του φράγματος καθώς και στην αρχική μορφή της αστοχίας. Ανάλογα με το είδος της αστοχίας που επιλέγεται από το χρήστη, εισάγονται και παράμετροι που ελέγχουν την εξέλιξη αυτής. Σε περίπτωση αστοχίας λόγω υπερπήδησης, απαιτείται το αρχικό επίπεδο και πλάτος της βάσης του ρήγματος καθώς και η κλίση των πρανών του. Σε περίπτωση αστοχίας λόγω διασωλήνωσης, εκτός από τα χαρακτηριστικά της διασωλήνωσης (αρχικό επίπεδο, διάμετρος και τραχύτητα), απαιτούνται επιπρόσθετα στοιχεία σχετικά (α) με την οριακή συνθήκη κατάρρευσης του φράγματος, οπότε η ροή μέσω αγωγού θα μετατραπεί σε ροή σε ανοιχτό αγωγό και (β) σχετικά με την παράσυρση υλικού του φράγματος κατά και μετά την κατάρρευσή του.

Για την εισαγωγή των παραπάνω δεδομένων δημιουργούνται από τον χρήστη και εισάγονται στο λογισμικό τέσσερα (4) αρχεία ως εξής: 1. Αρχείο δικτύου (Network file), 2. Αρχείο Διατομών (Cross – sections file), 3. Αρχείο Οριακών Συνθηκών (Boundary Data file) και 4. Αρχείο Υδροδυναμικών Παραμέτρων (HD Parameters file).

Αρχικά, εισάγεται στο μοντέλο, υπό τη μορφή δικτύου, αποτελούμενου από κόμβους και κλάδους, η οριζοντιογραφία του ποταμού που μελετάται (Network file).

Στη συνέχεια, προκειμένου να γίνει η προσομοίωση της εξέλιξης του πλημμυρικού κύματος, μετά τη θραύση του φράγματος, εισάγονται στο μοντέλο τομές κάθετες στον άξονα της ροής (Cross-sections file). Εξαιτίας της έντονα ανομοιομορφής ροής που προκαλείται από μια θραύση φράγματος, οι διατομές πρέπει να είναι αρκετά πυκνές ώστε να αποτυπώνουν με επαρκή ακρίβεια την τοπογραφία του ρέματος και της ευρύτερης περιοχής εκατέρωθεν αυτού (κοιλιάδα, πεδιάδα), ιδίως όπου παρατηρούνται απότομες αλλαγές είτε στη μηκοτομή, είτε στη διατομή του ρέματος. Το πλάτος των διατομών πρέπει να είναι επαρκές ώστε να εκτείνεται μέχρι ένα υψόμετρο, μεγαλύτερο από τη μέγιστη αναμενόμενη στάθμη νερού στην αντίστοιχη διατομή. Τα αποτελέσματα του μοντέλου ανάγονται για όλο το μήκος ροής του ρέματος με παρεμβολή μεταξύ διαδοχικών διατομών. Συνεπώς, η επιλογή χαρακτηριστικών και επαρκώς πυκνών διατομών ελέγχου είναι πολύ σημαντική για την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Για κάθε διατομή ορίζονται τα όρια της αριστερής και δεξιάς όχθης και η τιμή του συντελεστή τραχύτητας της κοίτης (n), σύμφωνα με την εξίσωση του Manning:

$$Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} S^{1/2} \quad (5.1)$$

Όπου: Q : η παροχή (m^3/sec)
 n : ο συντελεστής τραχύτητας Manning $s.m^{(-1/3)}$
 A : η επιφάνεια της διατομής (m^2)
 R : η υδραυλική ακτίνα (m)
 S : η κατά μήκος κλίση του ρέματος

Σε όλες τις διατομές ελέγχου υιοθετήθηκε συντελεστής τραχύτητας Manning $n=0,05 sec/m^{1/3}$ ή $M=1/n= 20 m^{1/3}/sec$.

Προκειμένου να ληφθεί υπόψη στην προσομοίωση η χωρητικότητα του ταμιευτήρα απαιτείται είτε επέκταση του δικτύου προς τα ανάντη με την εισαγωγή κατάλληλων διατομών, είτε, εφόσον το δίκτυο ξεκινάει από τη θέση του φράγματος, εισαγωγή της σχετικής πληροφορίας στην πρώτη από ανάντη διατομή, η οποία αποτελεί και το ανάντη όριο του ομοιώματος, όπου δίδονται τα υδρογραφήματα εισροής. Έτσι, ειδικά στη διατομή αυτή, εισάγεται για κάθε υψόμετρο η επιφάνεια του «καθρέπτη» του ταμιευτήρα σε μορφή πίνακα, ώστε να περιγραφεί η χωρητικότητα του ταμιευτήρα ως συνάρτηση της στάθμης νερού.

Ακολούθως, ορίζονται στους κατάλληλους κόμβους του δικτύου του ποταμού το φράγμα και ο υπερχειλιστής ασφαλείας. Η γεωμετρία του φράγματος ορίζεται δίνοντας το υψόμετρο, το πλάτος και το μήκος στέψης και την κλίση των πρανών, πληροφορίες σχετικές με το υλικό του πυρήνα του φράγματος. Εισάγεται ακόμη πληροφορία σχετικά με το αρχικό ρήγμα: αρχικό επίπεδο, πλάτος πυθμένα και κλίση πρανών ρήγματος. Στην παρούσα εφαρμογή, θεωρείται πως ο σχηματισμός του ρήγματος αρχίζει όταν το υψόμετρο της επιφάνειας του ταμιευτήρα (h) υπερβαίνει μια ορισμένη τιμή (h_f), η οποία αποτελεί μεταβλητή του εξεταζόμενου, κάθε φορά σεναρίου. Σε ό,τι αφορά τον υπερχειλιστή εισάγονται ο τύπος του, η διατομή του, καθώς και η παροχευτικότητα του για συγκεκριμένα ύψη φλέβας νερού.

Στο Αρχείο Οριακών Συνθηκών (Boundary Data file) ορίζονται, κατ' ελάχιστο, η ανάντη οριακή συνθήκη εισροής και το υψόμετρο της ελεύθερης επιφάνειας στο κατάντη άκρο του δικτύου του ποταμού, ενώ στη συγκεκριμένη εφαρμογή εισήχθησαν και ενδιάμεσες εισροές από συμβάλλοντες στο κύριο ρέμα.

Στο HD Parameters file εισάγονται οι αρχικές συνθήκες που επικρατούν κατά την έναρξη της προσομοίωσης, όπως αρχικό βάθος ροής και στάθμη στον ταμιευτήρα και άλλες παράμετροι που επηρεάζουν την προσομοίωση, όπως άνεμος, εξάτμιση κ.ά. Στο ίδιο αρχείο επιλέγεται το είδος των αποτελεσμάτων που θα παραχθούν κατά την προσομοίωση, όπως βάθος, ταχύτητα και πλάτος ροής, και η μορφή (π.χ. πίνακες ή χάρτες) στην οποία θα αποθηκευτούν αυτά. Άλλα δεδομένα που ορίζονται από τον χρήστη αφορούν: στο βήμα της προσομοίωσης, στη διάρκεια της προσομοίωσης και στις παραδοχές της προσομοίωσης, π.χ. προσομοίωση μερικώς σταθερής κατάστασης (quasi steady simulation mode) ή μη σταθερής κατάστασης (unsteady simulation mode).

5.3. ΣΕΝΑΡΙΑ ΠΟΥ ΕΞΕΤΑΣΤΗΚΑΝ

Στα πλαίσια της μελέτης αναφοράς εξετάστηκαν τα σενάρια:

Σενάριο Α: Υπερπήδηση λόγω εξαιρετικής μέγιστης πιθανής βροχόπτωσης, διάρκειας 6 ωρών (PMP= 286 mm) η οποία έδωσε παροχή αιχμής $Q=301m^3/sec$. Αντίστοιχες παροχές από λοιπές λεκάνες. Αρχική στάθμη ύδατος στον ταμιευτήρα +621,5 m. Σκοπός του σεναρίου αυτού είναι να διαπιστωθεί αν ο

υπερχειλιστής θα παροχετεύσει την παροχή αυτή ή αν θα συμβεί υπερπήδηση του φράγματος.

Σενάριο Β: Υπερπήδηση λόγω σεισμού, πέραν του μέγιστου πιθανού, με γεμάτο ταμιευτήρα (στάθμη ύδατος στο +618,5m) και με ολίσθηση τμήματος στέψης, ώστε να δημιουργηθεί ταπείνωση στη στάθμη +618,0m, πλάτους 20,0m και κλίσης πρηνών 1/2. Η εισερχόμενη παροχή, τόσο στον ταμιευτήρα όσο και από τις πλευρικές λεκάνες, αντιστοιχεί σε υδρογράφημα συχνότητας 1:20. Εξετάζεται η επίδραση της παραμέτρου Side Erosion Index (SE) που ορίζει την εξέλιξη του ρήγματος στην οριζόντια διάσταση σε σχέση με την κατακόρυφη με την εφαρμογή δύο υποσεναρίων: Β1 με SE=0.25 και Β2 με SE =0.5.

Σενάριο Γ: Διασωλήνωση στη στάθμη +605,00m, κοντά στο δεξί αντέρεισμα, με γεμάτο ταμιευτήρα (στάθμη ύδατος +618,5m) και εισροή υδρογραφήματος συχνότητας 1:20, τόσο στον ταμιευτήρα όσο και από τις πλευρικές λεκάνες. Εξετάζεται η επίδραση της παραμέτρου Volume loss ratio (VL), με την εφαρμογή δύο υποσεναρίων: Γ1 με VL=0.5 και Γ2 με VL=0.8.

Σενάριο Χ: Ο υπερχειλιστής παροχετεύει την πλημμύρα σχεδιασμού του (1:1000 έτη), ενώ ταυτόχρονα εισρέει πλημμύρα συχνότητας 1:50 από τις λοιπές κατάντη λεκάνες. Είναι προφανές ότι στο σενάριο αυτό δεν προκαλείται θραύση ή άλλη βλάβη του φράγματος. Τα αποτελέσματα από το παραπάνω σενάριο χρησιμοποιούνται ως μέτρο σύγκρισης με τα κύρια σενάρια Α, Β και Γ.

Η οριακή συνθήκη στην τελευταία κατάντη διατομή του δικτύου καθορίστηκε λαμβάνοντας υπόψη τις συνθήκες κατάκλισης στις καταβόθρες. Έτσι, στις περιπτώσεις Β και Γ, όπου συμβαίνει θραύση του φράγματος, ορίζεται σταθερή στάθμη νερού στο υψόμετρο +541,2m, ενώ στα σενάρια Χ και Α η στάθμη του νερού ορίζεται σταθερή στο υψόμετρο +540,4m.

Οι αρχικές και οριακές συνθήκες για όλα τα σενάρια που εξετάστηκαν, συνοψίζονται στον παρακάτω Πίνακα 2.

Πίνακας 2: Αρχικές και οριακές συνθήκες για όλα τα σενάρια

ΣΕΝΑΡΙΟ	ΑΡΧΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ (HD Parameters file)		ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ (Boundary file)		
	ΑΡΧΙΚΟ ΒΑΘΟΣ ΡΟΗΣ ΣΤΟ ΡΕΜΑ (m)	ΑΡΧΙΚΗ ΣΤΑΘΜΗ ΝΕΡΟΥ ΣΤΟΝ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ (μυσθ)	ΠΛΗΜΜΥΡΟΓΡΑΦΗΜΑΤΑ ΕΙΣΡΟΗΣ		ΣΤΑΘΜΗ ΥΔΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΝΤΗ ΔΙΑΤΟΜΗ (μυσθ)
			ΑΠΟ ΛΕΚΑΝΗ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ	ΑΠΟ ΥΠΟΛΕΚΑΝΕΣ ΕΚΑΤΕΡΩΘΕΝ ΡΕΜΑΤΟΣ	
X	0,1	618,5	T=1000 έτη *	T=50 έτη	540,4
A		621,5	PMP	PMP	
B		618,5	T=20 έτη	T=20 έτη	541,2
Γ					

5.4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Θραύση του φράγματος παρατηρείται μόνο στα σενάρια Β και Γ. Στο Σενάριο Χ δεν αναμενόταν θραύση του φράγματος, ενώ σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Σεναρίου Α, ο υπερχειλιστής του φράγματος είναι ικανός να παροχετεύσει την πλημμύρα που προκαλείται από τη μέγιστη πιθανή βροχόπτωση (PMP) χωρίς να συμβεί υπερπήδηση της στέψης του φράγματος. Οι μέγιστες παροχές από το φράγμα είναι μεγαλύτερες, εμφανίζονται σε πιο σύντομο χρόνο και κατακλύζουν μεγαλύτερη επιφάνεια για το βασικό σενάριο Γ, θραύσης μετά από διασωλήνωση σε σχέση με το βασικό σενάριο Β, θραύσης μετά από εμφάνιση ρήγματος στη στέψη του φράγματος.

Συνεπώς, οι συνέπειες από τη θραύση φράγματος οφειλόμενη σε διασωλήνωση είναι δυσμενέστερες από αυτές της θραύσης που οφείλεται σε εμφάνιση ρήγματος στη στέψη του φράγματος.

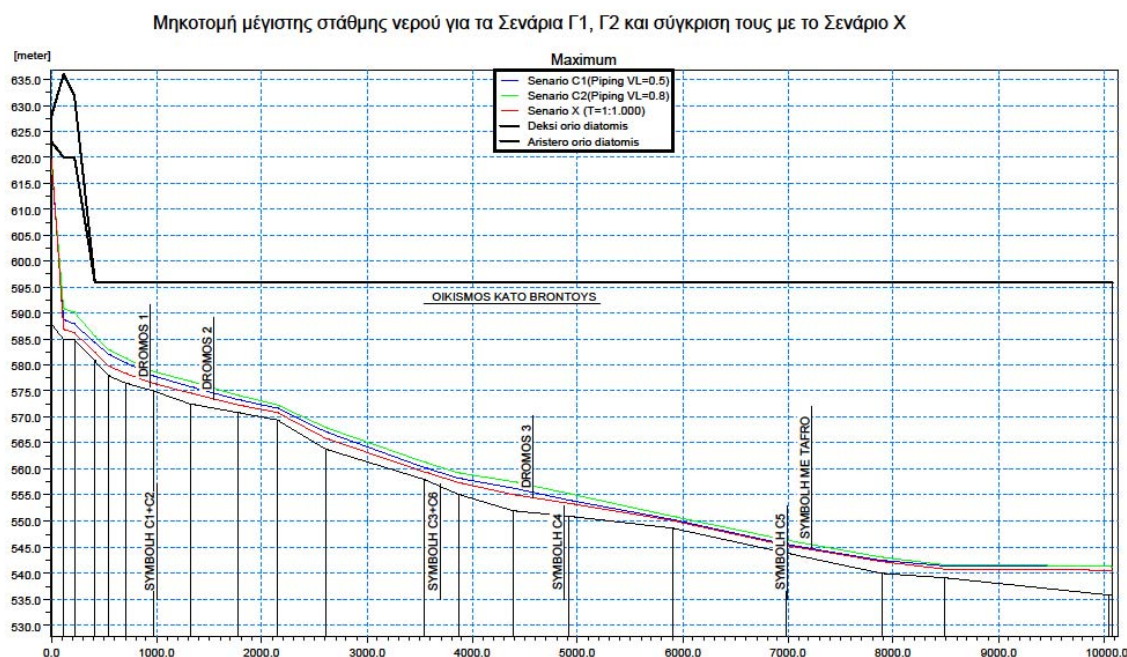
Στην πραγματικότητα, η εξέλιξη του φαινομένου θραύσης στην περίπτωση της διασωλήνωσης, τα υλικά μεγαλύτερης κοκκομετρίας που περιβάλλουν τον πυρήνα θα λειτουργήσουν ανασταλτικά, ιδιαίτερα δε το σωστά κατασκευασμένο παχύ λεπτό φίλτρο, το οποίο και βοηθάει στην «θεραπεία» της διασωλήνωσης.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης των σεναρίων που εφαρμόζονται με το λογισμικό Mike 11 παρουσιάζονται σε πίνακες, χάρτες και υδραυλικές μηκοτομές.

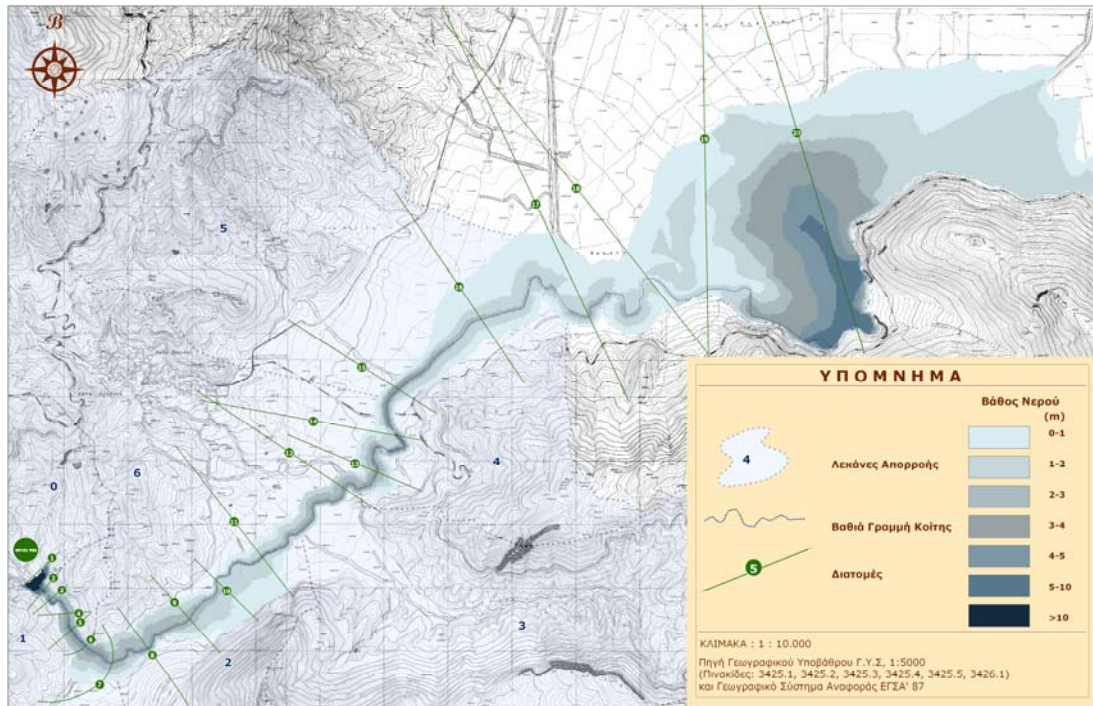
Η εξέλιξη της θραύσης του φράγματος στο χρόνο πινακοποιείται δίνοντας για κάθε χρονική στιγμή διαστάσεις ρήγματος, εξερχόμενη παροχή, στάθμη νερού στον ταμιευτήρα.

Στις υδραυλικές μηκοτομές, εμφανίζεται είτε η ελεύθερη επιφάνεια του νερού κατά μήκος του κύριου ρέματος για επιλεγμένη χρονική στιγμή είτε η μέγιστη στάθμη όπου φτάνει το νερό σε κάθε θέση κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης (βλ. Σχήμα 1 πιο κάτω).

Για την κατάρτιση χαρτών κατάκλυσης χρησιμοποιούνται τα αρχεία καννάβου (raster) από τα αποτελέσματα του μοντέλου με τιμές σε κάθε κελί για τα προεπιλεγμένα από τον χρήστη μεγέθη σχετικά με την κίνηση του πλημμυρικού κύματος στο χώρο και στο χρόνο. Τόσο το είδος των μεγεθών (βάθος, ταχύτητα ροής) όσο και το μέγεθος των κελιών του καννάβου ορίζονται από το χρήστη στην αρχή της προσομοίωσης. Με τη χρήση εργαλείων Γ.Σ.Π. καταρτίζονται οι χάρτες κατάκλυσης (βλ. Σχήμα 2 πιο κάτω).



Σχήμα 1: Υδραυλικές Μηκοτομές σεναρίων



Σχήμα 2: Οριζοντιογραφία με μέγιστα βάθη πλημμυρικού κύματος

6. ΠΟΙΟΣ ΠΡΕΠΕΙ ΝΑ ΛΑΒΕΙ ΥΠΟΨΗ ΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ;

Η προφανής απάντηση στην ερώτηση του τίτλου του κεφαλαίου είναι «όποιος ζει, εργάζεται, έχει συμφέροντα ή απλώς διέρχεται από την περιοχή που ενδέχεται να πληγεί». Ωστόσο, τα φυσικά ή νομικά πρόσωπα και οργανισμοί που είναι αρμόδιοι για το σχεδιασμό, την κατασκευή και τη λειτουργία του φράγματος, καθώς και οι διοικητικές μονάδες που είναι αρμόδιες για την ασφάλεια της περιοχής, πρέπει να μεριμνήσουν, αξιοποιώντας τα αποτελέσματα της μελέτης θραύσης φράγματος για τη σύνταξη ενός Σχεδίου Αντιμετώπισης Έκτατων Καταστάσεων (ΣΑΕΚ), καθώς και για την εφαρμογή αυτού, όποτε καταστεί αναγκαίο αλλά και την τακτική του αναθεώρηση. Οι φορείς που θα πρέπει να είναι ενήμεροι για το περιεχόμενο της μελέτης θραύσης φράγματος είναι κατ'ελάχιστο:

- Ο κύριος του φράγματος
- Ο διαχειριστής του φράγματος και ο υπεύθυνος λειτουργίας του φράγματος (σε περίπτωση που δεν είναι ο ίδιος ο διαχειριστής).
- Οι Υπηρεσίες έκτακτων καταστάσεων π.χ. Υπηρεσία Πολιτικής Προστασίας
- Ο αρμόδιος ασφάλειας του έργου
- Φορείς επιθεώρησης
- Εμπειρογνώμονες ή οργανισμοί, ειδικοί στον τομέα της ασφάλειας φραγμάτων
- Οι Ο.Τ.Α. της περιοχής

Από τους παραπάνω φορείς ο Κύριος του φράγματος έχει την ευθύνη για την σύνταξη του ΣΑΕΚ και τον συντονισμό των υπόλοιπων φορέων και ο υπεύθυνος λειτουργίας του φράγματος έχει την ευθύνη της εφαρμογής του, σε περίπτωση που καταστεί αναγκαίο.

Το προαναφερόμενο Σχέδιο αποσκοπεί:

- να εκπαιδευτεί το προσωπικό του έργου στο να αναγνωρίζει έκτακτες καταστάσεις που ενδέχεται να προκαλέσουν μη ελεγχόμενη αύξηση της ποσότητας του νερού στον ταμιευτήρα,
- να παρέχει οδηγίες για κατάλληλες αναφορές και παρατηρήσεις στον εντοπισμό κρίσιμων καταστάσεων ώστε να εξασφαλίζεται ο μέγιστος χρόνος αντίδρασης για την ανάληψη διορθωτικών κινήσεων προκειμένου ώστε να αποφευχθεί, όποτε είναι εφικτό, η εξέλιξη της κρίσιμης κατάστασης,
- να παρέχει τις διαδικασίες που πρέπει να ακολουθηθούν ώστε να δοθεί στους πολίτες ο μέγιστος διαθέσιμος χρόνος εκκένωσης πριν αναπτυχθούν κρίσιμες συνθήκες και εκδηλωθεί αστοχία του φράγματος.

Η σύνταξη του ΣΑΕΚ πρέπει να αντιμετωπίζει με επάρκεια και σαφήνεια τα εξής θέματα:

- Παρακολούθηση και έλεγχος φράγματος από ειδικευμένα όργανα και προσωπικό
- Επιθεωρήσεις του φράγματος από εμπειρογνώμονες
- Αξιολόγηση ενδείξεων οργάνων παρακολούθησης φράγματος-αναγνώριση και αξιολόγηση καταστάσεων εκτάκτου ανάγκης
- Προληπτικές ενέργειες ώστε να αποφευχθούν έκτακτες καταστάσεις
- Εκπαίδευση προσωπικού ώστε να μπορεί να ανταπεξέλθει στα καθήκοντά του ακόμα και σε περίπτωση έκτατων καταστάσεων
- Ενημέρωση - ευαισθητοποίηση των πολιτών που μπορεί να πληγούν
- Προδιαγραφή εγκατάστασης κατάλληλου συστήματος για την άμεση προειδοποίηση σε περίπτωση έκτατων καταστάσεων
- Πρωτόκολλο εκκένωσης.

Τα παραπάνω είναι σύμφωνα και με το Άρθρο 13 του σχεδίου Προεδρικού Διατάγματος για την Ασφάλεια των Φραγμάτων που αφορά στο ΣΑΕΚ (Αναστασόπουλος, κ.α., 2011).

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

1. Η μελέτη θραύσης φράγματος είναι συμβατή με τους στόχους της Οδηγίας 2007/60/ΕΚ, ενώ περιλαμβάνεται και στο αντικείμενο μελέτης χωμάτων, λιθόρριπτων και φραγμάτων βαρύτητας σύμφωνα με την Υ.Α. για την έγκριση του κανονισμού προεκτιμωμένων αμοιβών μελετών και υπηρεσιών.
2. Η χρήση λογισμικού μονοδιάστατης προσομοίωσης της κίνησης του νερού επαρκεί στην πλειονότητα των περιπτώσεων, εφόσον αξιοποιηθεί τοπογραφικό υπόβαθρο κατάλληλης κλίμακας (όχι μεγαλύτερη από 1:5.000) σε συνδυασμό με επαρκή πυκνότητα διατομών. Λογισμικό διδιάστατης προσομοίωσης απαιτείται σε περιπτώσεις μεγάλων, επίπεδων πεδιάδων κατάντη του φράγματος για τον εντοπισμό εναλλακτικών διαδρομών του ύδατος.
3. Η εκπόνηση μελέτης θραύσης φράγματος και διόδευσης του πλημμυρικού κύματος πρέπει να εκπονείται για κάθε προγραμματιζόμενο φράγμα, βάσει του Ν.3316.
4. Μελέτες θραύσης φράγματος αυξημένης παλαιότητας θα πρέπει να ελέγχονται, να αξιολογούνται και ενδεχομένως να επικαιροποιούνται είτε στο σύνολό τους είτε ως προς τα συμπεράσματά τους, λαμβάνοντας υπόψη την ακρίβεια και αξιοπιστία των μεθόδων υπολογισμού και των στοιχείων τοπογραφικού υπόβαθρου που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και ενδεχόμενες αλλαγές στις κατάντη χρήσεις γης. Προς την κατεύθυνση αυτή προσφέρεται η προβλεπόμενη από τις κείμενες διατάξεις διαδικασία αναθεώρησης των περιβαλλοντικών όρων των έργων, μέχρι

την πρόβλεψη από την πολιτεία ενδεχόμενων πρόσθετων διαδικασιών ελέγχου της ασφάλειας των φραγμάτων.

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- DHI Water and Environment, 2008. *A modeling system for rivers and channels – User Guide*, Horsholm.
- Wilson Stanley D, and Raul J. Marsal, 1979. *Current Trends in Design and Construction of Embankment Dams*. Prepared for the Committee on International Relations, International Commission on Large Dams (ICOLD) and Geotechnical Div. ASCE, New York, 125 pp.
- Αναστασόπουλος Κ., Μουτάφης Ν., Νικολάου Δ. Ντουνιάς Γ., 2011. *Ομάδα Εργασίας Σύνταξης Σχεδίου Προεδρικού Διατάγματος για την Ασφάλεια των Φραγμάτων*, για την ΕΕΜΦ Αθήνα.
- Νομαρχιακό Διαμέρισμα Δράμας της Νομαρχιακής Αυτοδιοίκησης Δράμας-Καβάλας-Ξάνθης, 2011. *Μελέτη κατασκευής αντιπλημμυρικού φράγματος Κάτω Βροντούς στη θέση Καρβουνόρεμα Ν. Δράμας*, Μελετητής: ΕΞΑΡΧΟΥ ΝΙΚΟΛΟΠΟΥΛΟΣ ΜΠΕΝΣΑΣΣΩΝ ΑΕ, ΓΕΩΣΥΝΟΛΟ ΕΠΕ, Γ.ΣΟΥΡΗΣ, Γ. ΕΜΜΑΝΟΥΗΛΙΔΗΣ, Γ. ΠΗΛΕΙΔΗΣ, Γ. ΛΙΟΥΜΠΙΑΣ, Αθήνα.

**ΕΛΕΓΧΟΣ ΝΙΤΡΟΥΠΑΝΣΗΣ ΣΕ ΑΡΔΕΥΤΙΚΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ
ΣΤΗΝ ΤΡΟΙΖΗΝΑ ΜΕ ΤΗ ΣΥΝΔΥΑΣΤΙΚΗ ΧΡΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ
ΑΓΡΟ-ΟΙΚΟΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΜΑΖΑΣ ΓΙΑ
ΤΗΝ ΕΠΙΤΕΥΞΗ ΑΕΙΦΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

Ιωάννης Ματιάτος¹, Μαρία Π. Παπαδοπούλου^{1,2}

¹Σχολή Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο
ΕΑΠ

Πάροδος Αριστοτέλους 18, Πάτρα 23226

²Σχολή Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο
Πολυτεχνείο, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, Ζωγράφου 15780

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία εφαρμόζεται μια συνδυαστική προσέγγιση με στόχο τον έλεγχο της νιτρορύπανσης που προκαλείται εξαιτίας της αγροτικής δραστηριότητας στην πεδιάδα της Τροιζήνας. Η μαθηματική προσομοίωση του λιπαντικού φορτίου που καταλήγει στο υπέδαφος έγινε με τη χρήση ενός αγρονομικού μοντέλου, ενώ για τη μαθηματική προσομοίωση της μεταφοράς του φορτίου στον υδροφόρα χρησιμοποιήθηκε ένα μοντέλο προσομοίωσης της υπόγειας ροής και της μεταφοράς ρυπογόνου μάζας. Η προτεινόμενη μεθοδολογία εφαρμόστηκε για διαφορετικά διαχειριστικά σενάρια τα αποτελέσματα των οποίων αναλύθηκαν με σκοπό την επίτευξη των περιβαλλοντικών στόχων που τίθενται από την ευρωπαϊκή νομοθεσία.

**CONTROL OF NITRATE POLLUTION IN THE IRRIGATED
REGION OF TRIZINA (ATTICA) USING AGROECOSYSTEM
AND MASS TRANSPORT MODELS FOR THE SUSTAINABLE
MANAGEMENT OF NATURAL ENVIRONMENT**

Ioannis Matiatos¹, Maria P. Papadopoulou^{1,2}

¹School of Science and Technology, Hellenic Open University HOU
Parodos Aristotelous 18, Patra 23226

²School of Rural and Surveying Engineering, National Technical University
of Athens, Heroon Polytechniou 9, Zografou 15780

ABSTRACT

In the present study, a combined approach to control nitrate pollution due to agricultural activity in the region of Trizina is implemented. A mathematical simulation of nitrate leachate that percolates to the subsoil was performed using an agronomic model, whereas the transport of nitrates to the aquifer was simulated using a simulation model of groundwater flow and contaminant mass transport. The proposed methodology was applied for alternative management scenarios whose results were analyzed to obtain the environmental goals in potable water set by the European legislation.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα νιτρικά ιόντα αποτελούν έναν από τους πιο συνήθεις ρύπους στο υπόγειο νερό προκαλώντας υποβάθμιση των ποιοτικών του χαρακτηριστικών. Οι συνηθέστερες πηγές ρύπανσης του υπόγειου νερού με νιτρικά ιόντα σχετίζονται με αγροτικές και κτηνοτροφικές δραστηριότητες (Nolan et al., 1997; EEA, 2003). Την ίδια στιγμή το άζωτο αποτελεί ένα ζωτικής σημασίας θρεπτικό συστατικό για την ανάπτυξη των φυτών το οποίο έχει οδηγήσει σε εκτεταμένη χρήση λιπασμάτων πλούσιων σε αζωτούχες ενώσεις με στόχο την αύξηση της αγροτικής παραγωγής. Η εφαρμογή λιπασμάτων τις περισσότερες φορές ξεπερνά τις απαιτήσεις των καλλιεργειών σε άζωτο, με αποτέλεσμα να πραγματοποιείται διήθηση της περίσσειας αζώτου στον υποκείμενο υδροφόρα με τη μορφή νιτρικών ιόντων ως προϊόντων νιτροποίησης. Παράλληλα, η παρουσία υψηλών συγκεντρώσεων νιτρικών ιόντων στο υπόγειο νερό έχει συνδεθεί με πιθανές επιπτώσεις στην υγεία, όπως η μεθαιμογλοβιναιμία και ο καρκίνος του στομάχου (Hatch et al., 2002; Wolfe and Patz, 2002).

Προκειμένου να αντιμετωπιστεί η υποβάθμιση της ποιότητας του υπόγειου νερού εξαιτίας της νιτρορύπανσης, η ΕΕ έχει εκδώσει σχετικές Οδηγίες, όπως η Οδηγία για το Πόσιμο Νερό (80/778/EEC και η αναθεωρημένη 98/83/EC) η οποία θεσπίζει ως ανώτατο όριο της συγκέντρωσης των νιτρικών ιόντων στο πόσιμο νερό τα 50 mg/l. Ακολούθως, η Οδηγία 2000/60/EC θέτει ως στόχο για κάθε κράτος μέλος την «καλή κατάσταση» των υπόγειων υδατικών συστημάτων μέχρι το 2015, η οποία αφορά τόσο στα ποσοτικά όσο και στα ποιοτικά τους χαρακτηριστικά. Τέλος, η Οδηγία 2006/118/EC αναφέρει ότι οποιαδήποτε τάση αύξησης της συγκέντρωσης ενός ρύπου προσδιοριστεί σε έναν υπόγειο υδροφόρα, αυτή θα πρέπει να αναστραφεί. Στα πλαίσια επίτευξης των περιβαλλοντικών στόχων που θέτει η ΕΕ, όπως είναι η συγκέντρωση νιτρικών ιόντων στο υπόγειο νερό, είναι απαραίτητος ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη συνδυαστικών μοντέλων διαχείρισης. Συγκεκριμένα, έχει προταθεί η εφαρμογή συνδυαστικών μοντέλων τα οποία προσομοιώνουν την ποιότητα του υπόγειου νερού και την εξέλιξη αυτής, ύστερα από την εφαρμογή συγκεκριμένων αγροτικών πολιτικών και μέτρων προστασίας, έτσι ώστε να προσδιοριστεί η βέλτιστη πολιτική διαχείρισης ενός υπόγειου υδατικού συστήματος (Gömann et al., 2005; Graveline and Rinaudo, 2007; Graveline et al., 2007; Almasri and Kaluarachchi, 2007).

Η παρούσα εργασία έχει ως στόχο την ανάπτυξη μιας συνδυαστικής προσέγγισης για τον έλεγχο και τη διαχείριση της αγροτικής ρύπανσης που λαμβάνει χώρα στον υδροφόρα της Τροιζήνας σε σχέση με την επίτευξη των περιβαλλοντικών στόχων που θέτει η Οδηγία 2000/60/EC ως προς τη συγκέντρωση των νιτρικών ιόντων στο πόσιμο νερό (50 mg/l). Το προτεινόμενο συνδυαστικό μοντέλο προκύπτει από την ταυτόχρονη εφαρμογή ενός αγρονομικού μοντέλου λίπανσης και ενός μοντέλου προσομοίωσης της μεταφοράς των νιτρικών ιόντων στον υπόγειο υδροφόρα, λαμβάνοντας υπόψη τους περιβαλλοντικούς στόχους. Ο φρεάτιος υδροφόρας της Τροιζήνας εντοπίζεται στο νότιο τμήμα της Αργολικής Χερσονήσου σε μια περιοχή που χαρακτηρίζεται από πολύπλοκη γεωλογική δομή, ανεξέλεγκτη εφαρμογή λιπασμάτων για την καλλιέργεια αγροτικών και μη προϊόντων καθώς και εκτεταμένη αντλητική δραστηριότητα των υπόγειων αποθεμάτων της περιοχής προκειμένου να καλυφθούν οι ανάγκες άρδευσης. Ως αποτέλεσμα, ο υδροφόρας έχει υποστεί υποβάθμιση της ποιότητάς του σε όλη σχεδόν την έκτασή του εξαιτίας της περίσσειας αζώτου που καταλήγει σε αυτόν με τη μορφή νιτρικών ιόντων. Η ανάγκη για σωστή διαχείριση του συγκεκριμένου υδροφόρα είναι επιτακτική, καθώς οι περιβαλλοντικές και κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις στην περιοχή από τις συνεχιζόμενες προαναφερθείσες δραστηριότητες είναι σημαντικές.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.1. ΣΥΝΔΥΑΣΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Στο προτεινόμενο συνδυαστικό μοντέλο επιχειρήθηκε η σύνδεση της αγροτικής παραγωγής και της λιπαντικής δραστηριότητας με τις επιπτώσεις στην ποιότητα του υδροφορέα εξαιτίας της παρουσίας των νιτρικών ιόντων στο υπόγειο νερό. Για την εφαρμογή του εν λόγω μοντέλου απαιτήθηκε η ανάπτυξη ενός αγρονομικού μοντέλου το οποίο προσομοιώνει την εφαρμοζόμενη λιπαντική δραστηριότητα καθώς και την ανάπτυξη ενός μοντέλου προσομοίωσης της μεταφοράς ρυπογόνου μάζας με στόχο τη διερεύνηση των επιπτώσεων στην ποιότητα των υπογείων υδάτων λόγω της περισσειας των αζωτούχων ενώσεων που διηθούνται.

2.1.1. Αγρονομικό μοντέλο

Για την προσομοίωση της ποσότητας του αζώτου που διηθείται στο έδαφος υπάρχουν αγρονομικά μοντέλα όπως είναι το EPIC (Williams, 1995; Liu et al., 2007), το GLEAMS (Knisel et al., 1995; de Paz and Ramos, 2004) και το NLEAP (Shaffer et al., 1991). Το μοντέλο EPIC συνιστά ένα συνδυαστικό μοντέλο προσομοίωσης του αγροτικού συστήματος και της χημικής μεταφοράς ρύπων το οποίο επιτρέπει τη σύνδεση της αγροτικής παραγωγής και της διήθησης των νιτρικών ιόντων στο υπέδαφος με παραμέτρους, όπως οι εφαρμοζόμενες πρακτικές άρδευσης, οργώματος και λίπανσης καθώς και εδαφολογικά και κλιματολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το αγρονομικό μοντέλο WinEPIC (Gerik et al., 2006) το οποίο αποτελεί μια παραθυρική έκδοση του μοντέλου EPIC (Environmental Policy Integrated Climate) το οποίο προορίζεται για την ανάλυση των πρακτικών καλλιέργειας σε μια περιοχή και τον προσδιορισμό των επιπτώσεων στην αγροτική παραγωγή και στην ποιότητα των εδαφικών και των υδάτινων πόρων της. Το μοντέλο είναι σχεδιασμένο κατά τέτοιο τρόπο ώστε: 1) να συνδυάζει πολλά από τα χαρακτηριστικά του μοντέλου CroPMan (Crop Production and Management Model; Gerik et al., 2006) το οποίο έχει σχεδιαστεί για την καλύτερη διαχείριση της αγροτικής παραγωγής και τον προσδιορισμό των βέλτιστων αγροτικών πρακτικών που ελαχιστοποιούν τις επιπτώσεις των καλλιεργειών στη διάβρωση του εδάφους και την ποιότητα του νερού, 2) να παρουσιάζει αξιοπιστία σε περιπτώσεις που απαιτούνται πολλαπλές επαναλήψεις επίλυσης των εξισώσεων, 3) να είναι περισσότερο φιλικό προς το χρήστη επιτρέποντας την ευκολότερη ανάλυση και ερμηνεία των αποτελεσμάτων (Gerik et al., 2006). Το παραθυρικό περιβάλλον του WinEPIC απαιτεί την εισαγωγή μικρού αριθμού παραμέτρων, ενώ δίνει τη δυνατότητα προσαρμογής των δεδομένων εισόδου από το χρήστη. Η βασική παράμετρος που υπολογίστηκε από το μοντέλο είναι η ποσότητα του αζώτου που καταλήγει στον υπόγειο υδροφορέα.

Η ποσότητα των νιτρικών ιόντων που διηθείται στο υπέδαφος και καταλήγει στον υπόγειο υδροφορέα είναι συνάρτηση παραμέτρων, όπως η εφαρμοζόμενη λιπαντική δραστηριότητα, η εφαρμοζόμενη αρδευτική πρακτική, το πορώδες του εδάφους, κ.α. Μετά την δέσμευση της απαιτούμενης ποσότητας αζώτου από τις καλλιέργειες, μέρος αυτής της ποσότητας μετατρέπεται σε νιτρικά ιόντα τα οποία καταλήγουν στον υπόγειο υδροφορέα. Η εν λόγω ποσότητα των νιτρικών ιόντων, η οποία εισάγεται τελικά στο μοντέλο προσομοίωσης μεταφοράς ρύπων, περιγράφεται από την ακόλουθη πολυωνυμική εξίσωση (Peña-Haro et al., 2009):

$$L_c = g + h \cdot W_c + i \cdot W_c^2 + j \cdot N_c + k \cdot N_c^2 + l \cdot W_c \cdot N_c \quad (2.1)$$

όπου: L_c = η ποσότητα του αζώτου που διηθείται (kg/ha), W_c = η εφαρμοζόμενη ποσότητα νερού στις καλλιέργειες (m^3/ha), N_c = η εφαρμοζόμενη ποσότητα λιπάσματος στις καλλιέργειες (kg/ha), g, h, i, j, k και l = συντελεστές.

2.1.2. Μοντέλο υπόγειας ροής και μεταφοράς μάζας

Η μεταφορά των νιτρικών ιόντων στον υδροφορέα είναι συνάρτηση της ταχύτητας του υπόγειου νερού και εκφράζεται από την εξίσωση ροής του υπόγειου νερού σε συνθήκες μόνιμης ροής για ένα κορεσμένο, ανισότροπο και πορώδες μέσο (Freeze and Cherry, 1979):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) + W = 0 \quad (2.2)$$

όπου: $K_{x,y,z}$ = η υδραυλική αγωγιμότητα (L/T) κατά τον άξονα x, y, z , H = το υδραυλικό φορτίο (L), W = η ογκομετρική παροχή ανά μονάδα όγκου του υδροφορέα (M^3/L).

Η μεταφορά της ρυπογόνου μάζας στο υπόγειο νερό είναι συνάρτηση πέντε βασικών μηχανισμών (συμμεταφορά, μοριακή διάχυση, κινηματική διασπορά, μηχανισμοί αλληλεπίδρασης, χημικές αντιδράσεις) που λαμβάνουν χώρα στο υπέδαφος μεταξύ του πορώδους μέσου και του ρευστού. Η εξίσωση που εκφράζει τη μεταφορά της ρυπογόνου μάζας υπό την επίδραση των παραπάνω μηχανισμών δίνεται ακολούθως (Zheng and Bennett, 2002):

$$R \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (v_i C) + \frac{q_s}{\theta} C_s - \lambda \left(C + \frac{\rho_b}{\theta} \bar{C} \right) \quad (2.3)$$

όπου: C = συγκέντρωση του ρύπου (M/L^3), t = ο χρόνος (T), \bar{C} = η συγκέντρωση του ροφημένου ρύπου (M/L^3), v_i = η ταχύτητα του νερού στο πορώδες μέσο (L/T), q_s = η ογκομετρική παροχή ανά μονάδα όγκου του υδροφορέα (M^3/L), C_s = η συγκέντρωση του ρύπου στην πηγή ή την καταβόθρα (M/L^3), λ = η σταθερά που εκφράζει το ρυθμό της αντίδρασης (T^{-1}), ρ_b = η φαινόμενη πυκνότητα του μέσου, θ = το πορώδες, R = ο παράγοντας επιβράδυνσης.

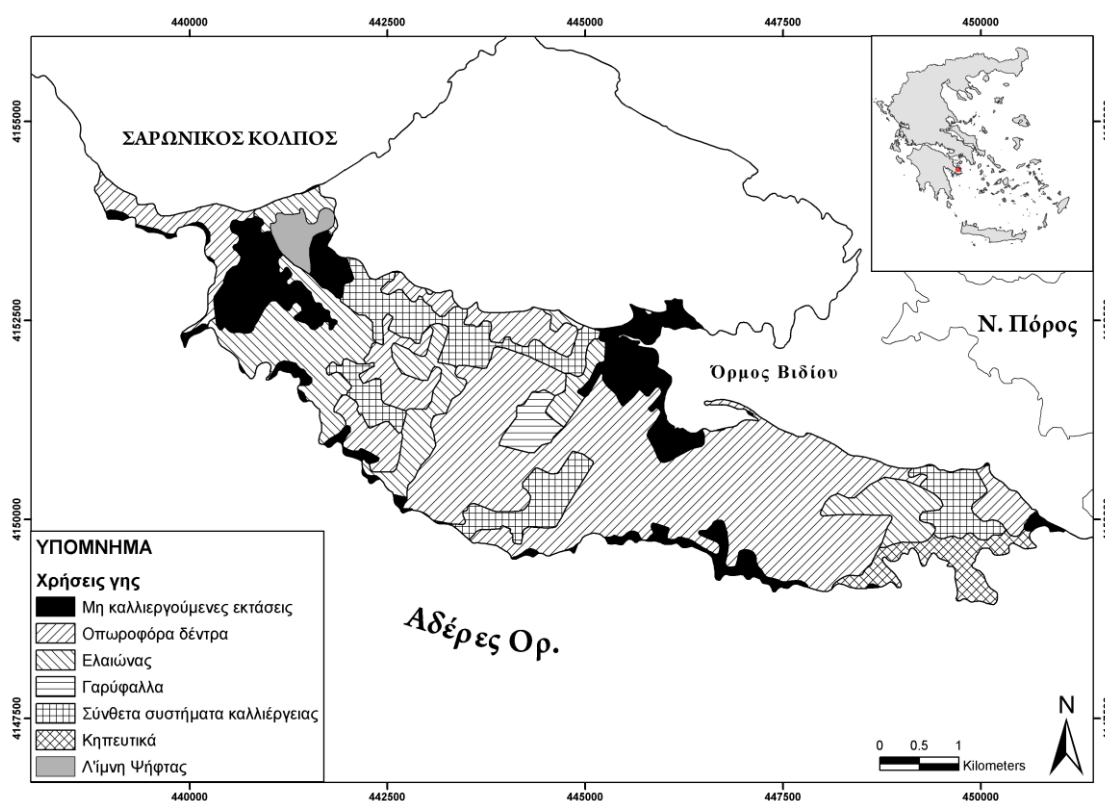
Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση του ελεύθερου υδροφορέα στην περιοχή της Τροιζήνας είναι το GMS (Groundwater Modeling System), έκδοση 7.0, και οι κώδικες που αξιοποιήθηκαν για την επίλυση των εξισώσεων με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών είναι: 1) ο αλγόριθμος MODFLOW (McDonald and Harbough, 1988) για τη μαθηματική προσομοίωση της υπόγειας ροής και 2) ο αλγόριθμος MT3DMS (Zheng and Wang, 1999) για την προσομοίωση της μεταφοράς ρυπογόνου μάζας και ειδικότερα των νιτρικών ιόντων. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τους συγκεκριμένους υπολογιστικούς κώδικες ήταν υδραυλικά φορτία και συγκεντρώσεις νιτρικών ιόντων, όπως αυτά μεταβάλλονται με το χρόνο, σε όλο το προσομοιωμένο υπόγειο υδατικό σύστημα.

3. ΣΥΝΔΥΑΣΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΓΡΟΝΟΜΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΜΑΖΑΣ

3.1. ΑΓΡΟΝΟΜΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Η κατακόρυφη εισροή των νιτρικών ιόντων (nitrate leachate) στον υδροφορέα οφείλεται στις καλλιέργειες που απαντώνται στη περιοχή μελέτης, οι βασικότερες από τις οποίες, ύστερα από το συνδυασμό των διαθέσιμων στοιχείων από το Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων και το δίκτυο Corine, είναι οι εξής (Σχήμα 1):

- Ελαιώνες
- Οπωροφόρα δέντρα
- Ετήσιες καλλιέργειες που συνδέονται με μόνιμες καλλιέργειες
- Σύνθετα συστήματα καλλιέργειας
- Γη που καλύπτεται από καλλιέργειες με σημαντικές εκτάσεις φυτικής βλάστησης



Σχήμα 1: Ο χάρτης χρήσεων γης της περιοχής μελέτης

Στα «σύνθετα συστήματα καλλιέργειας» θεωρήθηκε ότι λαμβάνουν χώρα τρία είδη καλλιέργειας σε ποσοστά 30% Ελαιώνες, 30% Οπωροφόρα και 40% Κηπευτικά, ενώ στις «ετήσιες καλλιέργειες που συνδέονται με μόνιμες καλλιέργειες» θεωρήθηκε ότι γίνεται καλλιέργεια γαρυφαλλών, κάτι που επιβεβαιώθηκε και από επιτόπου παρατηρήσεις. Τέλος, στην κατηγορία «γη που καλύπτεται από καλλιέργειες με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης» θεωρήθηκε ότι γίνεται καλλιέργεια κηπευτικών, κάτι που επίσης επιβεβαιώθηκε από επιτόπου παρατηρήσεις (Σχήμα 1).

Για την εφαρμογή του αγρονομικού μοντέλου WinEPIC και τον προσδιορισμό της διηθούμενης ποσότητας αζώτου, οι παράμετροι που εισήχθησαν είναι οι ακόλουθες:

- Μετεωρολογικά στοιχεία (ύψος βροχής, άνεμος, θερμοκρασία), τα οποία προήλθαν από τους πλησιέστερους σταθμούς στην περιοχή (Πόρος, Κρανίδι, Μπάφι),

- Εδαφολογικά στοιχεία της περιοχής τα οποία προήλθαν από βιβλιογραφικά δεδομένα (Hikmatullaha & Al-Jabrib, 2007),
- Στοιχεία λιπαντικής δραστηριότητας στις καλλιέργειες της περιοχής. Ειδικότερα, θεωρήθηκε μια ετήσια χορήγηση αζώτου ίση με 15 Kg N/στρέμμα για τους ελαιώνες, ίση με 25 Kg N/στρέμμα για τα οπωροφόρα δέντρα, ίση με 37 Kg N/στρέμμα για τα κηπευτικά και ίση με 450 mg/l N/στρέμμα για τα γαρύφαλλα,
- Στοιχεία που αφορούν πρακτικές άρδευσης, λίπανσης και συγκομιδής (Σαββίδης, 2009).

Η εφαρμογή του μοντέλου WinEPIC για τις υπάρχουσες καλλιέργειες έγινε για το διάστημα 1/4/2005-1/9/2007, τα αποτελέσματα της οποίας δίνονται στους Πίνακες 1, 2, 3. Λαμβάνοντας υπόψη μια επιφανειακή κατείσδυση στις προσχωματικές αποθέσεις της τάξης του 20% σε κάθε περιοχή, ανάλογα με το ύψος των κατακρημνισμάτων κατά το μήνα της λίπανσης, αλλά και την εφαρμοζόμενη άρδευση, υπολογίστηκε η ποσότητα του νερού (m^3/d) που κατεισδύει στο υπέδαφος και με βάση αυτή, στη συνέχεια, υπολογίστηκε η συγκέντρωση (mg/l) των νιτρικών ιόντων που καταλήγουν στον υδροφόρο.

Πίνακας 1: Ποσότητα αζώτου (Kg/ha) που καταλήγει στον υδροφόρο για το 2005

Καλλιέργεια/Μήνας	Φεβρ.	Μάρτ.	Απρ.	Μάιος	Ιούν.	Ιούλ.	Δεκ.
Ελαιώνες	-	-	-	-	-	-	88.5
Οπωροφόρα δέντρα	20.1	-	-	-	-	6.3	-
Γαρύφαλλα	-	-	-	-	-	-	40.4
Σύνθετα συστήματα καλλιέργειας	10.1	7.9	1.9	1.9	1.3	1.9	26.6
Κηπευτικά	10.1	19.8	4.9	4.9	3.2	-	-

Πίνακας 2: Ποσότητα αζώτου (Kg/ha) που καταλήγει στον υδροφόρο για το 2006

Καλλιέργεια/Μήνας	Φεβρ.	Μάρτ.	Απρ.	Μάιος	Ιούν.	Ιούλ.	Δεκ.
Ελαιώνες	-	-	-	-	-	-	59.6
Οπωροφόρα δέντρα	12.7	-	-	-	-	4.9	-
Γαρύφαλλα	-	-	-	-	-	-	39.1
Σύνθετα συστήματα καλλιέργειας	13.5	7.0	1.5	1.4	0.9	1.5	17.9
Κηπευτικά	24.1	17.6	3.7	3.4	2.2	-	-

Πίνακας 3: Ποσότητα αζώτου (Kg/ha) που καταλήγει στον υδροφόρο για το 2007

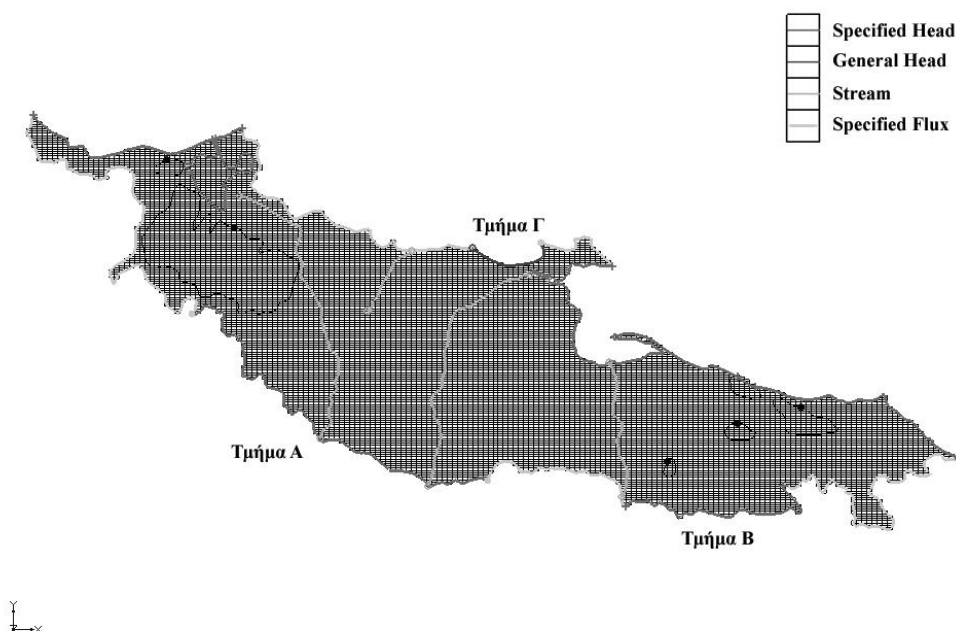
Καλλιέργεια/Μήνας	Φεβρ.	Μάρτ.	Απρ.	Μάιος	Ιούν.	Ιούλ.
Ελαιώνες	-	-	-	-	-	-
Οπωροφόρα δέντρα	12.3	-	-	-	-	4.8
Γαρύφαλλα	-	-	-	-	-	-
Σύνθετα συστήματα καλλιέργειας	11.1	5.7	1.3	1.2	0.8	1.4
Κηπευτικά	18.6	14.3	3.2	3.0	1.9	-

3.2. ΜΟΝΤΕΛΟ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΡΥΠΟΓΟΝΟΥ ΜΑΖΑΣ

Η χωρική διακριτοποίηση του μοντέλου για την προσομοίωση της μεταφοράς ρυπογόνου μάζας έγινε σε οριζόντια κλίμακα με ένα κάρναβο πεπερασμένων διαφορών

συνολικού αριθμού 11410 ενεργών κελιών (200m×200m) και σε κατακόρυφη κλίμακα σε μια εδαφική στρώση (layer) μεταβλητού πάχους και μέγιστου βάθους 100m (Μπεζές, 1999), η οποία αντιστοιχεί στις προσχωσιγενείς αποθέσεις στις οποίες φιλοξενείται το υπόγειο νερό του υδροφορέα μελέτης. (Σχήμα 2). Ο σχηματιζόμενος κάρναβος συνίσταται από 183 στήλες διεύθυνσης Α-Δ και από 182 γραμμές διεύθυνσης Β-Ν. Οι βασικές παράμετροι που εισήχθησαν στο μοντέλο για την επίλυση των εξισώσεων ροής και μεταφοράς ρυπογόνου μάζας προέκυψαν κυρίως από βιβλιογραφικά δεδομένα και είναι οι ακόλουθες:

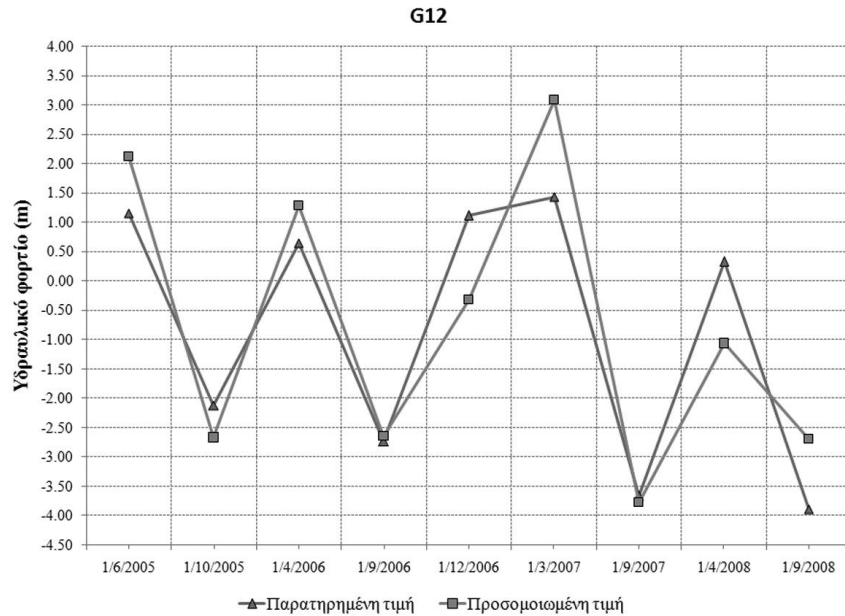
- Τροφοδοσία από ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα (Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων)
- Υδραυλική αγωγιμότητα (ύστερα από βαθμονόμηση)
- Διήθηση νερού χειμάρρων (Μπεζές, 1999)
- Αντλήσεις από υδροληπτικά έργα (Σιέμος, 2002; Σιέμος & Μιχαλακάκης, 2009; Μπεζές, 1999)
- Πλευρική τροφοδοσία του υδροφορέα από τα τμήματα Α, Β και Γ (ύστερα από βαθμονόμηση)



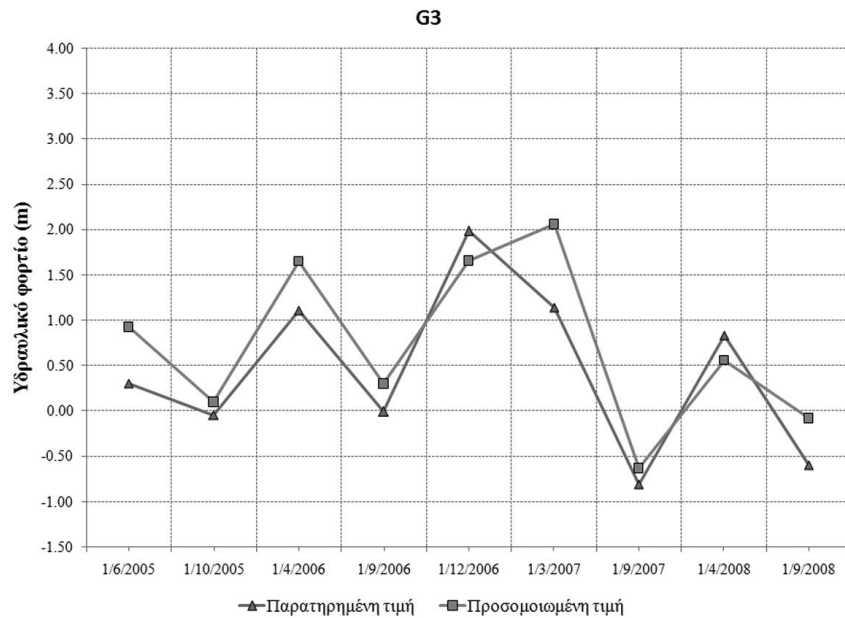
Σχήμα 2: Ο κάρναβος οριζόντιας διακριτοποίησης και οι οριακές συνθήκες

Η επίλυση των εξισώσεων ροής έγινε με τη χρήση του αλγορίθμου MODFLOW σε συνθήκες μη μόνιμης ροής και ο συνολικός χρόνος προσομοίωσης ήταν 883 ημέρες (1/4/2005-1/9/2007). Το διάστημα της προσομοίωσης διακρίθηκε σε επτά (7) χρονικές περιόδους και κάθε μια από αυτές σε χρονικά βήματα. Ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων ήταν πενήντα (50), ενώ ως κριτήριο σύγκλισης του υδραυλικού φορτίου ορίστηκε η τιμή 10^{-2} m. Ως αρχικές τιμές του υδραυλικού φορτίου θεωρήθηκαν εκείνες της περιόδου 4/2005 (Σιέμος & Μιχαλακάκης, 2009) και με βάση αυτές επιχειρήθηκε να αναπαραχθούν οι τιμές του υδραυλικού φορτίου στο τέλος κάθε περιόδου, μέσα από τη διαδικασία βαθμονόμησης του μοντέλου. Η βαθμονόμηση του μοντέλου έγινε με βάση τις τιμές σε δεκαέξι (16) συνολικά σημεία παρατήρησης υδραυλικού φορτίου για τα οποία υπήρχαν καταγραφές από μετρήσεις του Ι.Γ.Μ.Ε.Μ. στα υδροληπτικά έργα της περιοχής για το σύνολο της περιόδου προσομοίωσης (Σιέμος & Μιχαλακάκης,

2009). Η επαλήθευση της προσομοίωσης ροής πραγματοποιήθηκε λαμβάνοντας υπόψη τις παρατηρημένες τιμές υδραυλικού φορτίου της χρονικής περιόδου 1/9/2007-1/9/2008, όπως αυτό καταγράφηκε στα ίδια δεκαέξι (16) σημεία παρακολούθησης. Επίσης, για την επίλυση των εξισώσεων ροής στη συγκεκριμένη χρονική περίοδο θεωρήθηκε ότι ισχύουν οι ίδιες φορτίσεις και οι ίδιες πλευρικές τροφοδοσίες με το προηγούμενο υδρολογικό έτος. Ενδεικτικά αποτελέσματα της βαθμονόμησης και επαλήθευσης του μοντέλου σε δυο σημεία παρατήρησης δίνονται στα Σχήματα 3 και 4.



Σχήμα 3: Παρατηρημένες και προσομοιωμένες τιμές υδραυλικού φορτίου στο σημείο G12



Σχήμα 4: Παρατηρημένες και προσομοιωμένες τιμές υδραυλικού φορτίου στο σημείο G3

Στη συνέχεια, με τη χρήση του αλγορίθμου MT3DMS έγινε προσομοίωση της μεταφοράς των νιτρικών ιόντων, η παρουσία των οποίων στην περιοχή μελέτης είναι

εκτεταμένη εξαιτίας της αγροτικής δραστηριότητας και της εφαρμογής λιπασμάτων. Προϋπόθεση για την εφαρμογή του εν λόγω αλγορίθμου αποτέλεσε η προσομοίωση της ροής με τον αλγόριθμο MODFLOW η οποία και προηγήθηκε. Η εφαρμογή του μοντέλου έγινε σε συνθήκες μη μόνιμης ροής και περιελάμβανε την εισαγωγή παραμέτρων σχετικών με τη μεταφορά ρυπογόνου μάζας στο υπέδαφος (π.χ. πορώδες, συντελεστής διασποράς, συντελεστής διάχυσης) πλέον εκείνων που εφαρμόστηκαν στην προσομοίωση της ροής. Η βαθμονόμηση του μοντέλου έγινε με τη βοήθεια δεκαεπτά (17) σημείων καταγραφής της συγκέντρωσης των νιτρικών ιόντων για τα οποία υπήρχαν μετρήσεις από το Ι.Γ.Μ.Ε.Μ. (Σιέμος & Μιχαλακάκης, 2009), χωρίς ωστόσο οι χρονοσειρές να είναι πλήρεις (Πίνακες 4, 5).

Πίνακας 4: Παρατηρημένες και προσομοιωμένες τιμές συγκέντρωσης NO_3^- (mg/l)

Σημεία	Παρατ. 6/2005	Προσομ. 6/2005	Παρατ. 10/2005	Προσομ. 10/2005	Παρατ. 4/2006	Προσομ. 4/2006	Παρατ. 9/2006	Προσομ. 9/2006
F2	74.4	75.3	-	-	74.4	78.0	-	-
F25	68.2	67.4	49.6	49.1	-	-	-	-
F26	31.0	32.0	37.2	35.6	-	-	-	-
F28	30.8	30.4	37.2	36.6	-	-	-	-
F47	18.4	18.6	21.7	22.0	-	-	-	-
G12	-	-	49.6	49.5	-	-	-	-
G131	93.0	91.9	93.0	93.2	-	-	-	-
G135	62.0	61.9	-	-	-	-	-	-
G136	93.0	93.7	111.0	111.1	-	-	-	-
G16	-	-	-	-	43.4	43.2	34.0	35.6
G35	142.6	143.3	136.4	134.4	-	-	-	-
G5	-	-	37.2	38.1	-	-	-	-
G61	52.6	52.7	43.4	42.5	-	-	-	-

Πίνακας 5: Παρατηρημένες και προσομοιωμένες τιμές συγκέντρωσης NO_3^- (mg/l)

Σημεία	Παρατ. 12/2006	Προσομ. 12/2006	Παρατ. 3/2007	Προσομ. 3/2007	Παρατ. 9/2007	Προσομ. 9/2007
F121	-	-	-	-	155.0	155.0
F2	-	-	49.6	52.0	62.0	64.0
F21	24.8	25.2	-	-	62.0	64.0
F25	24.8	25.6	55.8	56.7	25.0	25.8
F26	24.8	25.2	62.0	62.3	-	-
F28	-	-	-	-	-	-
F47	18.6	17.7	21.3	22.3	21.6	22.1
G10	37.2	37.6	-	-	93.0	93.8
G12	-	-	74.4	74.7	93.0	92.9
G131	49.6	48.9	55.8	57.4	93.0	93.8
G135	-	-	-	-	-	-
G136	-	-	-	-	112.0	111.9
G16	-	-	31.0	31.4	62.0	60.1
G35	105.0	105.1	-	-	186.0	185.0
G5	24.8	24.1	37.2	36.4	24.0	24.2
G61	31.0	30.5	-	-	80.6	81.4
G8	37.2	36.2	74.4	72.8	-	-

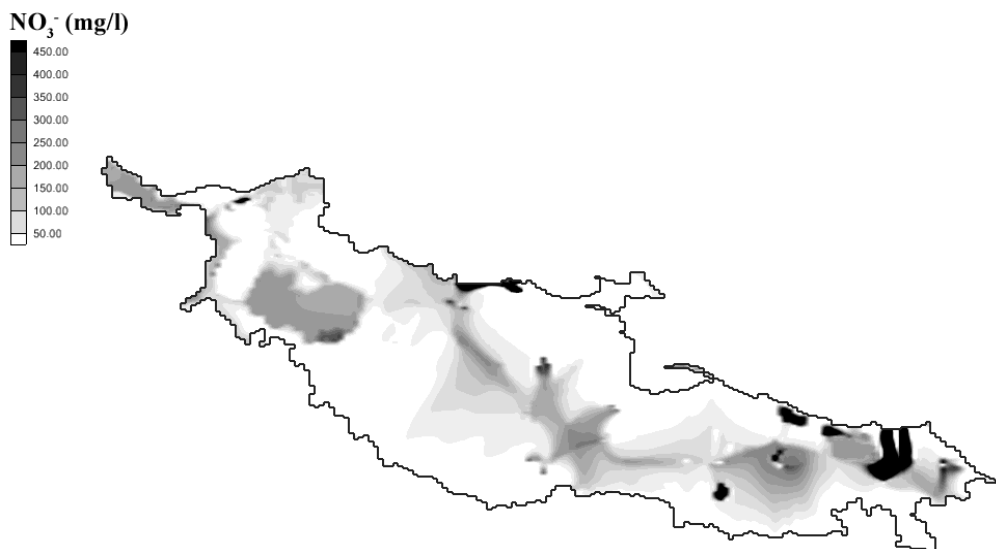
Στο μοντέλο χρησιμοποιήθηκαν ως αρχικές συνθήκες συγκέντρωσης των νιτρικών ιόντων οι διαμορφωμένες τιμές της περιόδου 4/2005. Η λίπανση στο μοντέλο εφαρμόστηκε με τη μορφή κατακόρυφης επιφανειακής εισροής νιτρικών ιόντων όπως αυτή προήλθε από την εφαρμογή του μοντέλου WinEPIC που έγινε στο προηγούμενο

στάδιο. Ωστόσο, κατά θέσεις και κατόπιν επιτόπου καταγραφής θεωρήθηκε σκόπιμη η εισαγωγή σημειακών φορτίσεων δεδομένης συγκέντρωσης νιτρικών ιόντων, καθώς διαπιστώθηκε μεγάλη διαφορά στις τιμές των νιτρικών ιόντων σε γειτονικά υδροληπτικά έργα. Όπως και στην περίπτωση της ροής, έγινε επαλήθευση του μοντέλου μεταφοράς ρυπογόνου μάζας για το χρονικό διάστημα 1/9/2007-1/9/2008. Ωστόσο, τα διαθέσιμα δεδομένα (Σιέμος & Μιχαλακάκης, 2009) για την επαλήθευση ήταν περιορισμένα.

3.3. ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΣΕΝΑΡΙΩΝ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Τα αναπτυχθέντα μοντέλα προσομοίωσης ροής και μεταφοράς ρυπογόνου μάζας χρησιμοποιήθηκαν προκειμένου να γίνει πρόβλεψη της συμπεριφοράς του υπό μελέτη υδροφορέα και των επιπτώσεων σε αυτόν σε μελλοντικούς χρόνους μέσα από τη διατύπωση εναλλακτικών σεναρίων. Αφού προσομοιώθηκαν οι σημερινές συνθήκες ροής και μεταφοράς ρυπογόνου μάζας στην περιοχή εφαρμόζοντας τα μοντέλα για το διάστημα 1/9/2008-1/9/2012, στη συνέχεια διατυπώθηκαν τα ακόλουθα σενάρια:

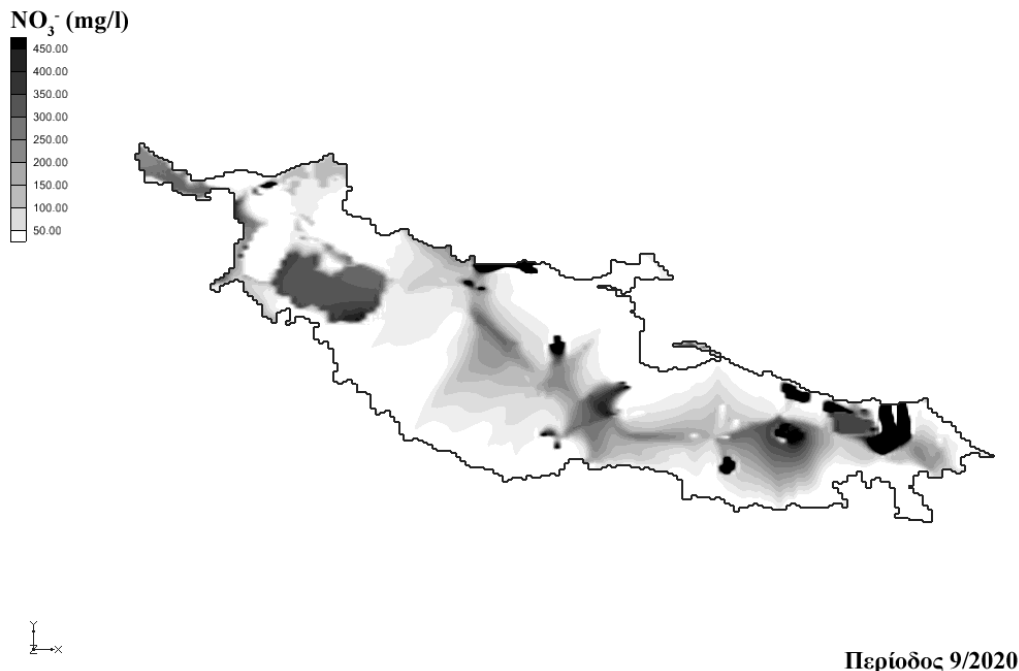
Σενάριο πρώτο: Διατηρώντας αμετάβλητες τις υδραυλικές συνθήκες (φορτίσεις, υδραυλικές παραμέτρους, τροφοδοσίες) του υδροφόρου συστήματος, όπως αυτές προέκυψαν κατά τη φάση της βαθμονόμησης του μοντέλου, προσομοιώθηκε η μεταβολή του υδραυλικού φορτίου και της συγκέντρωσης των νιτρικών ιόντων για το διάστημα 9/2012-9/2020. Το σενάριο είχε ως στόχο την πρόβλεψη των ποιοτικών χαρακτηριστικών του υδροφορέα σε σχέση με τα νιτρικά ιόντα. Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης (Σχήμα 5) δείχνει ότι οι τιμές των νιτρικών ιόντων παραμένουν σε υψηλότερες συγκεντρώσεις από την ενδεικτική τιμή των 50mg/l της Οδηγίας 98/83/EC σε σημαντική έκταση του υδροφορέα. Αν και το παρόν σενάριο θεωρεί ότι διατηρείται η σημερινή λιπαντική δραστηριότητα, προβλέπεται περαιτέρω υποβάθμιση της ποιότητας του υπόγειου νερού λόγω των νιτρικών ιόντων, με τη νιτρορύπανση να εξαπλώνεται σε μεγαλύτερο τμήμα του υδροφορέα και ιδιαίτερα στο ανατολικό.



Περίοδος 9/2020

Σχήμα 5: Ο χάρτης ισοκατανομής των νιτρικών ιόντων της περιόδου 9/2020

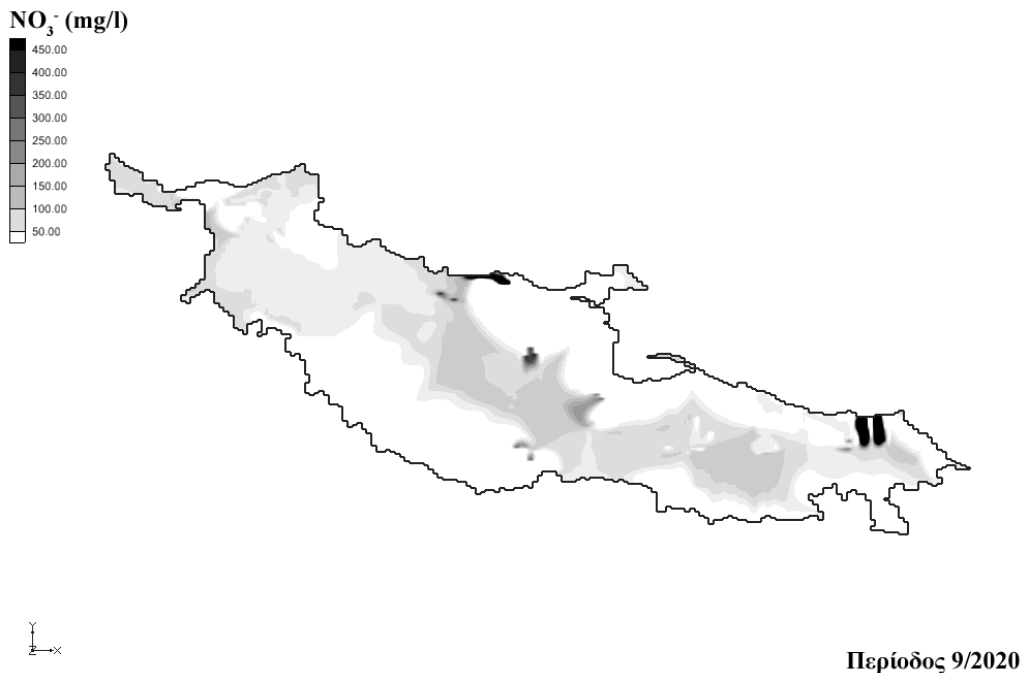
Σενάριο δεύτερο: Κατά το εν λόγω σενάριο, με δεδομένες τις υδραυλικές παραμέτρους, τις φορτίσεις και τις τροφοδοσίες που δέχεται ο υδροφορέας, θεωρήθηκε ότι λαμβάνει χώρα διπλασιασμός της λιπαντικής δραστηριότητας στις καλλιεργούμενες εκτάσεις. Ένα τέτοιο σενάριο μπορεί να γίνει πραγματικότητα στην περίπτωση που εντατικοποιηθούν οι λιπάνσεις στην περιοχή με στόχο την αύξηση της παραγωγής. Με βάση τις παραπάνω παραδοχές έγινε προσομοίωση της μεταβολής της συγκέντρωσης των νιτρικών ιόντων για το χρονικό διάστημα 9/2012-9/2020. Όπως παρατηρείται στα αποτελέσματα του 2^{ου} σεναρίου (Σχήμα 6), ο διπλασιασμός της λιπαντικής δραστηριότητας αναμένεται να έχει σημαντικές επιπτώσεις στα ποιοτικά χαρακτηριστικά του υδροφορέα σε μεγάλο ποσοστό. Οι πολύ υψηλές συγκεντρώσεις των νιτρικών ιόντων (>150mg/l), πολύ μεγαλύτερες από την ενδεικτική τιμή των 50mg/l της Οδηγίας 98/83/EC, εντοπίζονται σε πολλά τμήματα του υδροφορέα, ενώ ειδικότερα στο ανατολικό η έντονη λιπαντική δραστηριότητα προβλέπεται ότι θα οδηγήσει σε περαιτέρω υποβάθμιση της ποιότητας του υπόγειου νερού με τις συγκεντρώσεις των νιτρικών ιόντων να ξεπερνούν τα 450mg/l.



Σχήμα 6: Ο χάρτης ισοκατανομής των νιτρικών ιόντων της περιόδου 9/2020

Σενάριο τρίτο: Σύμφωνα με το τρίτο σενάριο, οι φορτίσεις και οι υδραυλικές παράμετροι του υδροφορέα που προέκυψαν από τη βαθμονόμηση του μοντέλου θεωρήθηκαν αμετάβλητες, και αυτό που άλλαξε ήταν η κατακόρυφη τροφοδοσία εξαιτίας των βροχοπτώσεων για την οποία θεωρήθηκε μια μείωση της τάξης του 25%. Μια τέτοια εκτίμηση μπορεί να είναι ρεαλιστική, όπως άλλωστε έχει προβλεφθεί από τα Ηνωμένα Έθνη για τις χώρες της Μεσογείου στις επόμενες δεκαετίες (United Nations, 2009). Με τις παραδοχές αυτές έγινε προσομοίωση της μεταβολής του υδραυλικού φορτίου και της συγκέντρωσης των νιτρικών ιόντων για το χρονικό διάστημα 9/2012-9/2020. Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης (Σχήμα 7) δείχνει ότι οι συγκεντρώσεις των νιτρικών ιόντων μειώνονται τα επόμενα έτη, κάτι που αποδίδεται στη μείωση της ποσότητας του νερού των κατακρημνισμάτων που διηθείται στο υπέδαφος. Υπενθυμίζεται, ότι το νερό των κατακρημνισμάτων είναι εκείνο που ερχόμενο σε επαφή με τις πηγές νιτρορύπανσης εμπλουτίζει τον υδροφορέα με νιτρικά ιόντα. Παρ' όλα αυτά, ο υδροφορέας προβλέπεται ότι θα εξακολουθήσει να

υποβαθμίζεται με τις μέγιστες συγκεντρώσεις (>50mg/l) να παρατηρούνται κυρίως στο ανατολικό τμήμα της περιοχής μελέτης.



Σχήμα 7: Ο χάρτης ισοκατανομής των νιτρικών ιόντων της περιόδου 9/2020

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας εφαρμόστηκε μια συνδυαστική προσέγγιση με στόχο τον έλεγχο της νιτρορύπανσης που προκαλείται στην πεδιάδα της Τροιζήνας εξαιτίας της αγροτικής δραστηριότητας. Η μαθηματική προσομοίωση της φυτικής παραγωγής σε σχέση με το λιπαντικό φορτίο που καταλήγει στο υπέδαφος έγινε με τη χρήση του αγρονομικού μοντέλου WinEPIC τα αποτελέσματα του οποίου αξιοποιήθηκαν για τη μαθηματική προσομοίωση της μεταφοράς ρυπογόνου μάζας με τη χρήση του λογισμικού GMS. Η εφαρμογή του μοντέλου για την προσομοίωση των σημερινών και μελλοντικών συνθηκών νιτρορύπανσης στην περιοχή μέσα από τη διατύπωση εναλλακτικών σεναρίων κατέληξε στα ακόλουθα συμπεράσματα:

1. Η διατήρηση της παρούσας λιπαντικής δραστηριότητα έχει ως αποτέλεσμα τη μη επίτευξη των περιβαλλοντικών στόχων ως προς της συγκέντρωση των νιτρικών ιόντων (ενδεικτική τιμή 50mg/l με βάση την Οδηγία 98/83/EC) τόσο στον παρόντα χρόνο όσο και σε βάθος χρόνου μέχρι το 2020. Ειδικότερα, μέχρι το 2020 αναμένεται διεύρυνση της ρύπανσης σε μεγαλύτερη έκταση του υδροφορέα, κυρίως του ανατολικού τμήματος, με αποτέλεσμα να προκαλείται περαιτέρω υποβάθμιση της ποιότητάς του.
2. Η προσομοίωση της μεταφοράς νιτρικών ιόντων μέχρι το 2020, θεωρώντας ότι λαμβάνει χώρα διπλασιασμός του λιπαντικού φορτίου λόγω εντατικοποίησης της αγροτικής δραστηριότητας έδειξε ότι αναμένεται πολύ μεγάλη αύξηση της συγκέντρωσης των νιτρικών ιόντων, πολύ μεγαλύτερη της ενδεικτικής τιμής των 50mg/l (Οδηγία 98/83/EC) σε ένα μεγάλο τμήμα του υδροφορέα με ακόμα μεγαλύτερη υποβάθμιση της ποιότητας του νερού στο ανατολικό τμήμα, το οποίο χαρακτηρίζεται από πολύ υψηλή αγροτική δραστηριότητα.
3. Πιθανή μείωση των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων σε ποσοστό 25% λόγω της κλιματικής αλλαγής έδειξε ότι θα οδηγήσει σε μικρή μείωση της

συγκέντρωσης των νιτρικών ιόντων λόγω μείωσης της διηθούμενης ποσότητας του νερού των κατακρημνισμάτων. Ωστόσο, και σε αυτή την περίπτωση ο υδροφορέας παραμένει υποβαθμισμένος ποιοτικά, χωρίς να επιτυγχάνεται ο περιβαλλοντικός στόχος των 50mg/l σε αρκετά τμήματα του υδροφορέα.

Είναι φανερό από τα αποτελέσματα της ανάλυσης ότι η βελτίωση της ποιότητας του φυσικού περιβάλλοντος μιας περιοχής με έντονη αγροτική δραστηριότητα επηρεάζεται καθοριστικά από τις εφαρμοζόμενες πολιτικές λίπανσης στην αγροτική παραγωγή.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Almasri, M.N. and Kaluarachchi, J.J., 2007. *Modelling nitrate contamination of groundwater in agricultural watersheds*. Journal of Hydrology, 343: 211-222.
- de Paz, J.M., Ramos, C., 2004. *Simulation of nitrate leaching for different nitrogen fertilization rates in a region of Valencia (Spain) using a GIS-GLEAMS system*. Agriculture, Ecosystems & Environment, 103 (1): 59-73.
- EEA (European Environment Agency), 2003. *Europe's Water: An Indicator-based Assessment*. Topic Rep. 1, Copenhagen, Denmark, 99 pp.
- Freeze, A.R. and Cherry, J.A., 1979. *Groundwater*. Prentice Hall, 604 pp.
- Gerik, T., Harman, W., Williams, J., Francis, L., Greiner, J., Magre, M., Meinardus, A. and Steglich, E., 2006. *Researcher's Guide for WinEPIC VERSION 3.0*. Texas A&M Blackland Research Center BRC Report No. 05-01 Temple, Texas, 118 pp.
- Gerik, T., Harman, W., Williams, J., Francis, L., Greiner, J., Magre, M., Meinardus, A. and Steglich, E., 2006. *User's Guide for CroPMan (Crop Production and Management Model) VERSION 4.0*. Texas A&M Blackland Research Center BRC Texas, 124 pp.
- Gömann, H., Kreins, P., Kunkel, R. and Wendland, F., 2005. *Model based impact analysis of policy options aiming at reducing diffuse pollution by agriculture - a case study for the river Ems and a sub-catchment of the Rhine*. Environmental Modelling & Software, 20 (2): 261-271.
- Graveline, N. and Rinaudo, J.D., 2007. *Constructing scenarios of agricultural diffuse pollution using an integrated hydro-economic modelling approach*. European Water, 17-18: 3-16.
- Graveline, N., Rinaudo, J.D., Segger, V., Lambrecht, H., Casper, M., Elsass, P., Grimm-Strele, J., Gudera, T., Koller, R. and Van Dijk, P., 2007. *Integrating economic and groundwater models for developing long-term nitrate concentration scenarios in a large aquifer*. In: Chery, L., Marsily, G. (Eds.), *Aquifer Systems Management: Darcy's Legacy in a World of Impending Water Shortage*. Selected papers on hydrogeology n.10. IAH selected papers. Taylor & Francis, pp. 483-495.
- Hatch, D., Goulding, K. and Murphy, D., 2002. *Nitrogen*. In: Haygarth, P.M., Jarvis, S.C. (Eds.), *Agriculture Hydrology and Water Quality*. CABI Publishing, CAB International, London, UK, pp. 7-27.
- Hikmatullaha and Al-Jabrib, M., 2007. *Soil properties of the alluvial plain and its potential use for agriculture in Donggala region, central Sulawesi*. Indonesian Journal of Agricultural Science, 8 (2): 67-74.
- Knisel, W.G., Leonard, R.A. and Davis, F.M., 1995. *Representing management practices in GLEAMS*. European Journal of Agronomy, 4 (4): 499-505.

- Liu, J., Williams, J.R., Zehnder, A.J.B. and Hong, Y., 2007. *GEPIC - modelling wheat yield and crop water productivity with high resolution on a global scale*. *Agricultural Systems*, 94 (2): 478-493.
- McDonald, M.G. and Harbaugh, A.W., 1988. *A modular three-dimensional finite difference ground-water flow model*. U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, book 6, chap. A1, 586 pp.
- Nolan, B.T., Ruddy, B.C., Hitt, K.J. and Helsel, D.R., 1997. *Risk of nitrate in groundwaters of the United States - a national perspective*. *Environmental Science and Technology*, 31: 2229-2236.
- Peña-Haro, S., Pulido-Velazquez, M. and Sahuquillo, A., 2009. *A hydro-economic modeling framework for optimal management of groundwater pollution from agriculture*. *Journal of Hydrology*, 373: 193-203.
- Shaffer, M. J., Halvorson, A. D. and Pierce, F. J., 1991. *Nitrate leaching and economic analysis package (NLEAP): model description and application*. In: Follet, R.F., Keeney, D. R., Cruse, R. M. (Eds.) *Managing Nitrogen for Groundwater Quality and Farm Profitability*. Soil Science Society of America, 357 pp.
- United Nations, 2009. *Catalysing change - the UNECE response to the climate countdown*. France, United Nations, 44 pp.
- Williams, J.R., 1995. *The EPIC model*. In: Singh, V.P. (Ed.), *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publisher, pp. 909-1000.
- Wolfe, A.H. and Patz, J.A., 2002. *Reactive nitrogen and human health: acute and longterm implications*. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 31 (2): 120-125.
- Zheng, C. and Wang, P.P., 1999. *MT3DMS: A Modular Three-Dimensional Multispecies Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion, and Chemical Reactions of Contaminants in Groundwater Systems; Documentation and User's Guide*. University of Alabama, Strategic Environmental Research and Development Program Contract Report SERDP-99-1, 220 pp.
- Zheng, C., Bennett, G.D., 2002. *Applied Contaminant Transport Modeling, second ed.* Wiley-Interscience, 621 pp.
- Μπεζές, Κ., 1999. *Υδρογεωλογική μελέτη τεχνητού εμπλουτισμού υπόγειων υδροφορέων Τροιζηνίας Νομού Πειραιά*. Έκθεση υδρογεωλογικών συνθηκών, Υπουργείο Γεωργίας, Γενική Διεύθυνση Εγγειοβελτιωτικών Έργων και Γεωργικών Διαρθρώσεων, Αθήνα.
- Σαββίδης, Π., 2009. *Επίδραση της ελευρωπαϊκής στη διατηρησιμότητα δρεπτών γαρνφάλλων*. Πτυχιακή Εργασία, Σχολή Τεχνολογίας Γεωπονίας, Τμήμα Φυτικής Παραγωγής, Α.Τ.Ε.Ι Ηρακλείου, 58 σελ.
- Σιέμος, Ν και Μιχαλακάκης, Ι., 2009. *Αξιολόγηση υδατικών πόρων Αττικής και Νήσων Αργοσαρωνικού, Στρατηγικά αποθέματα, (Υ.Δ. 06, τμ. 03) - Μετρήσεις υπαίθρου (Υδρολογικές - Φυσικοχημικές)*. Ι.Γ.Μ.Ε., Αθήνα, 253 σελ.
- Σιέμος, Ν, 2002. *Υδατικά αποθέματα και ποιότητα υπόγειου υδατικού δυναμικού περιφέρειας Αττικής*. Ι.Γ.Μ.Ε., Αθήνα.

ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΣΤΗ ΛΕΚΑΝΗ ΚΟΡΩΝΕΙΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ

Παναγιώτα Γκινίδη¹, Χρήστος Τζιμόπουλος¹, Σταύρος Γιαννόπουλος¹

¹Εργαστήριο Υδραυλικών Έργων και Διαχείρισης Περιβάλλοντος,
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 54124 Ελλάδα, giotgin@yahoo.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η συμπεριφορά και η διαχείριση του υδροφορέα της υπολεκάνης Κορώνειας. Η διαδικασία της προσομοίωσης του υδροφορέα και η εύρεση του υδατικού ισοζυγίου πραγματοποιήθηκαν με τη βοήθεια του μοντέλου Modflow της Γεωλογικής Υπηρεσίας των Ηνωμένων Πολιτειών (U.S.G.S.). Ο στόχος της παρούσας εργασίας εστιάστηκε στον καθορισμό της βέλτιστης παροχής σε ορισμένες από τις γεωτρήσεις που υφίστανται στην περιοχή, καθώς επίσης και στην επίτευξη της κατάλληλης πιεζομετρίας σε αυτές, έτσι ώστε να μην εξαντλείται ο υδροφορέας, με το μικρότερο δυνατό κόστος. Η έρευνα αυτή της βέλτιστης διαχείρισης του υδροφορέα επιτεύχθηκε με τη μέθοδο Simplex του γραμμικού προγραμματισμού: α) για συμβατικούς αριθμούς και β) για την περίπτωση ασαφών αριθμών. Η ασαφής λογική χρησιμοποιήθηκε, γιατί τα δεδομένα παρουσιάζουν αβεβαιότητες.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: περιορισμένος υδροφορέας, μοντέλα προσομοίωσης, γραμμικός προγραμματισμός, διαχείριση και βελτιστοποίηση.

WATER RESOURCES MANAGEMENT IN THE WATERSHED KORONIA USING LINEAR PROGRAMMING

Panagiota Gkinidi¹, Christos Tzimopoulos¹, Stavros Yannopoulos¹

¹Laboratory of Hydraulics and Environmental Management,
Aristotle University of Thessaloniki, 54124 Greece, giotgin@yahoo.gr

ABSTRACT

A linear programming model is applied to the management of Koronia aquifer. The process of simulation of the aquifer and the water mass balance has been carried out using the Modflow model of the of the United States Geological Service (U.S.G.S.). Our principal aim was the determination of the best supplying mode in some of the existing wells in the area, insuring the appropriate hydraulic heads in them, with the lowest possible cost. The optimal management of the aquifer has been carried out using the Simplex method for solving this linear programming problem for crisp and fuzzy numbers. Fuzziness was introduced because of uncertainties of the data.

KEY WORDS: confined aquifer, simulation models, linear programming, management and optimization.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το νερό αποτελεί αναντικατάστατο αγαθό για τον άνθρωπο, για τον πολιτισμό του, για την ίδια του τη ζωή. Η παρέμβαση όμως του ανθρώπου, η αύξηση του πληθυσμού της Γης, η αλλαγή των συνηθειών διαβίωσης και η τεχνολογική ανάπτυξη, σε συνδυασμό με το γεγονός της δεδομένης διαθέσιμης ποσότητας νερού, δημιουργούν δύο αντιφατικές τάσεις δηλαδή τη συνεχή μείωση των κατά κεφαλή διαθέσιμων υδατικών πόρων και τη διαρκή αύξηση των κατά κεφαλή απαιτήσεων. Σημαντικό ρόλο στην εκμετάλλευση του υδάτινου πλούτου των υπόγειων υδροφορέων διαδραματίζει η σωστή διαχείρισή τους. Η διαμόρφωση και επίλυση των προβλημάτων διαχείρισης στηρίζεται στην εφαρμογή ενός σύνθετου μοντέλου προσομοίωσης – διαχείρισης-βελτιστοποίησης. Προς αυτήν την κατεύθυνση έχει εστιαστεί η παρούσα έρευνα με τη βοήθεια της χρήσης ολοκληρωμένων μοντέλων βέλτιστης διαχείρισης του υπόγειου νερού για δύο περιπτώσεις: α) για συμβατικούς αριθμούς και β) για την περίπτωση ασαφών αριθμών. Η ασαφής λογική χρησιμοποιήθηκε, γιατί τα δεδομένα παρουσιάζουν αβεβαιότητες.

Τα ασαφή σύνολα και η ασαφής λογική είναι μία πρόσφατα εξελισσόμενη περιοχή των Μαθηματικών που ερμηνεύει περιπτώσεις αβεβαιότητας, της οποίας η ανάπτυξη είχε σαν αφηρητά τη θεωρία ασαφών συνόλων του Zadeh (1965). Βασική ιδιότητα των ασαφών συνόλων είναι τα μη επακριβώς ορισμένα όρια των συνόλων, δηλαδή η ασαφής λογική δέχεται τις ενδιάμεσες τιμές αλήθειας μεταξύ 0 και 1 για μία λογική πρόταση. Η ασαφής λογική (πλειονότιμη λογική) έχει γενικότερο πεδίο αντίληψης των πραγμάτων ως προς τη λογική του Αριστοτέλη, που δέχεται μόνο το αληθές ή το ψευδές (δίτιμη λογική), γιατί αυτή αποδέχεται και τις ενδιάμεσες καταστάσεις (Ross, 2004).

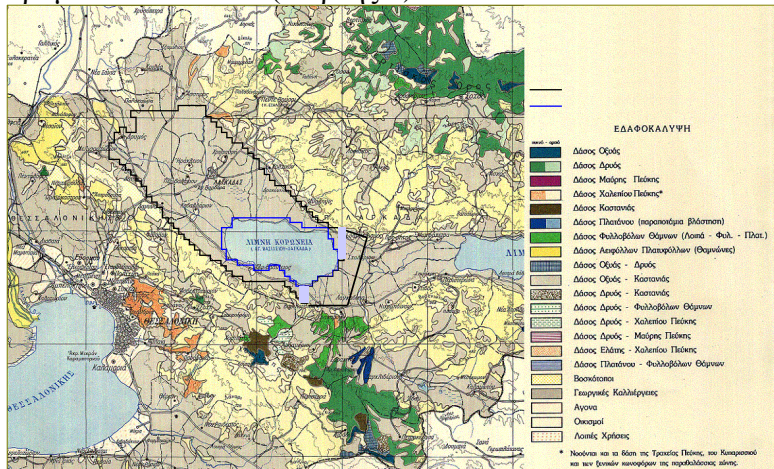
Το αντικείμενο της παρούσας έρευνας εστιάζεται στα ακόλουθα:

- Στη δημιουργία ενός μοντέλου προσομοίωσης του υδροφορέα της υπολεκάνης Κορώνειας με σκοπό την εκτίμηση του υδατικού ισοζυγίου της περιοχής μελέτης και τη διαχείρισή του. Το Modflow της Γεωλογικής υπηρεσίας των Ηνωμένων Πολιτειών (U.S.G.S.) αποτελεί το πιο εύχρηστο και διαδεδομένο τρισδιάστατο μοντέλο για την υπόγεια ροή (Chiang and Kinzelbach, 1993).
- Στη βέλτιστη διαχείριση του υδροφορέα, η οποία επιτεύχθηκε:
 1. Με τη μέθοδο βελτιστοποίησης Simplex του γραμμικού προγραμματισμού (Ψιλοβίκος, 1996, Γκινίδη, 2002). Ο σκοπός της διαχείρισης του υπόγειου ύδατος είναι ο καθορισμός της βέλτιστης παροχής σε ορισμένες από τις γεωτρήσεις που υφίστανται στην περιοχή, καθώς επίσης και η επίτευξη της κατάλληλης πιεζομετρίας σε αυτές, έτσι ώστε να μην εξαντλείται ο υδροφορέας, με το μικρότερο δυνατό κόστος.
 2. Με τη βοήθεια του ασαφούς γραμμικού προγραμματισμού (Zimmerman, 1996), όπου εξετάζεται η συμπεριφορά του υδροφορέα σε προβλήματα διαχείρισής του υπό καθεστώς αβεβαιότητας. Η αβεβαιότητα αυτή αφορά κύρια: α) τη μέτρηση των υδροδυναμικών παραμέτρων (αγωγιμότητα K , αποθηκευτικότητα S , διοχετευτικότητα T), β) τη μέτρηση του πιεζομετρικού φορτίου h και γ) τα όρια ή την έκταση του υδροφορέα. Στο κλασικό μοντέλο του ασαφούς γραμμικού προγραμματισμού θεωρείται ότι ο λήπτης της απόφασης ορίζει ένα επίπεδο προσδοκίας « z_0 », για την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης και ότι καθέναν από τους περιορισμούς αποτελούν ασαφή σύνολα, (Zimmerman, 1996) Για την εύρεση της βέλτιστης λύσης γίνονται δεκτές ανεκτές παραβιάσεις p_i των περιορισμών και της αντικειμενικής συνάρτησης.

2. Η ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

2.1 ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΘΕΣΗ

Στην Κεντρική Μακεδονία, στην Β.Α. πλευρά της πόλης της Θεσσαλονίκης, απλώνεται η υδρολογική λεκάνη της Μυγδονίας, που κατέχει μια επιμήκη ζώνη μεταξύ του Γαλλικού ποταμού και του Στρυμονικού κόλπου (Χάρτης 1).



Χάρτης 1. Η ευρύτερη περιοχή μελέτης

Η λίμνη Κορώνεια βρίσκεται σε απόσταση περίπου 12 km ανατολικά –βορειοανατολικά από την πόλη της Θεσσαλονίκης. Είναι λίμνη γλυκού νερού και έχει σχήμα ελλειψοειδές. Το θέμα της παρούσας έρευνας εστιάζεται στην διαχείριση του υδροφορέα της λίμνης Κορώνειας και σχετίζεται με την πρόσφατα μεγάλη πτώση της στάθμης της. Το αρνητικό υδατικό ισοζύγιο που έχει καταγραφεί τα τελευταία χρόνια (Knight et al, 1998, Τζιμόπουλος, 2004) οφείλεται κυρίως στην κακή διαχείριση του υδατικού δυναμικού και στην υπερκατανάλωση αρδευτικού νερού.

2.2 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ

Ο υδροφορέας που μελετάται βρίσκεται εν μέρει κάτω από τη λίμνη Κορώνεια και καταλαμβάνει μια έκταση περίπου 232 km². Το Ι.Γ.Μ.Ε. (Βεράνης και Κατιρτζόγλου, 2001a, b) θεωρεί ότι ο πυθμένας της λίμνης είναι αδιαπέρατος και κατά συνέπεια δεν υπάρχει επικοινωνία μεταξύ λίμνης και υπογείων υδροφορέων. Ο υδροφορέας αυτός τροφοδοτείται από την υδρολογική υπολεκάνη Κορώνειας που έχει έκταση 746 km².

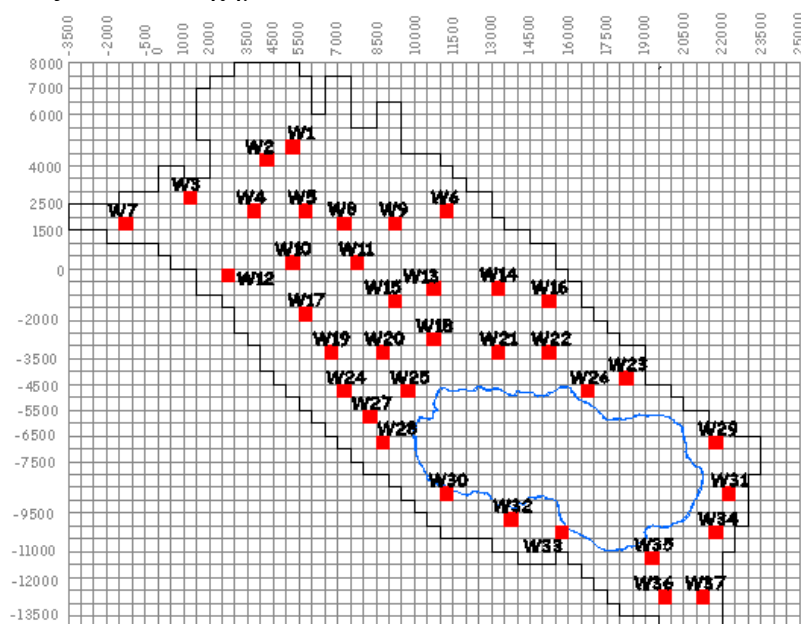
Τα ακριβή όρια του υδροφορέα προσδιορίστηκαν με βάση στοιχεία που λήφθηκαν από το Ι.Γ.Μ.Ε. (Χάρτης 1). Τα δεδομένα των γεωτρήσεων για την παρούσα μελέτη λήφθηκαν από το χάρτη 5 της μελέτης της Β.Ρ.Γ.Μ. ‘Γεωλογικές Τομές’ (Β.Ρ.Γ.Μ., 1972) και από τη μελέτη του Ι.Γ.Μ.Ε. Σύμφωνα με το Ι.Γ.Μ.Ε., οι τιμές της διοχετευτικότητας T κυμαίνονταν από $3.16 \cdot 10^{-4} \sim 9.7 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ και οι τιμές της αποθηκευτικότητας S από $2.84 \cdot 10^{-4} \sim 4.53 \cdot 10^{-3}$ και ο υδροφορέας χαρακτηρίζεται ως ανομοιογενής. Έτσι, η θέση των παραπάνω γεωτρήσεων και η τοποθέτησή τους στο μοντέλο αποσκοπεί μόνο στον υπολογισμό των υδραυλικών παραμέτρων. Ο πυθμένας του υδροφορέα, λήφθηκε από το σχέδιο 4 ‘ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΤΟΜΕΣ’ της μελέτης της Β.Ρ.Γ.Μ. (Β.Ρ.Γ.Μ., 1972) και χρησιμοποιήθηκαν οι υπάρχουσες τομές που υπάρχουν στο σχέδιο 4. Το πάχος b του υδροφορέα της περιοχής, καθώς επίσης και η αρχική πιεζομετρία για το έτος μελέτης του φαινομένου ‘1997’ είναι γνωστά με βάση τα στοιχεία του Ι.Γ.Μ.Ε. Για την ανάγκη

της έρευνας και την εισαγωγή των δεδομένων στον υδροφορέα, η περιοχή διαιρέθηκε σε 1024 κελιά διαστάσεων (500 m)x(500 m).

2.3 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΚΡΟΩΝ

Η κύρια κατανάλωση νερού στην περιοχή της Κορώνειας οφείλεται στη Γεωργία. Για την εύρεση της ποσότητας του αντλούμενου νερού, τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονται από έρευνα που έγινε από το ΕΘΙΑΓΕ (ΕΘΙΑΓΕ, 2003). Σύμφωνα με την έρευνα αυτή, η περιοχή της υπολεκάνης Κορώνειας έχει διαιρεθεί σε δημοτικά διαμερίσματα και για το καθένα από αυτά διατίθενται δεδομένα για τις καλλιέργειες που υφίστανται στην περιοχή, την έκταση την οποία καταλαμβάνουν, καθώς επίσης και τη ποσότητα νερού που απαιτείται για την κάθε καλλιέργεια. Για την εισαγωγή των στοιχείων αυτών στο μοντέλο, θεωρήθηκε ότι κάθε κελί αντιπροσωπεύει και μια ξεχωριστή, ιδεατή γεώτρηση.

Σημειώνεται ότι το πλήθος των γεωτρήσεων είναι αρκετά μεγάλο με αποτέλεσμα να μη μπορεί να καταστεί εύκολη η διαχείριση τους με βάση τα υφιστάμενα λογισμικά προγράμματα. Για την απλούστευση του μοντέλου, οι γεωτρήσεις που τοποθετούνται σε γειτονικά κελιά ομαδοποιούνται σε ένα μόνο κελί, όπου η ποσότητα του νερού που αντλείται στις τελικές θέσεις προέρχεται από το άθροισμα όλων των αντίστοιχων αντλήσεων που προέρχονται από την ίδια ομάδα. Μετά από τους κατάλληλους ελέγχους πιεζομετριών που έγιναν και (ρύθμιση) του μοντέλου, ο τελικός αριθμός των γεωτρήσεων ελήφθη ίσος με 37 (W_1, W_2, \dots, W_{37}), ενώ οι θέσεις τους απεικονίζονται στο Σχήμα 1.



Σχήμα 1. Κατανομή των γεωτρήσεων στον υδροφορέα Κορώνειας μετά την ομαδοποίηση

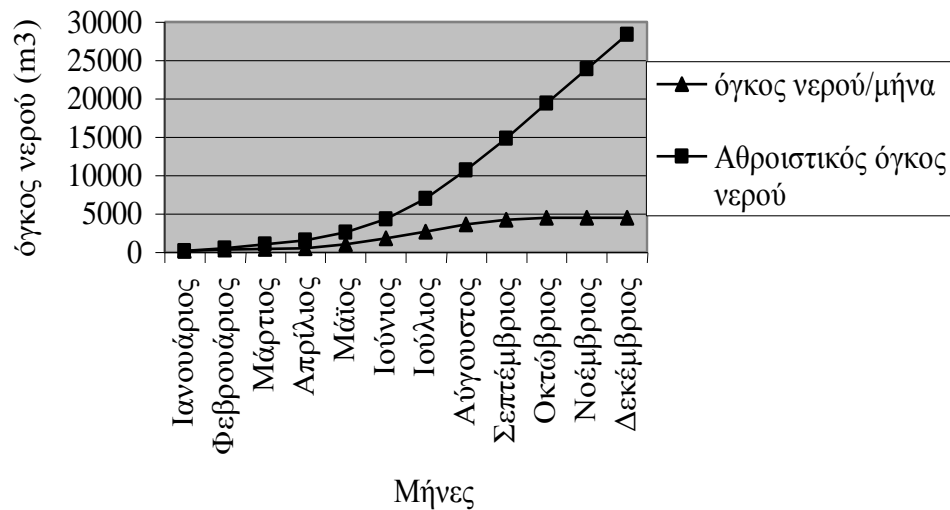
2.4 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΙΣΡΟΩΝ

Οι εισροές στον υδροφορέα προέκυψαν από τα δεδομένα των βροχοπτώσεων, τα οποία έχουν καταγραφεί από διάφορους μετεωρολογικούς σταθμούς και παρουσιάστηκαν στο ερευνητικό πρόγραμμα της Κορώνειας (Τζιμόπουλος, 2004).

3. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ

Για την προσομοίωση της κίνησης του νερού στον υδροφορέα εφαρμόστηκε το μαθηματικό μοντέλο Modflow. Για την επίλυση του προβλήματος εφαρμόστηκε η μέθοδος της υπερχαλάρωσης SSQR (Slice-Successive Overrelaxation) (Greenwald, 1994), στην οποία ορίζονται ο αριθμός των επαναλήψεων, ο συντελεστής επιτάχυνσης και το κριτήριο σύγκλισης.

Από τα αποτελέσματα του μοντέλου προσομοίωσης διαπιστώνεται μια μέση πτώση στάθμης του υπόγειου υδροφορέα για το έτος της μελέτης του φαινομένου, που είναι το 1997, ίση με 1.42 m, που συμφωνεί ικανοποιητικά με αυτή του Ι.Γ.Μ.Ε. Ο αντλούμενος όγκος νερού υπολογίστηκε περίπου σε 70 030 400 m³, όσος δηλαδή δίνεται και από τα δεδομένα του ΕΘΙΑΓΕ (2003), (Σχήμα 2).



Σχήμα 2. Όγκοι νερού (m³) για κάθε μήνα ανά κελί και αθροιστικός όγκος νερού (m³) ανά κελί από την αρχή του έτους

4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΟΥ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ ΣΤΟΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΤΗΣ ΛΙΜΝΗΣ ΚΟΡΩΝΕΙΑΣ

4.1. ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ

Η βέλτιστη λύση προκύπτει από την ελαχιστοποίηση ή μεγιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης, που είναι συνάρτηση των συντελεστών κόστους C και των παροχών Q , η οποία παίρνει τη μορφή:

$$\max f(x) = \sum_{i=1}^{i=37} C_i Q_i^k = C_1 Q_1^k + \dots + C_{37} Q_{37}^k \quad (4.1)$$

όπου

i είναι το διαχειριζόμενο πηγάδι, $i = 1, 2, \dots, 37$,

k είναι η χρονική περίοδος, $k = 1, 2, \dots, 12$.

Σημείωση: Οι παροχές θεωρήθηκαν αρνητικές και επομένως η ελαχιστοποίηση του ολικού κόστους αντιστοιχεί ουσιαστικά σε μεγιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης.

4.2. ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ

Οι περιορισμοί που τίθενται είναι περιορισμοί παροχών και διατυπώνονται ως εξής:

$$Q_i^k \leq Q_j^k \quad (4.2)$$

$$\sum_{i=1}^{i=37} Q_i^k \leq \sum_{j=1}^{j=37} Q_j^k \quad (4.3)$$

$$Q_i^k \geq 0 \quad (4.4)$$

όπου Q_j^k και Q_i^k είναι αντίστοιχα η αρχική και η βελτιστοποιημένη τιμή της παροχής της γεώτρησης i το μήνα k .

5. ΑΣΑΦΗΣ ΓΡΑΜΜΙΚΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ

5.1. ΣΥΜΜΕΤΡΙΚΟΣ ΑΣΑΦΗΣ ΓΡΑΜΜΙΚΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ

Στο κλασσικό μοντέλο υποτίθεται ότι ο λήπτης της απόφασης θέτει ένα επίπεδο προσδοκίας (ή φιλοδοξίας) « z_0 », για την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης και ότι καθένας από τους περιορισμούς αποτελούν ασαφή σύνολα. Ο ασαφής γραμμικός προγραμματισμός ορίζεται ως εξής (Zimmerman, 1996):

Να βρεθεί η τιμή του x έτσι ώστε ισχύει:

$$\begin{aligned} \vec{c} \vec{x} &\underset{\sim}{\geq} z_0 \\ A \vec{x} &\underset{\sim}{\leq} \vec{b} \\ \vec{x} &\underset{\sim}{\geq} 0 \end{aligned} \quad (5.1)$$

όπου ο παράγοντας z_0 καλείται επίπεδο προσδοκίας, δηλαδή εκείνο το επίπεδο που πρέπει να προσεγγιστεί κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης. Το σύμβολο $\underset{\sim}{\leq}$ εκφράζει την ασαφή εκδοχή του \leq και έχει την γλωσσολογική ερμηνεία «στοιχειωδώς μικρότερο ή ίσο προς», και αντίστοιχα το $\underset{\sim}{\geq}$ έχει την γλωσσολογική ερμηνεία «στοιχειωδώς μεγαλύτερο ή ίσο προς».

Διαπιστώνεται ότι το ασαφές μοντέλο του γραμμικού προγραμματισμού (5.1) είναι εντελώς συμμετρικό ως προς την αντικειμενική συνάρτηση και τους περιορισμούς. Η συμμετρία αυτή

επιτρέπει την δημιουργία των γενικευμένων μητρώων $\begin{pmatrix} -\vec{c} \\ A \end{pmatrix} = B$ και $\begin{pmatrix} -\vec{z}_0 \\ \vec{b} \end{pmatrix} = \vec{d}$, οπότε το

μοντέλο λαμβάνει την ακόλουθη μορφή:

Να βρεθεί το διάνυσμα \vec{x} , έτσι ώστε:

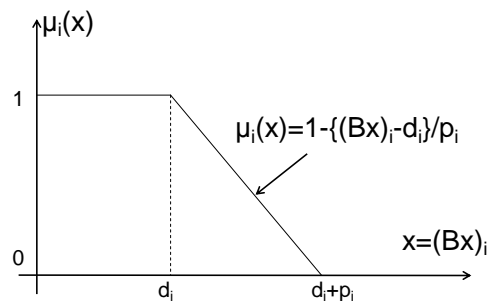
$$\begin{aligned} B \vec{x} &\underset{\sim}{\leq} \vec{d} \\ \vec{x} &\underset{\sim}{\geq} 0 \end{aligned} \quad (5.2)$$

Εισάγεται τώρα η συνάρτηση συμμετοχής του διανύσματος $B \cdot \vec{x}$, $\mu_i(B \cdot \vec{x})$, η οποία αντιστοιχεί στον i περιορισμό, και γίνονται δεκτές ανεκτές παραβιάσεις p_i των ορίων b_i των περιορισμών (δεξιό μέλος της ανισότητας), οπότε η συνάρτηση συμμετοχής για την περίπτωση των ανισοτήτων της μορφής $(B \cdot \vec{x})_i \leq d_i$ διαμορφώνεται ως εξής:

Η $\mu_i(B \cdot \vec{x})$ είναι ίση με 0, αν οι περιορισμοί και η αντικειμενική συνάρτηση είναι ισχυρά παραβιασμένοι. Αντιθέτως, όταν ικανοποιούνται σε μεγάλο βαθμό, η συνάρτηση συμμετοχής ισούται με τη μονάδα. Τέλος, η $\mu_i(B \cdot \vec{x})$ αυξάνεται μονότονα από 0 σε 1.

$$\mu_i(B \cdot \vec{x}) = \begin{cases} 1 & \text{αν } (B \cdot \vec{x})_i \leq d_i \\ 1 - \frac{(B \cdot \vec{x})_i - d_i}{p_i} & \text{αν } d_i < (B \cdot \vec{x})_i \leq d_i + p_i \quad i = 1, \dots, m+1 \\ 0 & \text{αν } (B \cdot \vec{x})_i > d_i + p_i \end{cases} \quad (5.3)$$

Ως συνάρτηση συμμετοχής επιλέγεται η γραμμική συνάρτηση του Σχήματος 3, και οι μέγιστες ανεκτές παραβιάσεις είναι p_i δηλαδή $d_i \leq (B \cdot \vec{x})_i \leq d_i + p_i$:



Σχήμα 3. Η συνάρτηση συμμετοχής

Οι παράγοντες p_i είναι υποκειμενικά, από τον εκάστοτε χρήστη, επιλεγμένες σταθερές των επιτρεπόμενων αποκλίσεων των περιορισμών και της αντικειμενικής συνάρτησης. Εφαρμόζοντας τη βέλτιστη απόφαση, ή απόφαση μεγιστοποίησης (Belman and Zadeh, 1970), προκύπτει ως ακολούθως:

$$\max_{x \geq 0} \min_i \mu_i = \max_{x \geq 0} \min_i \left(1 - \frac{(B \cdot \vec{x})_i - d_i}{p_i} \right) \quad (5.4)$$

Εισάγοντας μια νέα μεταβλητή $\lambda = \min_i \mu_i$ το πρόβλημα διαμορφώνεται πλέον ως εξής:

$$\text{Max } \lambda$$

$$\text{έτσι ώστε: } \lambda \leq 1 - \frac{(\vec{B} \vec{x})_i - d_i}{p_i}$$

ή

$$\lambda p_i + (\vec{B} \vec{x})_i \leq d_i + p_i \quad i = 1, \dots, m+1$$

$$x \geq 0$$

(5.5)

Το πρόβλημα, τώρα, μπορεί να διαμορφωθεί ως εξής:

Max λ

s.t.

$$\lambda + \frac{(\vec{B} \vec{x})_i}{p_i} \leq \frac{d_i + p_i}{p_i} \Rightarrow \lambda + \frac{b_{i1}x_1 + b_{i2}x_2 + b_{i3}x_3 + \dots + b_{in}x_n}{p_i} \leq \frac{d_i + p_i}{p_i}$$

$$x_j \geq 0, \quad i = 1, \dots, m+1, \quad j = 1, \dots, n$$

(5.6)

Για την περίπτωση των ανισοτήτων της μορφής $\vec{B} \vec{x} \geq d_i$, οι μέγιστες ανεκτές παραβιάσεις είναι p_i , δηλαδή $d_i - p_i \leq (\vec{B} \vec{x})_i \leq d_i$ και το πρόβλημα διαμορφώνεται με ανάλογο τρόπο.

Τελικά για τους περιορισμούς της μορφής: $(\vec{B} \vec{x})_i \geq d_i \quad i = 1, \dots, m+1$ το πρόβλημα διαμορφώνεται τελικά ως εξής:

Max λ

s.t.

$$\frac{b_{i1}x_1 + b_{i2}x_2 + b_{i3}x_3 + \dots + b_{in}x_n}{p_i} - \lambda \geq \frac{d_i}{p_i} - 1$$

$$x_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, m+1, \quad j = 1, \dots, n$$

(5.7)

5.1.1. Εφαρμογή με την κλασική μέθοδο του ασαφούς γραμμικού προγραμματισμού

Για την εύρεση της βέλτιστης κατανομής των παροχών άρδευσης και του ελάχιστου κόστους με τη βοήθεια του ασαφούς γραμμικού προγραμματισμού γίνεται χρήση των εξισώσεων (5.1), (5.6) και (5.7). Στην περίπτωση αυτή ορίζεται ένα επίπεδο προσδοκίας z_0 για την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, το οποίο είναι μικρότερο από τη βέλτιστη λύση αλλά προσδοκούμενο, σύμφωνα με την εξίσωση (5.1).

Για την εισαγωγή της ασάφειας, θεωρείται ως αποδεκτός βαθμός παραβίασης ή διάστημα ανοχής p_i , μια τιμή που αφήνεται κάθε φορά σύμφωνα με τον Zimmerman (1996) στην υποκειμενική κρίση του χρήστη. Σημειώνεται ότι στη βιβλιογραφία δεν εντοπίστηκαν ανάλογοι κανόνες προσδιορισμού του p_i . Στην παρούσα εργασία εξετάζονται οι περιπτώσεις όπου η αντικειμενική συνάρτηση παραβιάζεται κατά ποσοστό $p_1=15\%$, 10% , 5% , 2.5% και 1% , οι περιορισμοί παροχών p_{2-39} κατά τα ίδια ποσοστά και εξετάζονται όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί p_1 και p_{2-39} . Με αυτό τον τρόπο δημιουργούνται 25 διαφορετικοί συνδυασμοί και διερευνάται η επίδραση της εκάστοτε παραβίασης στο τελικό αποτέλεσμα. Ως παραβίαση της αντικειμενικής

συνάρτησης και των περιορισμών σε προβλήματα ασαφών αριθμών θεωρούνται οι αποκλίσεις των ανωτέρω από τις συμβατικές λύσεις.

5.1.2. Αποτελέσματα του γραμμικού προγραμματισμού για συμβατικούς και ασαφείς αριθμούς.

Οι μεγαλύτερες διακυμάνσεις των παροχών όσον αφορά τον ασαφή γραμμικό προγραμματισμό παρατηρούνται στις γεωτρήσεις W_3 , W_{16} , W_{28} , W_{29} , W_{32} , W_{33} , W_{34} , W_{35} , και W_{36} . Οι παροχές όμως των γεωτρήσεων W_3 και W_{16} που προέκυψαν μετά τη βελτιστοποίηση του υδροφορέα με τη μέθοδο του γραμμικού προγραμματισμού για συμβατικούς αριθμούς λαμβάνουν μηδενικές τιμές, ενώ στον ασαφή προγραμματισμό λαμβάνουν μηδενικές τιμές μόνο όταν η αντικειμενική συνάρτηση παραβιάζεται κατά 1%, 2.5% και 5%. Επίσης η παροχή της γεώτρησης W_{15} μόνο στην περίπτωση των συμβατικών αριθμών λαμβάνει μηδενική τιμή. Οι γεωτρήσεις W_{30} , W_{31} , W_{32} , W_{33} , W_{34} , W_{35} , W_{36} και W_{37} τίθενται εκτός λειτουργίας όταν οι περιορισμοί παραβιάζονται κατά 10% και 15%, ενώ οι W_{32} , W_{33} παύουν να λειτουργούν και στην περίπτωση της παραβίασης των περιορισμών κατά 5%. Η μεταβλητή λ λαμβάνει μηδενική τιμή στην περίπτωση που οι περιορισμοί παραβιάζονται κατά $p_{2-39}=1\%$, $p_{2-39}=2.5\%$ και η αντικειμενική συνάρτηση κατά $p_1=1\%$, $p_1=2.5\%$, ενώ η μεγαλύτερη τιμή προκύπτει, όταν $p_1=15\%$, $p_{2-39}=1\%$.

Στον Πίνακα 1 δίνονται αναλυτικά τα ποσοστά του συνόλου των παροχών και του κόστους της αντικειμενικής συνάρτησης για όλους τους συνδυασμούς παραβιάσεων. Αναλυτικά, παρατηρείται ότι στην περίπτωση του ασαφούς γραμμικού προγραμματισμού η ποσοστιαία μείωση του άθροισματος των παροχών ακολουθεί την αντίστοιχη παραβίαση που έχει εφαρμοστεί, ενώ η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, που αντιπροσωπεύει το κόστος λειτουργίας του αντλιοστασίου, αυξάνεται σε σχέση με τη βέλτιστη λύση του γραμμικού προγραμματισμού (LP) όταν παραβιάζεται κατά 15%, 10% και μειώνεται για τα υπόλοιπα ποσοστά. Όταν οι περιορισμοί παραβιάζονται κατά 1%, το άθροισμα των παροχών μειώνεται κατά 0.6% με ταυτόχρονη παραβίαση της αντικειμενικής συνάρτησης κατά 15% και 10%. Με τον ίδιο τρόπο παρατηρείται μείωση κατά 1.22% για αντίστοιχη παραβίαση της αντικειμενικής συνάρτησης κατά 5%, ενώ όταν η αντικειμενική συνάρτηση παραβιάζεται κατά 1% και 2.5%, η μεταβολή στο άθροισμα των παροχών κυμαίνεται από 2.8%-3.8% αντίστοιχα. Για την παραβίαση των περιορισμών κατά 2.5%, παρατηρείται μια μείωση στο άθροισμα των παροχών που κυμαίνεται από 1.76%-3.63%. Για παραβίαση των περιορισμών κατά 5%, παρατηρείται μείωση από 3.11%-4.97%, για 10% τα ποσοστά κυμαίνονται από 6.37%-9.78%, ενώ όταν η παραβίαση είναι 15%, το άθροισμα των παροχών μειώνεται κατά 12.41%, 13.85% και 14.84%.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΜΑΤΑ

Μελετώντας τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή των τριών παραπάνω μεθόδων, προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Από τον υπολογισμό του υδατικού ισοζυγίου στην περιοχή μελέτης διαπιστώθηκε ότι με τη μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε με την επικέντρωση των καλλιεργειών στο κέντρο του κάθε κελιού με τη μορφή θεωρητικών γεωτρήσεων, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ανταποκρίνονται αρκετά καλά στις πραγματικές διαστάσεις του προβλήματος. Το γεγονός αυτό προκύπτει αφενός από τη μέση πτώση στάθμης του πιεζομετρικού φορτίου που είναι 1.42 m και δεν έχει μεγάλη διαφορά με την αντίστοιχη πτώση που υπολογίστηκε από το Ι.Γ.Μ.Ε. (Βεράνης και Κατιρτζόγλου, 2001a, b) για το έτος 1997 (1.48 m) αφετέρου ο αντλούμενος όγκος αρδευτικού

νερού είναι ίσος με $70\,000\,000\text{ m}^3$, δηλαδή όσο περίπου δίνει και το ΕΘΙΑΓΕ για την ίδια χρονική περίοδο. Σημειώνεται ότι η ανόρυξη πολλών γεωτρήσεων γύρω από τη λίμνη Κορώνεια, οδηγεί στη συνεχώς μεγαλύτερη υποβάθμιση του υπόγειου υδροφορέα, εξαντλώντας και τα λιγοστά αποθέματα τα οποία έχει. Το νερό λοιπόν των βροχοπτώσεων χρησιμοποιείται κυρίως για την επαναπλήρωση του υπόγειου υδροφορέα, δυσχεραίνοντας την απορροή του νερού στην επιφάνεια της λίμνης και οδηγώντας στην ολοένα και μεγαλύτερη αύξηση της πτώσης της στάθμης της.

- Από τα αποτελέσματα του γραμμικού προγραμματισμού για συμβατικούς αριθμούς προκύπτει ο μηδενισμός των παροχών στις γεωτρήσεις W_3 , W_{15} , W_{16} , W_{37} και η μείωση των παροχών των γεωτρήσεων W_{12} , W_{24} στο ένα τρίτο της αρχικής τους τιμής, σε σχέση με τις αρχικές παροχές των γεωτρήσεων που δόθηκαν ως ανώτερο επιτρεπόμενο όριο. Στις υπόλοιπες γεωτρήσεις δεν παρατηρείται καμιά επίδραση. Οι γεωτρήσεις των οποίων οι παροχές μεταβάλλονται βρίσκονται καλά κατανομημένες σε όλη την έκταση του υδροφορέα. Αντίθετα, μεγαλύτερες διακυμάνσεις στις παροχές των γεωτρήσεων παρατηρούνται κατά την εφαρμογή της μεθόδου της ασαφούς λογικής. Συγκεκριμένα, για τις γεωτρήσεις που είναι κυρίως τοποθετημένες στο νότιο τμήμα του υδροφορέα (W_{30} , W_{31} , W_{32} , W_{33} , W_{34} , W_{35} , W_{36} και W_{37}) προκύπτουν μηδενικές παροχές, ιδιαίτερα για παραβίαση της αντικειμενικής συνάρτησης κατά ποσοστό 10% και 15%, ενώ για τις υπόλοιπες οι παροχές αυξάνονται από $735\text{ m}^3/\text{d}$ - $18674\text{ m}^3/\text{d}$ σε σχέση με αυτές που προέκυψαν από το γραμμικό προγραμματισμό.

- Το παραπάνω συμπέρασμα προκύπτει και στην περίπτωση μελέτης των αποτελεσμάτων που δίνουν τη συνολική παροχή των γεωτρήσεων. Συγκεκριμένα, με την εφαρμογή των παραβιάσεων p_{2-39} στους περιορισμούς, το άθροισμα των παροχών στον ασαφή γραμμικό προγραμματισμό παρουσιάζεται μειωμένο σε σχέση με τον κλασσικό γραμμικό προγραμματισμό. Η μείωση αυτή ακολουθεί την εφαρμογή της αντίστοιχης παραβίασης κατά 1%, 2.5%, 5%, 10% και 15%, δηλαδή το τελικό αποτέλεσμα παρουσιάζεται μειωμένο κατά τα ποσοστά αυτά.

- Η βέλτιστη λύση του γραμμικού προγραμματισμού απέδωσε μια τιμή στην αντικειμενική συνάρτηση, η οποία αποτελεί και την ελάχιστη δυνατή και αντιπροσωπεύει το κόστος των αντλήσεων. Κατά την εφαρμογή της ασαφούς λογικής το κόστος της αντικειμενικής συνάρτησης διατηρείται μειωμένο συγκρινόμενο με το αποτέλεσμα του κλασσικού γραμμικού προγραμματισμού, όταν αυτή παραβιάζεται κατά 1%, 2.5% και 5%, ενώ παρουσιάζει μια αύξηση που κυμαίνεται από 0.03%-5.63% στις υπόλοιπες περιπτώσεις παραβίασης. Επίσης, στην ενότητα 5.1 θεωρήθηκε ότι ο λαμβάνων την απόφαση θέτει ένα επίπεδο προσδοκίας z_0 κοντά στη βέλτιστη λύση του γραμμικού προγραμματισμού για συμβατικούς αριθμούς, το οποίο επειδή στην παρούσα εφαρμογή εκφράζει κόστος, θα πρέπει να είναι μικρότερο από αυτή. Συμπεραίνεται, λοιπόν, ότι οι περιπτώσεις παραβιάσεων οδηγούν σε μείωση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης στην περίπτωση της εκδοχής του ασαφούς γραμμικού προγραμματισμού.

- Με βάση τα παραπάνω, η μέθοδος τελικά που επιλέγεται ως βέλτιστη εξαρτάται από τη φύση του προβλήματος. Έτσι, στην περίπτωση που ο λήπτης της απόφασης επιδιώκει τη διατήρηση της συνολικής παροχής νερού των γεωτρήσεων στα αρχικά επιτρεπόμενα όρια, ο κλασσικός γραμμικός προγραμματισμός εμφανίζει καλύτερα αποτελέσματα από την μέθοδο του ασαφούς γραμμικού προγραμματισμού. Στην περίπτωση που στόχος είναι η μείωση της συνολικής αντλούμενης ποσότητας νερού, η μέθοδος του ασαφούς γραμμικού προγραμματισμού δίνει καλύτερη βέλτιστη λύση. Η κατανομή των παροχών των γεωτρήσεων που υφίστανται μεταβολές εμφανίζεται καλύτερη στον γραμμικό προγραμματισμό για συμβατικούς αριθμούς.

Αυτό συμβαίνει, γιατί, αν και αρκετές από τις παροχές των γεωτρήσεων εμφανίζουν μηδενικές τιμές, οι γεωτρήσεις αυτές είναι κατανομημένες ομοιόμορφα σε όλη την έκταση του υδροφορέα, ώστε να καλύπτονται οι αρδευτικές ανάγκες της περιοχής.

- Σημειώνεται ότι οι μεθοδολογίες της ασαφούς λογικής επιτρέπουν παραβιάσεις της αντικειμενικής συνάρτησης και των περιορισμών είτε προς τα πάνω είτε προς τα κάτω, πράγμα που δεν είναι δυνατό να συμβεί κατά την εφαρμογή του γραμμικού προγραμματισμού για συμβατικούς αριθμούς. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει μεγαλύτερο φάσμα προτάσεων που μπορούν να καλύψουν τις ανάγκες του χρήστη στην περίπτωση που επιλέγονται οι μέθοδοι του ασαφούς γραμμικού προγραμματισμού.

Πίνακας 1. Διακύμανση του αθροίσματος των παροχών των γεωτρήσεων και του κόστους της αντικειμενικής συνάρτησης με την εφαρμογή των παραβιάσεων για ασαφείς αριθμούς σε σχέση με τους συμβατικούς αριθμούς

Παραβίαση περιορισμών	Παραβίαση αντικειμενικής συνάρτησης					Αντικειμενική συνάρτηση & περιορισμοί
	1%	2.5%	5%	10%	15%	
1%	Μείωση κατά 3.8%	Μείωση κατά 2.8%	Μείωση κατά 1.22%	Μείωση κατά 0.69%	Μείωση κατά 0.57%	Αθροισμα παροχών
	Μείωση κατά 5.63%	Μείωση κατά 4.25%	Μείωση κατά 1.95%	Αύξηση κατά 0.95%	Αύξηση κατά 6.05%	Κόστος
2.5%	Μείωση κατά 3.63%	Μείωση κατά 2.66%	Μείωση κατά 2.26%	Μείωση κατά 1.76%	Μείωση κατά 1.83%	Αθροισμα παροχών
	Μείωση κατά 5.61%	Μείωση κατά 4.23%	Μείωση κατά 2.38%	Αύξηση κατά 3.47%	Αύξηση κατά 8.54%	Κόστος
5%	Μείωση κατά 4.7%	Μείωση κατά 4.97%	Μείωση κατά 3.72%	Μείωση κατά 3.90%	Μείωση κατά 3.11%	Αθροισμα παροχών
	Μείωση κατά 5.63%	Μείωση κατά 4.21%	Μείωση κατά 3.09%	Αύξηση κατά 5.71%	Αύξηση κατά 7.13%	Κόστος
10%	Μείωση κατά 9.78%	Μείωση κατά 7.86%	Μείωση κατά 8.79%	Μείωση κατά 6.85%	Μείωση κατά 6.37%	Αθροισμα παροχών
	Μείωση κατά 5.53%	Μείωση κατά 4.65%	Αύξηση κατά 1.19%	Αύξηση κατά 3.62%	Αύξηση κατά 5.94%	Κόστος
15%	Μείωση κατά 14.84 %	Μείωση κατά 13.85%	Μείωση κατά 12.41%	Μείωση κατά 12.41%	Μείωση κατά 12.41%	Αθροισμα παροχών
	Μείωση κατά 1.03%	Μείωση κατά 2.91%	Αύξηση κατά 0.73%	Αύξηση κατά 0.73%	Αύξηση κατά 0.70%	Κόστος

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Bellman R. and Zadeh L., 1970. Decision-making in a fuzzy environment. *Management Science*, Vol. 17, No 4, pages B-141-B-164.
- BRGM, 1972. Etude Hydrogeologique du Bassin de Mygdonia pour l'alimentation en eau de la Ville de Salonique, Greece, 72 RME 011 FE (O.Y.Θ.).
- Chiang W. H. and Kinzelbach W., 1993. Pre- and Postprocessors for Simulation of Flow And Contaminants Transport in Transport in Groundwater System with MODFLOW, MODPATH and MT3D Version 3.0 , 92 pp.
- Greenwald R.M., 1994. MODflow MANagement: An optimization Module for Modflow. Interanational Ground Water Modeling Center, FOS 76 PS, Version 3.02, Institute of Groundwater Research and Education, Colorado School of Mines, Colorado.
- Knight Piesold and Karavokyris & Partners, Master Plan, 1998. Περιβαλλοντική αποκατάσταση της λίμνης Κορώνειας (2 τόμοι, Ταμείο Συνοχής, Ευρωπαϊκή Επιτροπή, Γεν. Διεύθ. XVII Περιφερειακή πολιτική και συνοχή).
- Ross T. J., 2004. Fuzzy logic with Engineering Applications, Wiley, pp. 628.
- Zadeh L. A., 1965. Fuzzy sets. *Information and control* 8(3): 338-353.
- Zimmermann H.J., 1996. Fuzzy set theory and its applications. *Decision Making in Fuzzy Environments*, Kluwer Academic Publishers, Boston, Chapter 13, pages 281-303.
- Βεράνης Ν. και Κατιρτζόγλου Κ., 2001a. Διερεύνηση των δυνατοτήτων εκμετάλλευσης του βαθύτερου υδροφορέα της υπολεκάνης Κορώνειας Νομού Θεσσαλονίκης. Θεσσαλονίκη, Ι.Γ.Μ.Ε., σελ. 37.
- Βεράνης Ν. και Κατιρτζόγλου Κ., 2001b. Υδρολογικό ισοζύγιο στην πεδινή περιοχή υπολεκάνης λίμνης Κορώνειας Ν. Θεσσαλονίκης. Θεσσαλονίκη, Ι.Γ.Μ.Ε., σελ. 36.
- Γκινίδη Παναγιώτα, 2002. Διαχείριση του υδροφορέα των πηγών Δράμας με εφαρμογή του Γραμμικού Προγραμματισμού. Μεταπτυχιακή Διατριβή, Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Α.Π.Θ., σελ. 298.
- ΕΘΙΑΓΕ-Ινστιτούτο Εδαφολογίας Θεσσαλονίκης, 2003. Λίμνη Κορώνεια - Δελτίο Τύπου, Θεσσαλονίκη.
- Τζιμόπουλος, Χ., 2004. Ερευνητικό έργο: Επιχειρησιακό σχέδιο αποκατάστασης της λίμνης Κορώνειας του Νομού Θεσσαλονίκης, Ν.Ε.Θ. (Κ.Ε. 21852), σελ. 103.
- Ψιλοβίκος Α., 1996. Βέλτιστη διαχείριση Υπόγειων Υδροφορέων με τη μέθοδο του Γραμμικού Προγραμματισμού. Εφαρμογή στον υδροφορέα Ειδομένης-Ευζώνων. Μεταπτυχιακή διατριβή, Μεταπτυχιακό Τμήμα Εγγείων Βελτιώσεων Γεωπονίας, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, σελ. 254.

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΤΗΣ ΟΡΕΙΝΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΜΕΣΟΒΟΥΝΟΥ

Φ. Μάρης, Π. Μαχτής, Α. Βασιλείου

Εργαστήριο Διευθέτησης Ορεινών Υδάτων και Διαχείρισης Κινδύνου,
Τμήμα Δασολογίας και Διαχείρισης Περιβάλλοντος και Φυσικών Πόρων,
Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, email: fmaris@fmenr.duth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία εκτιμήθηκε η τάση πρόσχωσης της λεκάνης απορροής του φράγματος Μεσόβουνου, με εφαρμογή του μοντέλου TopRunDF. Το μοντέλο αυτό, είναι βασισμένο σε Γ.Σ.Π. και αναπτύχθηκε για την πρόβλεψη του χώρου εναπόθεσης, καθώς και για την πρόβλεψη του ύψους εναπόθεσης των φερτών υλικών στον κώνο πρόσχωσης. Οι παράμετροι εισόδου του μοντέλου είναι ο όγκος των φερτών υλικών, ο συντελεστής κινητικότητας, το σημείο εκκίνησης της εναπόθεσης και το ψηφιακό μοντέλο εδάφους της περιοχής. Για τον υπολογισμό του όγκου της εδαφικής διάβρωσης χρησιμοποιήθηκε η Παγκόσμια Εξίσωση Εδαφικής Απώλειας (USLE) και η τροποποιημένη μέθοδος Gavrilovič. Επιπλέον, για τον καθορισμό των παραμέτρων προσομοίωσης, έγινε εκτεταμένη χρήση των Γ.Σ.Π. Συμπερασματικά, η λειτουργία του ταμιευτήρα δεν επηρεάζεται από τις τάσεις πρόσχωσης.

ESTIMATION OF THE MESOVOUNO DAM WATERSHED SEDIMENTATION TENDENCY

F. Maris, P. Machtis, A. Vasileiou

Lab of Mountainous Watersheds and Risk Management,
Department of Forestry and Management of the Environment and Natural
Resources,
Democritus University of Thrace, email: fmaris@fmenr.duth.gr

ABSTRACT

The present paper estimates the sedimentation tendency of the Mesovouno Dam watershed, applying of the TopRunDF model. The model is based on GIS, in order to predict the sedimentation area, as well the sediment deposition height in the sedimentation cone. The input parameters of the model are the volume of sediment, the mobility factor, the deposition starting point and the digital terrain model of the area. In order to calculate the volume of soil erosion, the Universal Soil Loss Equation (USLE) and the modified Gavrilovič method were used. Furthermore, an extensive use of GIS took place, in order to define the simulation parameters. In conclusion, the dam function is not affected by the sedimentation tendencies.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Μείζον πρόβλημα για τον άνθρωπο στη σύγχρονη εποχή αποτελεί η σωστή διαχείριση και η προστασία των υδάτινων και εδαφικών πόρων. Οι πλημμύρες που οφείλονται στην υπερχείλιση των χειμάρρων και των ποταμών και στις διαβρώσεις των εδαφών, προκαλούν τεράστιες ζημιές στα αστικά κέντρα, στις υποδομές (οδικά δίκτυα, δίκτυα μεταφοράς ενέργειας), στις καλλιέργειες και γενικά σε διάφορους τομείς της ανθρώπινης δραστηριότητας (Spartalis et al., 2005).

Η βροχόπτωση αποσπά το εδαφικό υλικό και το θέτει σε αιώρηση, με την προϋπόθεση ότι δημιουργείται ταυτόχρονα απορροή στην επιφάνεια του εδάφους. Κατά τη μεταφορά του διαλύματος νερού - φερτών υλικών, προκαλείται από τη δράση της απορροής, περαιτέρω διάβρωση της εδαφικής επιφάνειας (Τσακίρης, 1995).

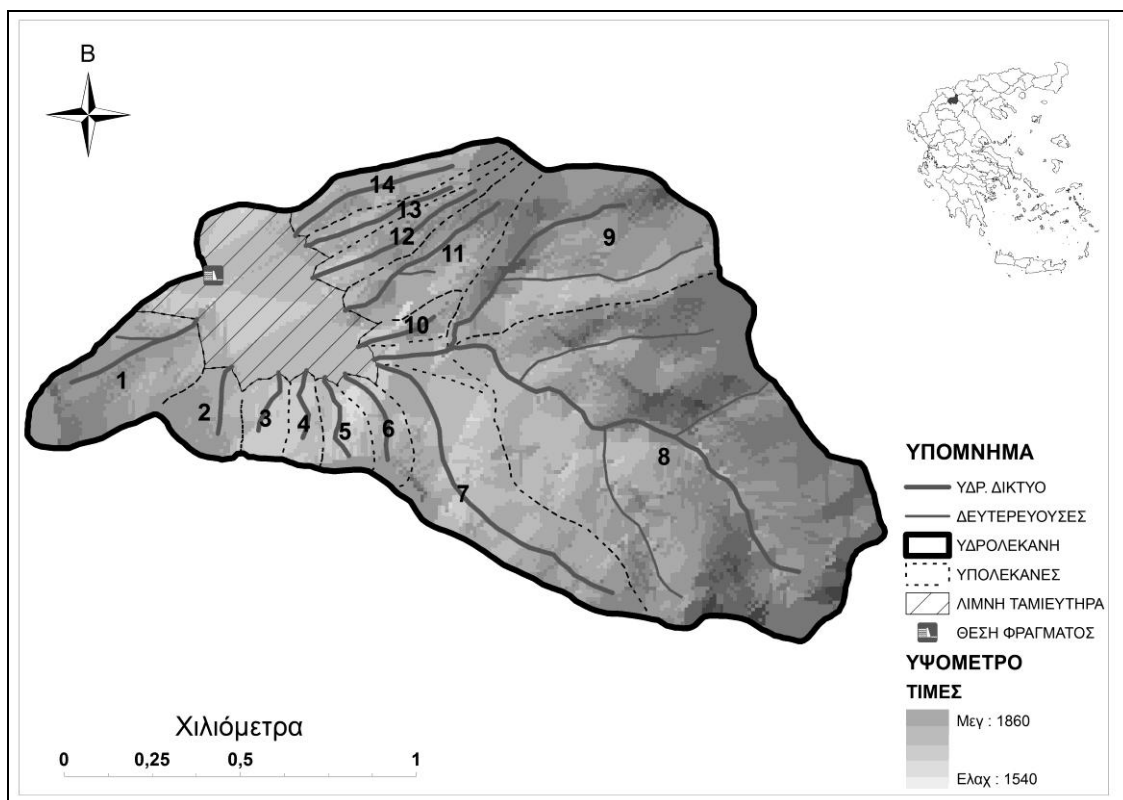
Σκοπός της παρούσης εργασίας, αρχικά, είναι να διερευνηθεί και να υπολογιστεί η εδαφική διάβρωση στην περιοχή μελέτης και στη συνέχεια να διερευνηθούν οι τάσεις πρόσχωσης του ταμιευτήρα Μεσόβουνου. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονιστεί ότι στην περιοχή μελέτης έχει κατασκευαστεί ταμιευτήρας, η λειτουργία του οποίου είναι πολύ σημαντική για την περιοχή. Τα νερά των ανάντη λεκανών απορροής του φράγματος και οι ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις που τροφοδοτούν τον ταμιευτήρα, θα χρησιμοποιούνται για την άρδευση, κατά τη διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών, των μηλεώνων της περιοχής, που εκτείνονται σε υψόμετρα σημαντικά χαμηλότερα από το φράγμα. Συγκεκριμένα, από τον ταμιευτήρα του φράγματος Μεσόβουνου μέχρι τη θέση της δεξαμενής αρδεύσεων, υπάρχει υψομετρική διαφορά της τάξης των 700 m, η οποία σε συνδυασμό με τον όγκο του νερού που θα ρέει κατ' έτος, θέτει τις βάσεις για τη δημιουργία μικρής υδροηλεκτρικής μονάδας.

Ο υπολογισμός της στερεοπαροχής είναι καθοριστικός, καθώς οι χείμαρροι των ορεινών περιοχών μεταφέρουν σημαντικές ποσότητες ογκωδών υλικών προς τα κατόντη, ιδίως κατά τη διάρκεια ισχυρών πλημμυρικών αιχμών, έχοντας ως αποτέλεσμα την ελαχιστοποίηση του ωφέλιμου όγκου του ταμιευτήρα (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999). Γι' αυτό κρίθηκε απαραίτητο να εφαρμοστούν μοντέλα υπολογισμού των τάσεων πρόσχωσης, ώστε να ελεγχθεί και να εξασφαλιστεί η ορθή και ομαλή λειτουργία του ταμιευτήρα.

2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΑΣ

Η περιοχή έρευνας βρίσκεται στο Νομό Κοζάνης, στην κοιλάδα του ρέματος Αγ. Ανάργυροι, στη θέση "Καλύβια Κονταλέξη", στη δυτική πλευρά του όρους Βέρμιο και σε απόσταση 5 km περίπου ανατολικά - νοτιοανατολικά του οικισμού του Μεσόβουνου, μεταξύ Πτολεμαΐδας και Νάουσας.

Στην περιοχή κατασκευάστηκε φράγμα από την "ΑΝΑΠΤΥΞΙΑΚΗ ΕΤΑΙΡΕΙΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ" (ΑΝ.ΚΟ.) Α.Ε. Μετά τη θέση του φράγματος, το ρέμα των Αγ. Αναργύρων ρέει με διεύθυνση νοτιοανατολική - βορειοδυτική και καταλήγει, διερχόμενο μέσα από τον οικισμό των Πύργων, στο ρέμα Κάστρο, βόρεια των Πύργων. Η περιοχή μελέτης δομείται από ανωκρητιδικούς ασβεστόλιθους και φλύσχη της Πελαγονικής Γεωτεκτονικής Ζώνης (Νταγκουνάκη κ. άλ., 2004). Η ευρύτερη περιοχή του έργου χωρίζεται γεωμορφολογικά σε δύο διακριτές ενότητες: αυτή της θέσης κατασκευής του φράγματος και δυτικά της, όπου το ανάγλυφο παρουσιάζει πολύ έντονες κλίσεις και γίνεται κατά θέσεις κρημνώδες, και αυτή ανατολικά του φράγματος, όπου το ανάγλυφο παρουσιάζεται λοφώδες με κλίσεις μικρότερες του 30%. Η λεκάνη κατάκλυσης χαρακτηρίζεται από χαμηλή θαμνώδη βλάστηση κατά θέσεις, ενώ στη θέση του φράγματος δεν υπάρχει, πρακτικά, βλάστηση. Στο παρακάτω Σχήμα 1 παρουσιάζεται η περιοχή μελέτης.



Σχήμα 1: Περιοχή έρευνας

3. ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

3.1. ΜΟΝΤΕΛΟ TopRunDF

Το μοντέλο TopRunDF είναι ένα διδιάστατο εργαλείο προσομοίωσης της εξάπλωσης των φερτών υλικών για την πρόβλεψη στις πλημμυρίζουσες περιοχές του κώνου πρόσχωσης. Είναι γραμμένο σε Visual Basic 6.0 και λειτουργεί ως ένα ενιαίο εκτελέσιμο πρόγραμμα χρησιμοποιώντας αντικείμενα ARC. Η παρουσία των τελευταίων καθιστά εφικτή την «επικοινωνία» του μοντέλου TopRunDF με τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών. Το TopRunDF είναι βασισμένο στην τοπογραφία του χειμαρρικού κώνου πρόσχωσης και συνδυάζει έναν αλγόριθμο διάδευσης απλής ροής (Hurlimann et al., 2008) με τη συσχέτιση όγκου-έκτασης. Τα δεδομένα εισόδου του μοντέλου είναι ο όγκος των φερτών υλικών, ο συντελεστής κινητικότητας (mobility coefficient), το σημείο εκκίνησης της εναπόθεσης και το ψηφιακό μοντέλο εδάφους της περιοχής. Τα αποτελέσματα εξόδου είναι η πρόβλεψη ζωνών απόθεσης, καθώς και το ύψος των αποθέσεων στις συγκεκριμένες περιοχές. Το κύριο πλεονέκτημα του μοντέλου είναι ότι δεν χρησιμοποιεί ιδιαίτερα απαιτητικά και χρονοβόρα δεδομένα. Αξιοσημείωτη είναι η ακρίβεια των αποτελεσμάτων (Vasileiou et al., 2011)

3.1.1 Όγκος φερτών υλικών

Η εκτίμηση της εδαφικής διάβρωσης έγινε με εμπειρικά μοντέλα και ειδικότερα σύμφωνα με την παγκόσμια εξίσωση της εδαφικής απώλειας (Universal Soil Loss Equation, U.S.L.E.) (Wischmeier and Smith, 1978), και με την τροποποιημένη μέθοδο Gavrilovič (Gavrilovič et al., 2006).

3.1.2 Παγκόσμια εξίσωση εδαφικής απώλειας

Η γενική εξίσωση υποβάθμισης του εδάφους στηρίζεται σε πολυετείς μετρήσεις της έντασης της διάβρωσης επί τυποποιημένων επιφανειών, που διεξήγαγαν οι Wischmeier και Smith σε διάφορες περιοχές των ΗΠΑ κατά την περίοδο 1930 -1952 (Wischmeier and Smith, 1978, Gavrilović et al., 2006). Στην παρούσα εργασία, για την εφαρμογή της μεθόδου σε εδάφη με διαφορετικές χρήσεις γης και με ισχυρότερη κλίση, έγινε χρήση τροποποιημένων παραμέτρων. Η USLE διατυπώνεται με την παρακάτω μορφή:

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot P \cdot C \quad (3.1)$$

όπου A είναι η υπολογισμένη ετήσια γενική διάβρωση (tons/ha), R (N/h) ο συντελεστής διαβρωτικότητας των κατακρημνισμάτων, K (th/haN) ο συντελεστής διαβρωσιμότητας του γεωλογικού υποθέματος, LS ο τοπογραφικός συντελεστής ή συντελεστής αναγλύφου, C ο συντελεστής φυτοκάλυψης, P ο συντελεστής χειρισμού και προστασίας του εδάφους.

Στη συνολική διάβρωση της λεκάνης απορροής προστίθεται επιπλέον η διάβρωση της κοίτης των χειμαρρικών ρευμάτων, η οποία εκτιμάται εμπειρικά ως ποσοστό 20% της επιφανειακής διάβρωσης (Χρυσάνθου, 1985, Maris et al., 2006).

Συντελεστής R

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω σχέση που αναπτύχθηκε στη Γερμανία και έχει χρησιμοποιηθεί και για ελληνικές συνθήκες (Χρυσάνθου και Πυλιώτης, 1995):

$$R=0,83 \cdot N-17,7 \quad (3.2)$$

όπου R (N/h) ο συντελεστής διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης και N (mm) η μέση ετήσια βροχόπτωση. Για τον υπολογισμό του παράγοντα N χρησιμοποιήθηκε το μέσο ετήσιο ύψος βροχής, που υπολογίστηκε με σταθμό βάσης το μετεωρολογικό σταθμό της Πτολεμαΐδας. Για την αναγωγή της σημειακής βροχόπτωσης σε επιφανειακή χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Krigging (Hevesi et al., 1992).

Συντελεστής K

Για τον υπολογισμό του συντελεστή K έγινε χρήση του υδρολιθικού χάρτη του Ι.Γ.Μ.Ε. 1:500 000. Αρχικά έλαβε χώρα η γεωδαίτησή του σε σύστημα συντεταγμένων ΕΓΣΑ 87 και στη συνέχεια έγινε ψηφιοποίησή του με χρήση του ArcGIS. Προέκυψε ότι στην περιοχή μελέτης απαντάται μόνο φλύσχης με τιμή $K=0,1$ th/haN (Παπαϊωάννου, 2008).

Συντελεστής LS

Για τον υπολογισμό του συντελεστή LS έγινε χρήση του προγράμματος ArcMap 9.3 και του παρακάτω τύπου (Ma, 2001):

$$LS = (\text{Flow Accumulation} \cdot \text{Cell Size} / 22,13)^{0,4} (\text{Sin Slope} / 0,0896)^{1,3} \quad (3.3)$$

Συντελεστής P

Στο συντελεστή P δόθηκε η τιμή 1 για όλες τις υπολεκάνες απορροής, καθώς δεν εντοπίστηκε κανένα έργο διευθέτησης σε αυτές (Χρυσάνθου, 1985, Κωτούλας, 2001).

Συντελεστής C

Για τον υπολογισμό του συντελεστή C έγινε χρήση της βάσης δεδομένων χρήσεων γης της European Environmental Agency Corine 2000 μετά από επιτόπιο έλεγχο, του προγράμματος ArcMap, αλλά και του Πίνακα 1, όπου οι χρήσεις γης παρουσιάζονται με τους κωδικούς τους.

Πίνακας 1: Συντελεστής χρήσεων γης (Zarris et al., 2001)

Χρήση γης	Συντελεστής C	Χρήση γης	Συντελεστής C	Χρήση γης	Συντελεστής C	Χρήση γης	Συντελεστής C
112	0,001	312	0,001	241	0,18	324	0,02
211	0,3	313	0,001	242	0,18	331	0,6
213	0,15	321	0,3	243	0,1	332	0,45
221	0,2	322	0,45	244	0,05	333	0,45
222	0,2	323	0,03	311	0,001	512	0,0001

3.1.3 Η μέθοδος Gavrilovic

Η μέθοδος προσδιορίζει τη μέση ετήσια γενική διάβρωση ή υποβάθμιση στις ορεινές λεκάνες απορροής των χειμαρρικών ρευμάτων. Η εξίσωση έχει την ακόλουθη μορφή:

$$W = T * h * \pi * (\sqrt{z^3}) * F \text{ (m}^3\text{/έτος)} \quad (3.4)$$

όπου W είναι ο όγκος μέσης ετήσιας παραγωγής φερτών υλών, π ο αριθμός 3,14159, F η επιφάνεια της λεκάνης (km^2), h (mm) το μέσο ετήσιο ύψος βροχής στο μέσο υψόμετρο της ορεινής λεκάνης, z ο συντελεστής διάβρωσης και T ($^{\circ}\text{C}$) ο συντελεστής θερμοκρασίας. Ακολουθεί αναλυτική περιγραφή του κάθε παράγοντα.

Ο παράγοντας T υπολογίζεται σύμφωνα με τον ακόλουθο τύπο:

$$T = \sqrt{\frac{t_0}{10} + 0,1} \quad (3.5)$$

όπου t_0 η μέση ετήσια θερμοκρασία για το μέσο υψόμετρο της ορεινής λεκάνης. Για τον υπολογισμό του παράγοντα t_0 χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Krigging.

Για τον υπολογισμό του μεγέθους h χρησιμοποιήθηκε η ίδια μεθοδολογία υπολογισμού με το μέγεθος N της μεθόδου USLE.

Ο z είναι ο συντελεστής διάβρωσης, ο οποίος υπολογίζεται από τη σχέση:

$$z = x * y(\varphi + \sqrt{J}) \quad (3.6)$$

όπου J είναι η μέση κλίση της επιφάνειας της λεκάνης απορροής, ως εφαπτόμενη γωνία, x ο συντελεστής που εκφράζει τη μείωση της αντίστασης του γεωλογικού υποθέματος κατά τη διάβρωση ανάλογα με την κατάσταση, την καλλιέργεια της επιφάνειάς του και την παρουσία της βλάστησης (Πίνακας 2, Globevnik et al., 2003).

Πίνακας 2: Τιμές συντελεστή x για διάφορες χρήσεις γης σύμφωνα με το Corine 2000

Χρήση	Τιμή x	Χρήση	Τιμή x	Χρήση	Τιμή x	Χρήση	Τιμή x
311	0,05	313	0,05	313	0,05	323	0,05
324	0,5	243	0,4	243	0,4	321	0,05

Ο συντελεστής διαβρωσιμότητας του γεωλογικού υποθέματος γ , ο οποίος εξαρτάται από την πετρολογική και εδαφολογική σύσταση των λεκανών, παίρνει τις τιμές του σύμφωνα με τους κατάλληλους πίνακες της βιβλιογραφίας (Κωτούλας, 2001). Για την περιοχή μελέτης, οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για το συντελεστή γ , είναι 0,1 λόγω της κυριαρχίας του φλύσχη.

Ο συντελεστής ϕ εκφράζει το είδος και το βαθμό της διάβρωσης των λεκανών απορροής. Ο γενικός πίνακας από όπου λήφθηκαν οι τιμές, βρίσκεται στη σχετική βιβλιογραφία (Κωτούλας, 2001). Για κάθε λεκάνη απορροής δόθηκε μετά από εξέταση όλων των παραπάνω παραγόντων διαφορετική τιμή.

3.2. ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΚΙΝΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Ο συντελεστής κινητικότητας K_b είναι μια αδιάστατη παράμετρος και άρα πρέπει να οριστεί από το χρήστη. Στην περίπτωση που υπολογίζεται ένα παρελθοντικό γεγονός, συνιστάται η εκτίμηση του K_{bobs} με χρήση της εμπειρικής σχέσης

$$K_{bobs} = B_{obs} * V_{obs}^{-2/3} \quad (3.7)$$

όπου B_{obs} η παρατηρούμενη εμβαδομετρημένη περιοχή εναπόθεσης και V_{obs} ο παρατηρούμενος όγκος των φερτών υλικών.

Στη παρούσα εργασία, το TopRunDF χρησιμοποιήθηκε για να προβλέψει πιθανές περιοχές απόθεσης, με αποτέλεσμα ο συντελεστής κινητικότητας να υπολογιστεί βάσει της μέσης κλίσης των υδατορρευμάτων S_c , όσο και της μέσης κλίσης του κώνου πρόσχωσης S_f από την παρακάτω εξίσωση:

$$K_{bred} = 5,075 S_f^{-0,1} * S_c^{-1,68} \quad (3.8)$$

Σε κάθε περίπτωση που το μοντέλο χρησιμοποιείται για πρόβλεψη, είναι απαραίτητο να ληφθεί υπόψη ένας συντελεστής αβεβαιότητας. Για τη συγκεκριμένη περίπτωση, αυτός ισούται με 2. Με χρήση του πρόσθετου 3D Analyst του ArcGIS 9.3 υπολογίστηκαν τόσο οι μέσες κλίσεις των ρεμάτων της περιοχής, όσο και η κλίση του κώνου πρόσχωσης.

3.3. ΑΦΕΤΗΡΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Στο μοντέλο πρέπει να δηλωθεί το σημείο εκκίνησης με συντεταγμένες X (ανατολικά) και Y (βόρεια). Αυτές πρέπει να προσδιοριστούν εντός του εφαρμοσμένου ψηφιακά μοντέλου υψομετρίας και πρέπει να είναι στο ίδιο προβολικό σύστημα. Το σημείο έναρξης της προσομοίωσης μπορεί να είναι μια διακριτή αλλαγή στο πλαίσιο εντός του διαμήκους προφίλ της ροής. Ο χρήστης καλείται να ολοκληρώσει πολλές προσομοιώσεις για την επίτευξη εύλογων αποτελεσμάτων. Έτσι και στη μελετώμενη περίπτωση χρειάστηκαν αρκετές δοκιμές για να εντοπιστούν οι συντεταγμένες που δίνουν τα καλύτερα αποτελέσματα.

3.4. ΨΗΦΙΑΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΔΑΦΟΥΣ

Το μοντέλο TopRunDF δημιουργήθηκε για να εκτελεί υψηλής ανάλυσης ψηφιακά μοντέλα, προερχόμενα από LIDAR, σε κানাβο μεγέθους 2,5 m x 2,5 m. Το ψηφιακό μοντέλο πρέπει να παρέχεται σε διάταξη ASCII, προκειμένου να εξασφαλιστεί τόσο η

ανεξαρτησία του οποιουδήποτε προγράμματος Γ.Σ.Π. όσο και για να υπάρχει εγγύηση για την αυτοτέλειά του (Scheidl et al., 2008). Στην παρούσα μελέτη, λόγω της απουσίας του κατάλληλου οργάνου μέτρησης, εφαρμόστηκε η κλασική ψηφιοποίηση ισοϋψών, ισοδιάστασης τεσσάρων μέτρων, οι οποίες προέρχονται από γεωδαιτημένους χάρτες της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού. Στη συνέχεια έλαβε χώρα η πύκνωσή τους ανά ένα μέτρο, η μετατροπή τους σε νέφος σημείων και τέλος η δημιουργία του ψηφιακού μοντέλου υψομετρίας σε μορφή ASCII, κανάβου 2,5 m x 2,5 m, ώστε να είναι αυτό συμβατό με τις απαιτήσεις του TopRunDF.

3.5. ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΕΠΑΝΑΛΗΨΗΣ MONTE CARLO

Το μοντέλο χρησιμοποιεί την προσομοίωση Monte Carlo για να οριοθετήσει τις ζώνες πρόσχωσης. Έτσι, ο αριθμός MCI δηλώνει τις επαναλήψεις στον υπολογισμό των χώρων απόθεσης. Πειραματικά υπολογίστηκε ότι το μοντέλο συμπεριφέρεται καλύτερα, όταν ο συντελεστής επανάληψης ισούται με 50.

3.6. ΥΔΑΤΟΠΑΡΟΧΗ

Για τον υπολογισμό της υδατοπαροχής, ελλείπει δεδομένων, χρησιμοποιήθηκαν εμπειρικοί τύποι (Viessman et al., 1989). Οι σπουδαιότεροι εξ' αυτών είναι

$$\text{του Friedrich } Q_{\max}=24,12 \cdot F^{0,516} \quad (3.9)$$

$$\text{του Valentini } Q_{\max}=(30/F^{1/2}) \cdot F \quad (3.10)$$

$$\text{του Wundt } Q_{\max}=13,8 \cdot F^{0,6} \quad (3.11)$$

$$\text{και τέλος των Klement-Wunderlich } Q_{\max}=5,5 \cdot F^{5/6} \quad (3.12)$$

όπου F το εμβαδό της λεκάνης.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Για ποιοτικότερη και λεπτομερέστερη ανάλυση των υδρολογικών συνθηκών, η κύρια λεκάνη απορροής χωρίστηκε σε 14 υπολεκάνες. Τα αποτελέσματα των μεθόδων υπολογισμού της εδαφικής διάβρωσης για τη συνολική λεκάνη συμφωνούν και ανέρχονται σε 2062 m³/έτος (USLE) και 2098 m³/έτος (Gavriloniç). Οι φερτές ύλες που παράγονται σε μια λεκάνη απορροής, δεν μεταφέρονται εξ ολοκλήρου μέχρι την έξοδο της λεκάνης απορροής. Το ποσοστό των παραγόμενων φερτών υλών που φθάνει σε ετήσια βάση στην έξοδο της λεκάνης απορροής λέγεται βαθμός στερεοπαροχής και δίνεται από την παρακάτω εξίσωση (Χρυσάνθου, 1985, Κωτούλας, 2001):

$$DR=0,627 \cdot J_s^{0,403} \quad (4.1)$$

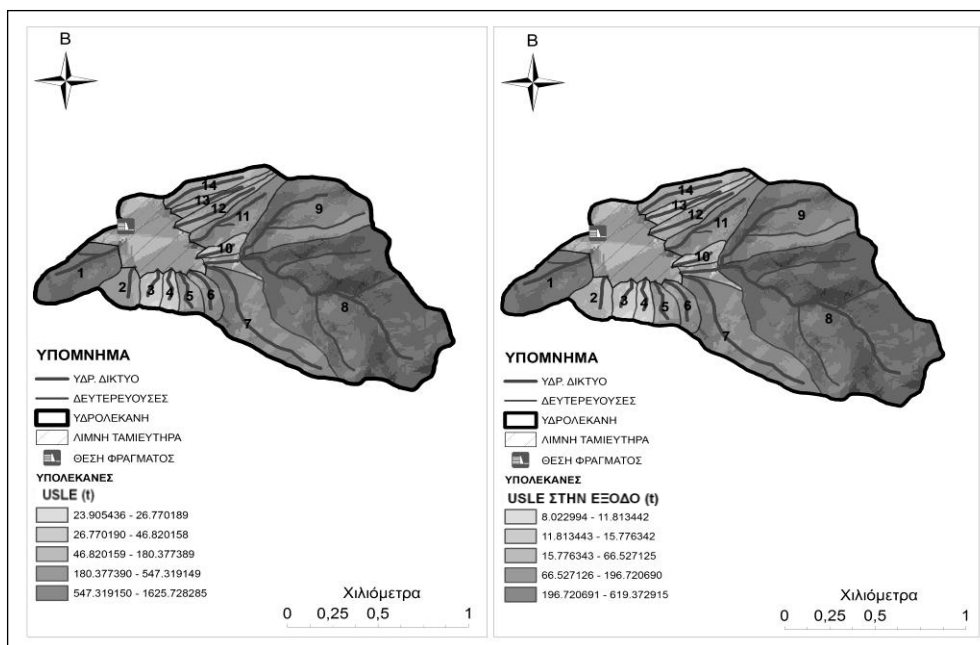
όπου J_s η μέση κλίση της λεκάνης απορροής ως εφαπτόμενη γωνίας.

Με χρήση της παραπάνω σχέσης προέκυψαν ανάλογα αποτελέσματα για τη στερεοπαροχή, η οποία σε μονάδες όγκου ανέρχεται σε 757 m³/έτος και 894 m³/έτος αντίστοιχα. Στη συνέχεια, με τη χρήση των εμπειρικών τύπων υπολογίστηκε η μέγιστη παροχή της συνολικής λεκάνης απορροής, η οποία είναι 12,04 m³/s.

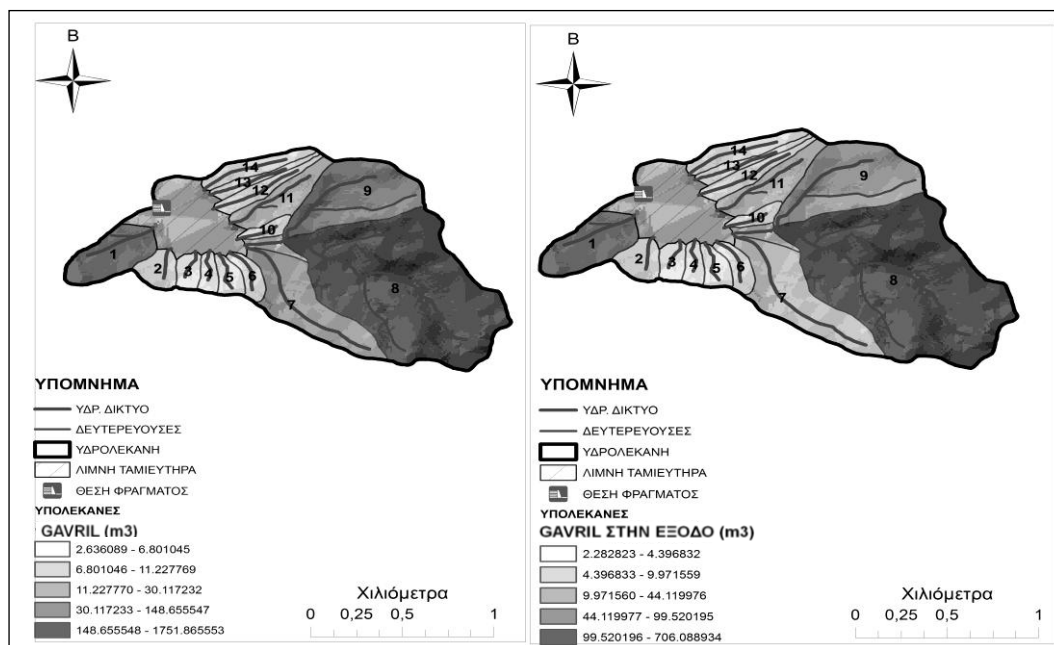
Στο σημείο αυτό, θα πρέπει να τονιστεί ότι λόγω της έλλειψης ψηφιακού μοντέλου υψομετρίας, προερχόμενου από LIDAR, επιλέχθηκε να εκτελεστεί το μοντέλο TopRunDF στην πιο σημαντική υπολεκάνη. Με την εφαρμογή των παραπάνω μεθόδων σε όλες τις υπολεκάνες εξάχθηκε το συμπέρασμα ότι η υπολεκάνη υπ' αριθμό 8 χρήζει περαιτέρω ανάλυσης, εφόσον ο όγκος των φερτών υλικών αντιστοιχεί σε 1625 m³ κατά την USLE και 1751 m³ κατά Gavrilonič (συνολικά αντιστοιχεί περίπου στο 80% της συνολικής εδαφικής διάβρωσης των υπολεκανών), ενώ παράλληλα η μέγιστη παροχή ισούται με 4,265 m³/s.

Με χρήση των Γ.Σ.Π. υπολογίστηκε ότι ο συντελεστής κινητικότητας ισούται με 98, ο αριθμός επανάληψης της προσομοίωσης Monte Carlo είναι 50 και ο συνολικός όγκος της παροχής και της στερεοπαροχής είναι περίπου 2000 m³. Τα παραπάνω αποτελέσματα αποτυπώνονται στα Σχήματα 2, 3 και 4.

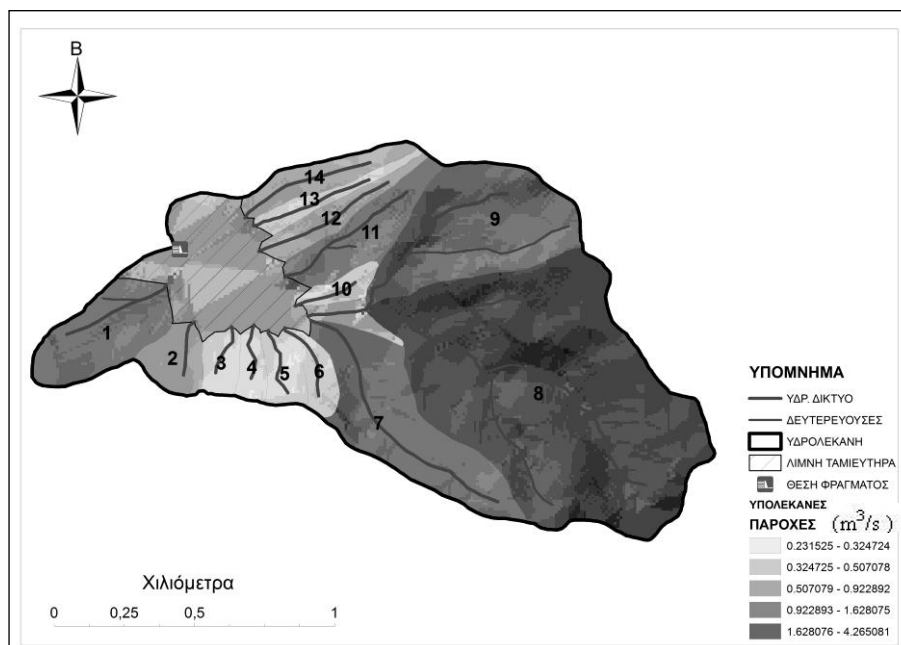
Το μοντέλο, στη συνέχεια, υπολόγισε 15562 πιθανές θέσεις εναπόθεσης φερτών υλών, από τις οποίες προσομοίωσε 15512 με μέγιστο ύψος εναπόθεσης τα 0,12 m. Η χωρική παρουσίαση των αποτελεσμάτων λαμβάνει χώρα σε δύο ξεχωριστά αρχεία. Η χωρική απεικόνιση των αποτελεσμάτων διαχωρίζεται σε δύο παραγόμενα αρχεία. Το αρχείο msc εμφανίζει την προσομοιωμένη κατακλυζόμενη περιοχή σε συνδυασμό με τη μέγιστη δυνατότητα παροχής κάθε κελιού του ψηφιακού μοντέλου εδάφους και το αρχείο depo απεικονίζει την περιοχή εναπόθεσης και το ύψος αυτής (Σχήμα 5).



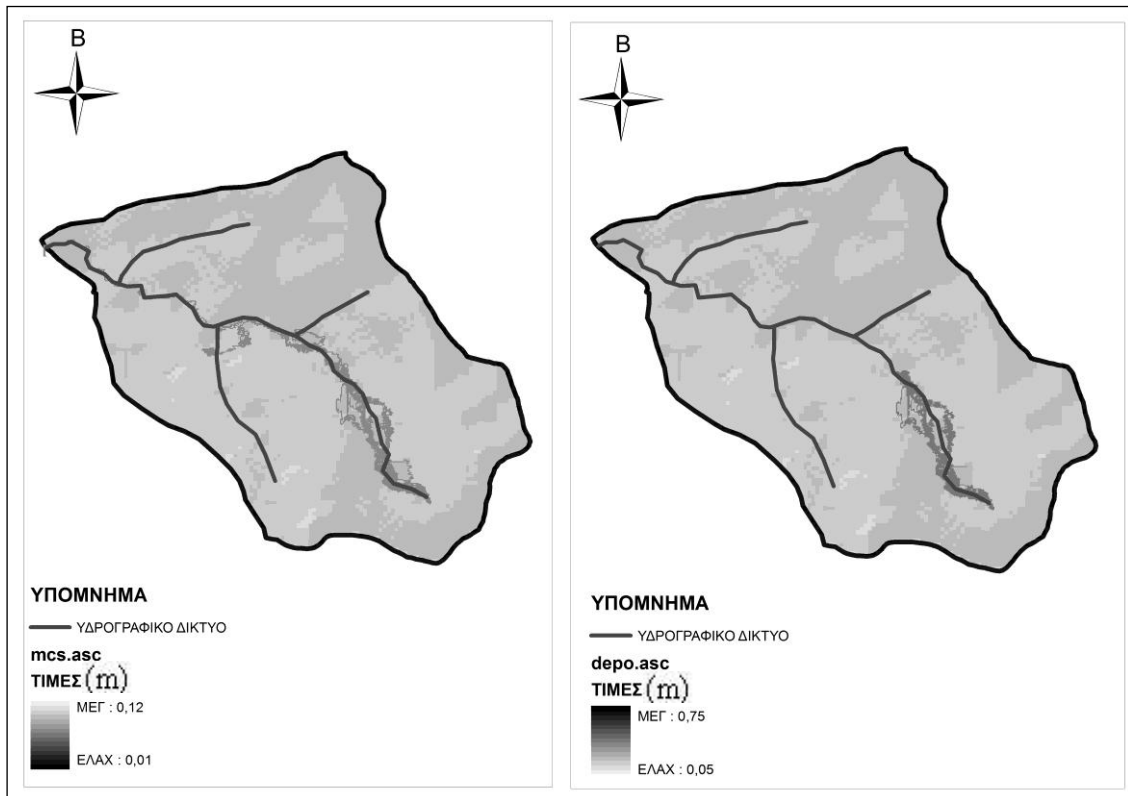
Σχήμα 2: Αποτελέσματα εδαφικής απώλειας και στερεοπαροχής με χρήση της μεθόδου USLE.



Σχήμα 3: Αποτελέσματα εδαφικής απόλειας και στερεοπαροχής με χρήση της μεθόδου Gavrilović



Σχήμα 4: Αποτελέσματα υδατοπαροχής ανά υπολεκάνη



Σχήμα 5. Χωρική απεικόνιση κατακλυζόμενων περιοχών θέσεων εναπόθεσης φερτών υλών με χρήση του μοντέλου TopRunDF στην υπολεκάνη 8

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Βασικός σκοπός της εργασίας είναι ο έλεγχος της εύρυθμης λειτουργίας του φράγματος Μεσόβουνου σε σχέση με τις τάσεις πρόσχωσης που εμφανίζονται στην περιοχή.

Με βάση την αξιολόγηση της παρούσας έρευνας προκύπτει ότι και οι δύο μέθοδοι υπολογισμού της εδαφικής απώλειας συγκλίνουν ως προς τα αποτελέσματά τους και αυτά ανέρχονται περίπου στα 2000 m³ κατά έτος. Με βάση την τεχνική περιγραφή του ταμιευτήρα, που μας παραχώρησε η κατασκευάστρια εταιρία, προκύπτει ότι η διάρκεια λειτουργίας του έργου δεν επηρεάζεται από τις τάσεις πρόσχωσης, εφόσον ο ωφέλιμος όγκος του ταμιευτήρα ανέρχεται σε 891 000 m³ στην ανώτερη στάθμη και 869 000 m³ στην κατώτερη.

Με εφαρμογή των μεθόδων εκτίμησης της εδαφικής διάβρωσης ανά υπολεκάνη εξάχθηκε το συμπέρασμα ότι η λεκάνη 8 παράγει τα περισσότερα φερτά υλικά, που αντιστοιχούν περίπου στο 80% της συνολικής λεκάνης, ενώ παράλληλα εμφανίζει και αξιοσημείωτη υδατοπαροχή. Για το λόγο αυτό εφαρμόστηκε σ' αυτήν το νέο μοντέλο TopRunDF. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν με τη χρήση του μοντέλου, αναφέρονται στα σημεία της λεκάνης με το μεγαλύτερο ύψος εναπόθεσης φερτών υλικών. Παρόλο που δε δημιουργείται πρόβλημα, στο άμεσο μέλλον θα πρέπει τα ως άνω σημεία να ελέγχονται τακτικά, γιατί οι αποθέσεις στις παραπάνω περιοχές της θεωρούμενης λεκάνης απορροής συνιστούν κίνδυνο για τον ταμιευτήρα στην έξοδο της λεκάνης απορροής σε περιπτώσεις πλημμυρικών γεγονότων, καθόσον τότε μπορούν να παρασυρθούν από τις πλημμυρικές ροές οι αποθέσεις

Ειδικότερα, το μέγιστο ύψος εναπόθεσης στη συγκεκριμένη υπολεκάνη φθάνει τα 12 cm. Επιπλέον, θα πρέπει να τονιστεί ότι το έργο κατασκευάστηκε για πλημμύρα μέγιστης παροχής $Q_{500} = 19 \text{ m}^3/\text{s}$, πιθανότητας επανεμφάνισης 500 ετών και ελέγχεται για τη μέγιστη πιθανή πλημμύρα (MPF) παροχής $Q_{\text{MPF}} = 30 \text{ m}^3/\text{s}$. Με τους εμπειρικούς τύπους, η μέγιστη παροχή υπολογίστηκε σε $12 \text{ m}^3/\text{s}$ και κρίνεται ικανοποιητική τόσο για την πλήρωση του φράγματος όσο και για την ευστάθειά του. Συμπερασματικά, το TopRunDF παρέχει τη δυνατότητα καθορισμού των ακριβών θέσεων απόθεσης των φερτών υλών, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα του έγκαιρου σχεδιασμού και της ακριβούς χωροθέτησης των απαραίτητων τεχνικών και φυτοτεχνικών έργων στην ορεινή λεκάνη απορροής για την προστασία σημαντικών υποδομών, όπως αυτή του ταμιευτήρα Μεσόβουνου.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς της εργασίας επιθυμούν να ευχαριστήσουν την Αναπτυξιακή Εταιρεία Δυτικής Μακεδονίας και ιδιαίτερα τους κ. Αθανάσιο Καραθανάση και κ. Ιωάννη Καραγιάννη για την παραχώρηση της μελέτης του φράγματος .

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Gavrilovič, Z., Stefanovič, M., Milojevič, M. and Cotrič, J., 2006. *Erosion Potential Method. An Important Support for Integrated Water Resource Management*. Balwois Conference 2006 Ohrid, FYROM, pp. 445-453.
- Globevnik, L., Holjevič, D., Petkovsek, G. and Rubinič, J., 2003. *Applicability of the Gavrilovič method in erosion calculation using spatial data manipulation techniques*. Proceedings of the International Symposium XXIII, General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics, Sapporo, Japan, 8-9 July, pp. 224-232.
- Hevesi, J.A., Flint, A.L. and Istok, J.D., 1992. *Precipitation estimation in mountainous terrain using multivariate geostatistics, part I: structural analysis*. Journal of Applied Meteorology, 31: 661-676.
- Hurlimann, M., Rickenmann, D., Medina, V. and Bateman, A., 2008. *Evaluation of approaches to calculate debris-flow parameters for hazard assessment*, Engineering Geology 102, pp. 152-163.
- Ma, J., 2001. *Combining the USLE and GIS / Arcview for Soil Erosion Estimation in Fall Creek Watershed in Ithaca*. New York.
- Maris, F., Karagiorgos, K., Anastasiadis, S., Vasileiou, A. and Karagiannis, I., 2006. *Soil loss evaluation in the Polifitou Lake basin using Geographical Information System*. International Conference on Sustainable Management and Development of Mountainous and Island Areas, Naxos, Greece, 29 September-1 October, pp. 302-313.
- Spartalis, S., Iliadis, L. and Maris, F., 2007. *An innovative risk evaluation system estimating its own fuzzy entropy*. Mathematical and Computer Modelling. 46: 260-267.
- Scheidl, C. and Rickenmann, D., 2009. *Empirical prediction of debris-flow mobility and deposition on fans*. Earth Surface Processes and Landforms (in press).

- Scheidl, C., Rickenmann, D. and Chiari, M., 2008. *The use of airborne LiDAR data for the analysis of debris flow events in Switzerland*. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 8:1113–1127.
- Vasileiou, A., Maris, F. and Varsami, G., 2011. *Estimation of sedimentation to the torrential sedimentation fan of the Dadia stream with the use of the TopRunDF and the GIS models*. Advances in the Research of Aquatic Environment, Environmental Earth Sciences, 2013, Part 3, 207-214, DOI:10.1007/978-3-642-19902-8_24.
- Viessman, W., Lewis, G. L. and Knapp, J. W., 1989. *Introduction to Hydrology*. 3rd edition, Harper & Row, New York.
- Wischmeier, W. H., and Smith, D., 1978. *Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning*. US Department of Agriculture, Handbook no 537, Washington, D.C.
- Zarris, D., Lykoudi, E. and Koutsogiannis, D., 2002. *Sediment Yield Estimation from a Hydrographic Survey: A case study for the Kremasta reservoir basin*. 5th International Conference, Water Resources Management in the Era of Transision. Athens 4-8/9, pp. 338 - 345.
- Κουτσογιάννης, Δ. και Ξανθόπουλος, Θ., 1999. *Τεχνική Υδρολογία*. Έκδοση 3, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, σελ. 418.
- Κωτούλας, Δ., 2001. *Ορεινή Υδρονομική, Τόμος Ι: Τα ρέοντα ύδατα*. Τμήμα Εκδόσεων Α. Π. Θ., Θεσσαλονίκη.
- Παπαϊωάννου, Γ., 2008. *Το χειμαρρικό περιβάλλον του ποταμού Κόσυνθου*. Μεταπτυχιακή Διατριβή, Τμήμα Δασολογίας και Διαχείρισης Περιβάλλοντος και Φυσικών Πόρων, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, σελ. 118.
- Νταγκουνάκη, Κ., Κασώλη-Φουρναράκη, Α., Τσιραμπίδης, Α. και Σικαλίδης, Κ., 2004. *Ανθρακικοί σχηματισμοί της ευρύτερης περιοχής της Κοζάνης και δυνατότητα αξιοποίησής τους στην υαλοργία, στην απομάκρυνση όξινων αερίων και στη μεταλλουργία*. Πρακτικά 10ου Διεθνούς Συνεδρίου Γεωλογικής Εταιρίας, σελ 34-42, Θεσ/νίκη.
- Τσακίρης, Γ., 1995. *Υδατικοί Πόροι: Ι. Τεχνική Υδρολογία*. Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα.
- Χρυσάνθου, Β., 1985. *Στερεοπαροχή μιας λεκάνης απορροής και συσσώρευση φερτών υλών στην αντίστοιχη τεχνητή λίμνη*. 2ο Πανελλήνιο Συνέδριο της Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης (ΕΥΕ), Ξάνθη, σελ. 389-397.
- Χρυσάνθου, Β. και Πυλιώτης, Α., 1995. *Εκτίμηση της εισροής φερτών υλών σε έναν ταμιευτήρα υπό κατασκευή*. 6ο Πανελλήνιο Συνέδριο ΕΥΕ, σελ. 355-362, Θεσσαλονίκη.

Η ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΤΩΝ ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΤΗΣ ΛΙΜΝΗΣ ΚΑΡΛΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ GIS

X. Ζήσου, Α. Ψιλοβίκος

Τμήμα Γεωπονίας Ιχθυολογίας και Υδάτινου Περιβάλλοντος, Σχολή
Γεωπονικών Επιστημών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Οδός Φυτόκου, Νέα Ιωνία
Μαγνησίας, 38446

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Με την παρούσα εργασία, ξεκινάει μια προσπάθεια παρακολούθησης της νεοσυσταθείσας λίμνης Κάρλας, η οποία βρίσκεται στο στάδιο της επαναπλήρωσης. Στόχοι της παρούσας εργασίας, είναι: α) η εποχική παρακολούθηση των πιο αντιπροσωπευτικών φυσικοχημικών παραμέτρων του νερού, σε 4 επιλεγμένα σημεία δειγματοληψίας στην επιφάνεια της λίμνης Κάρλας και β) η χωρική μοντελοποίηση των παραμέτρων με χρήση GIS. Εφαρμόστηκαν δύο ντετερμινιστικοί αλγόριθμοι οι “Inverse Distance Weight – IDW” και “Radial Basis Function – RBF” ή “Splines” με την πρώτη μέθοδο να δίνει καλύτερα προσαρμοσμένα αποτελέσματα και πιο αξιόπιστα σε σχέση με τη δεύτερη. Στη συνέχεια, διατυπώνεται σειρά προτάσεων για την προστασία της Κάρλας με κύρια την ανάγκη να λειτουργήσει άμεσα ένα δίκτυο συστηματικής παρακολούθησης της ποιότητας των υδάτων.

MONITORING AND MODELING OF THE GEOGRAPHIC DISTRIBUTION OF THE PHYSICOCHEMICAL PARAMETERS OF THE WATER IN LAKE KARLA USING GIS

C. Zisou, A. Psilovikos

Department of Agricultural, Ichthyology and Aquatic Environment, School of
Agricultural Science, University of Thessaly, Fytokou Street, Nea Ionia
Magnisias, 38446, Greece

SUMMARY

In this paper, an attempt begins to monitor the newly rehabilitated Lake Karla, which is in the process of refilling. The aims of this work are: a) the seasonal monitoring of the most representative parameters of water in 4 selected sampling points on the surface of Lake Karla and b) the spatial modeling of the parameters using GIS. Two deterministic algorithms were applied, “Inverse Distance Weight – IDW” method and “Splines”. The first method gave better adapted and more reliable results than the second one. Subsequently, a series of proposals expressed for the protection and management of Lake Karla with the need to install and operate an integrated system of systematic monitoring of the water quality.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η λίμνη αποτελεί ένα ξεχωριστό οικοσύστημα, αρκετά πολύπλοκο, το οποίο μπορεί να ανταποκριθεί διαφορετικά με γνώμονα την ποιότητα του νερού. Γενικά, η οικολογική κατάσταση ενός τέτοιου συστήματος, επιδεικνύει διαφορετική ελαστικότητα στις πιέσεις των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων (Ματζαφλήρη, 2007). Η πρόληψη είναι ο πλέον αποτελεσματικός τρόπος προστασίας των επιφανειακών υδάτων και του εδάφους.

Ο σκοπός της παρακολούθησης των ποιοτικών και ποσοτικών παραμέτρων των υδατικών οικοσυστημάτων (πηγές, ρέματα, ποτάμια, λίμνες, φιορδ, εκβολές παράκτιων και θαλασσιών νερών), είναι η προσέγγιση και η εκτίμηση της περιβαλλοντικής τους κατάστασης και τάσης (Psilonikos et al., 2006). Η παρακολούθηση των υδατικών οικοσυστημάτων έχει γίνει ένα πολύτιμο εργαλείο, το οποίο διευκολύνει την αξιολόγηση της φύσης και την έκταση της ρύπανσης, καθώς και την αποτελεσματικότητα των μέτρων ελέγχου της ρύπανσης, την τάση της ποιότητας των υδάτων και τέλος, την ιεράρχηση των προσπαθειών ελέγχου της (Odermatt et al., 2008).

Παρακολουθώντας τις αλλαγές πολλών από τις φυσικές, χημικές και βιολογικές παραμέτρους μιας λίμνης, μπορούμε να έχουμε έγκυρη ανίχνευση και αποκλεισμό των βλαβερών ουσιών χωρίς συνέπειες, με αποτέλεσμα την διατήρηση του εκάστοτε οικοσυστήματος εντός των επιτρεπτών ορίων.

Η λίμνη Κάρλα θεωρείται ένα πολύ σημαντικό υδατικό οικοσύστημα, τόσο από άποψη βιοποικιλότητας (Natura, GR1420004), όσο και από την άποψη της ανασύστασης της στην περιοχή της πρώην λίμνης Κάρλας, η οποία αποξηράνθηκε το 1960 (Papadimitriou et al., 2011). Οι πρόσφατες βιβλιογραφικές αναφορές που είναι διαθέσιμες για την νεοσύστατη λίμνη Κάρλα και αφορούν είτε ζητήματα μετρήσεων της ποιότητας και αποτίμησής της, είτε εφαρμογή μοντέλων προσομοίωσης της, είναι περιορισμένες (Laspidou et al., 2011; Παπανίκος, 2008; Zalidis et al., 2004; Moustaka et al., 2002; Gerakis, 1992).

Η παρούσα εργασία φιλοδοξεί να είναι μια πρώτη προσπάθεια αποτίμησης της ποιότητας των υδάτων της Λίμνης Κάρλας μετά την ανασύσταση της με χρήση Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS). Οι πιο πρόσφατες μελέτες πάνω σε θέματα ποιότητας έγιναν από τους Papadimitriou et al. (2011) με έμφαση στην διερεύνηση ευτροφικών συνθηκών και στην εμφάνιση μικροκυστίνων και από τους Sidiroroulo et al. (2011) στην παρουσίαση των κυριότερων μεταβλητών του ευτροφισμού, με έμφαση στην λιμνολογική ιστορία της λίμνης και στο οικολογικό προφίλ της. Η προηγούμενη γενικευμένη προσπάθεια αποτίμησης της ποιότητας των υδάτων της λίμνης Κάρλας πραγματοποιήθηκε από τον Παπανίκο (2008).

Επικεντρώνεται στην παρακολούθηση συγκεκριμένων παραμέτρων του νερού σε τέσσερα σημεία δειγματοληψίας στην λίμνη Κάρλα και στην μοντελοποίηση της χωρικής κατανομής της ποιότητας των υδάτων με την χρήση των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών. Τέλος, γίνεται η αποτίμηση της ποιότητας των υδάτων και διατυπώνεται σειρά προτάσεων για την αιφορική διαχείριση της λίμνης Κάρλας. Τα τέσσερα μέρη της παρούσας εργασίας είναι αναλυτικά τα εξής:

- Συστηματική εποχική παρακολούθηση των φυσικοχημικών παραμέτρων της λίμνης Κάρλας σε μηνιαία βάση κατά την περίοδο Ιουνίου – Νοεμβρίου για το έτος 2011. Μετρήθηκαν συγκεκριμένες παράμετροι στο πεδίο με φορητό όργανο – θερμοκρασία νερού (T_w - °C), διαλυμένο οξυγόνο (DO - mg/l), ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC_w - ms/cm), θολερότητα (Turb - NTU), pH - ενώ άλλες παράμετροι προέκυψαν από αναλύσεις των δειγμάτων στο εργαστήριο - νιτρώδη (NO_2^-), νιτρικά (NO_3^-), αμμωνιακά (NH_4^+) και ορθοφωσφορικά (PO_4^{3-}) ιόντα και χλωροφύλλη-α.

- Σχεδιασμός δισδιάστατων χαρτών με το σύστημα των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (ArcMap 2010) και στην συνέχεια, κατασκευή ισοποσοτικών καμπυλών για τους μήνες Αύγουστο 2011 και Νοέμβρη 2011.
- Εξαγωγή συμπερασμάτων για την υφιστάμενη τροφική κατάσταση της λίμνης και
- Διατύπωση προτάσεων για την αειφορική διαχείριση της ποιότητας των υδάτων της λίμνης Κάρλας.

2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η λίμνη Κάρλα, ήταν γνωστή κατά την αρχαιότητα (2.500 π.Χ) με το όνομα Βοιβής. Καταλάμβανε το νοτιότερο άκρο της υδρολογικής λεκάνης του Πηνειού στο νοτιοανατολικό τμήμα της Θεσσαλικής πεδιάδας και αποτελούσε έναν από τους σημαντικότερους υδροβιότοπους της Ελλάδας μέχρι το 1962 (Zalidis *et al.*, 2005). Αποτελεί τεκτονικό βύθισμα που έγινε κατά την πρώτη περίοδο της τεταρτογενούς εποχής και στο οποίο εναποτέθηκαν τα πρώτα λιμναία ιζήματα. Ακολούθησε πλήρωση αυτού με προϊόντα διάβρωσης που μετέφεραν ο Πηνειός και οι άλλοι χείμαρροι από την λεκάνη απορροής τους (Loukas *et al.*, 2005).

Η λεκάνη απορροής της πρώην λίμνης Κάρλας κάλυπτε μια έκταση 1500 Km², εκ των οποίων περισσότερα από 600 Km² καταλάμβαναν την νότια πεδιάδα, ενώ το βόρειο-ανατολικό τμήμα περιβάλλονταν από χαμηλά βουνά και λόφους (Μπαρτζώκα-Τσιόμπρα και Ψύλλος 2011). Η έκταση που κάλυπτε η επιφάνεια της λίμνης πριν τις πρώτες επεμβάσεις κυμαινόταν από 40 έως 108 km², λόγω των υψηλών διακυμάνσεων της στάθμης του νερού και της κλίσης του εδάφους (Οικονομου *et al.*, 2010). Το 1956, το βάθος που καταγράφηκε ήταν περίπου 2,5 m, ενώ το 1930 το βάθος ήταν μεταξύ 4 – 6 m (Papadimitriou *et al.*, 2011).

Η λεκάνη επιφανειακής απορροής και τα νερά του Πηνειού τροφοδοτούσαν την λίμνη με μεγάλες ποσότητες νερού. Ο Πηνειός ήταν η πιο σημαντική πηγή εισροής, ενώ η απορροή από την περιοχή της λεκάνης απορροής σε συνδυασμό με τις πηγές (Κανάλια, Ασμάκι) και τα προσωρινά ρέματα (ανατολικής και νότιας πλευράς) τροφοδοτούσαν επίσης την λίμνη (Moustaka *et al.*, 2002; Παπανίκος και συν., 2009).

Οι πλημμύρες των εδαφών της περιοχής, που δημιούργησαν περιοδικές καταστροφές των καλλιεργειών και συνετέλεσαν στην δημιουργία παθογενών εδαφών λόγω της συγκέντρωσης των αλάτων και στην διάδοση της ελονοσίας, καθώς και η ανάγκη για δημιουργία περισσότερων γεωργικών εκτάσεων μαζί με την μείωση των αλιευμάτων οδήγησαν στην ολική αποξήρανση της λίμνης το 1962 (Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε. 2002). Στο σχεδιασμό των αρχικών μελετών δεν προβλεπόταν η ολική αποξήρανση της λίμνης, αλλά η διατήρηση 64.700 στρεμμάτων όπου θα παρέμεναν ως ταμιευτήρας. Αντιθέτως, το 1962 οδηγήθηκε η Κάρλα σε ολική αποξήρανση, η οποία και ολοκληρώθηκε το 1964 (Zalidis and Gerakis, 1999).

Η ολική αποξήρανση του δεύτερου σε μέγεθος υδροβιότοπου της Ελλάδας το 1962, οδήγησε σε μια σειρά ανθρωπογενών επιπτώσεων συμπεριλαμβανομένης της απώλειας των υδροτόπων, την σημαντική υποχώρηση του υδροφόρου ορίζοντα, την αύξηση της αλατότητας του εδάφους καθώς και απώλεια της οικολογικής και αισθητικής αξίας (Μπαρτζώκα-Τσιόμπρα και Ψύλλος 2011). Οι προσπάθειες επαναδημιουργίας τμήματος της τέως λίμνης Κάρλας ξεκίνησαν το 1980 και σήμερα βρίσκονται στο στάδιο της επαναπλήρωσης.

3. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

3.1. ΣΗΜΕΙΑ ΚΑΙ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ

Οι θέσεις των σημείων δειγματοληψίας προσδιορίστηκαν με καταγραφή των γεωγραφικών στιγμάτων με φορητό Global Position System (GPS). Ο καθορισμός των σταθμών δειγματοληψίας έγινε σε συνεννόηση με το Φορέα Διαχείρισης, ο οποίος ξεκίνησε να πραγματοποιεί μετρήσεις σε 3 από τις 4 θέσεις, κατά το έτος 2010, με σκοπό την εποχική και χρονική σύγκριση των αποτελεσμάτων. Ο 4^{ος} σταθμός, προστέθηκε εξαιτίας της γεωγραφικής του θέσης, ώστε να ελεγχθεί το ρυπαντικό φορτίο που εισέρχεται απευθείας στην λίμνη από τις εκπλύσεις των γεωργικών εδαφών, καθώς στο συγκεκριμένο σημείο δεν υπάρχουν αναχώματα (Αναγράφεται στην εργασία ως «Σταθμός 1»).

Η συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων μας, έγινε με βάση προγενέστερα δεδομένα από Papadimitriou *et al.* (2011).

3.2. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ

Η διαδικασία είχε ως σκοπό την εφαρμογή ενός προγράμματος δειγματοληψίας για τον έλεγχο της ποιότητας των επιφανειακών υδάτων της λίμνης Κάρλας με την ανάλυση φυσικοχημικών παραμέτρων. Τα πρότυπα που χρησιμοποιήθηκαν για την εφαρμογή της διαδικασίας είναι τα ISO 8466-1, DIN 38402.

Ο χρόνος δειγματοληψίας επιλέγονταν με βάση τα ακόλουθα κριτήρια:

- Να μην είχαν προηγηθεί έντονες βροχοπτώσεις ή πλημμύρες,
- Να μην υπήρχε σημαντική θερμοκρασιακή μεταβολή τις τελευταίες δύο μέρες πριν την δειγματοληψία.

Με την συλλογή τους τα δείγματα τοποθετούνταν, αν δεν αναλύονταν άμεσα, στην κατάψυξη. Η διήθηση των δειγμάτων του νερού γινόταν μέσω φίλτρων τύπου Whatman GF/C 0.45 μm για την απομάκρυνση του σωματιδιακού υλικού από το νερό και η κατακράτηση του γινόταν σε κωνικές φιάλες χωρίς καθυστέρηση στο εργαστήριο.

3.3. ΠΟΣΟΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

Η μέτρηση των φυσικοχημικών παραμέτρων (θερμοκρασία, αλατότητα, pH, θολότητα, διαλυμένο οξυγόνο) έγινε στο πεδίο και συγκεκριμένα, με το φορητό όργανο της Horiba U-10 (Water quality Checker model), το οποίο ελέγχει την ποιότητα του νερού στο πεδίο με επιτόπια μέτρηση.

Ο ποσοτικός προσδιορισμός της περιεκτικότητας των δειγμάτων σε νιτρικά ($\text{NO}_3\text{-N}$), νιτρώδη ($\text{NO}_2\text{-N}$), αμμωνιακά ιόντα ($\text{NH}_4\text{-N}$) καθώς και σε ορθοφωσφορικά ιόντα ($\text{PO}_4\text{-P}$), πραγματοποιήθηκε με φασματοφωτόμετρο τύπου Spectroquant Merck με αντιδραστήρια της ίδιας εταιρίας Merck KGaA σύμφωνα με τις προδιαγραφές της (Spectroquant Test: 1.09713.0001, 1.14848.0001, 1.14776.0001, 1.14752.0001). Ο προσδιορισμός της χλωροφύλλης (Chla) έγινε με φασματοφωτόμετρο τύπου UV-Visible.

3.4. ΜΟΝΤΕΛΑ ΧΩΡΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΤΗΣ ΛΙΜΝΗΣ ΚΑΡΛΑΣ

Για τις επτά αυτές παραμέτρους σχεδιάστηκαν δισδιάστατοι χάρτες με την βοήθεια του λογισμικού ArcMap της ESRI. Στην συνέχεια κατασκευάστηκαν χάρτες ισοποσοτικών καμπυλών για τους μήνες Αύγουστο 2011 και Νοέμβριο 2011.

Δύο μέθοδοι προσομοίωσης εφαρμόστηκαν και συγκρίθηκαν μεταξύ τους. Η μία είναι η μέθοδος "IDW" και η δεύτερη είναι η μέθοδος "RBF". Οι αλγόριθμοι και των

δύο μεθόδων είναι προσδιοριστικοί – αιτιοκρατικοί. Μόνο η μέθοδος “RBF” παρουσιάζεται καθώς έδωσε καλύτερα προσαρμοσμένα αποτελέσματα σε σχέση με την μέθοδο “IDW” η οποία αστόχησε στη χάραξη των ισοποσοτικών καμπυλών.

3.4.1. Ο αλγόριθμος παρεμβολής “IDW”

Σύμφωνα με τον αλγόριθμο αυτό, για την υπό μελέτη περιοχή κατασκευάζεται ένας κানাβος, όπου για κάθε σημείο του γίνεται μια τοπική εκτίμηση βασισμένη στα γειτονικά σημεία δειγματοληψίας. Η συλλογή των παρεμβλημένων τιμών του κανάβου δημιουργεί μια εκτίμηση της χωρικής κατανομής των τιμών (Matzafleri *et al.*, 2009). Η μέθοδος είναι ανεξάρτητη από τον αριθμό των επιλεγμένων σημείων δειγματοληψίας και η παρεμβολή γίνεται με βάση τη σχέση (Ψιλοβίκος, 2010, Dingman, 1994):

$$\bar{Z}(s_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i \cdot Z(s_i) \quad (3.1)$$

όπου

$\bar{Z}(s_0)$ η τιμή που προσπαθούμε να προβλέψουμε για την τοποθεσία s_0

N ο αριθμός των σημείων δειγματοληψίας που βρίσκονται στη γειτονιά της θέσης πρόβλεψης

$\bar{Z}(s_i)$ η τιμή της παρατηρούμενης σημειακής μέτρησης στη θέση s_i

$$\lambda_i = \frac{d_{i0}^{-p}}{\sum_{i=1}^N d_{i0}^{-p}} \quad \text{και} \quad \sum_{i=1}^N \lambda_i = 1 \quad \text{βάρη}$$

d_{i0} οι αποστάσεις της τοποθεσίας s_0 από τα σημεία $i=1,2,\dots,N$

k εκθέτης, ο οποίος στην πράξη είναι ο συντελεστής επιρροής της απόστασης.

3.4.2. Ο αλγόριθμος “RBF”

Είναι ένας αλγόριθμος με τον οποίο παρεμβάλλεται μια επιφάνεια ελάχιστης κυρτότητας μέσω των σημείων παρεμβολής. Αυτό γίνεται με την προσαρμογή τοπικών πολυωνυμικών εκφράσεων παρεμβολής μικρού βαθμού σε ένα συγκεκριμένο αριθμό κοντινών σημείων παρεμβολής οι οποίες διέρχονται από τα σημεία δειγματοληψίας. Η κυρίαρχη συνάρτηση, δίνεται από την σχέση (Ψιλοβίκος, 2010, Bishop, 1995) :

$$Z(s_0) = \sum_{i=1}^n \omega_i \varphi(\|s_i - s_0\|) + \omega_{n+1} \quad (3.2)$$

όπου

$\varphi(r)$ είναι η πλήρως κανονικοποιημένη συνάρτηση Spline, η οποία δίνεται από τη σχέση

$$\phi(r) = -\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n \cdot (\sigma \cdot r)^{2n}}{n!n} = \ln\left(\frac{\sigma \cdot r}{2}\right)^2 + E_1\left(\frac{\sigma \cdot r}{2}\right)^2 + C_E \quad (3.3)$$

όπου

ln είναι ο φυσικός – νεπέριος αλγόριθμος

$E_1(x)$ είναι το εκθετικό ολοκλήρωμα (Abramowitz and Stegun, 1972)

C_E είναι η σταθερά Euler (Abramowitz and Stegun, 1972)

$r = \|s_i - s_0\|$ είναι η ευκλείδεια απόσταση μεταξύ της θέσης πρόβλεψης s_0 και της καθεμιάς από τις θέσεις s_i για τις οποίες υπάρχουν οι κατανεμημένες μετρήσεις

3.5. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΥΤΡΟΦΙΣΜΟΥ

Υπολογίστηκε ο Δείκτης Κατάστασης Ευτροφισμού (TSI) του Carlson (1977) για την Λίμνη Κάρλα, βάση των μέσων τιμών των συγκεντρώσεων της χλωροφύλλης-α, για την περίοδο Ιουνίου - Νοεμβρίου 2011. Ο υπολογισμός του δείκτη TSI έγινε σύμφωνα με την εξίσωση (Carlson, 1977):

$$TSI (Chl - \alpha) = 10 \cdot \left[6 - \frac{2,04 - 0,68 \cdot \ln(Chl - \alpha)}{\ln 2} \right] \quad (3.4)$$

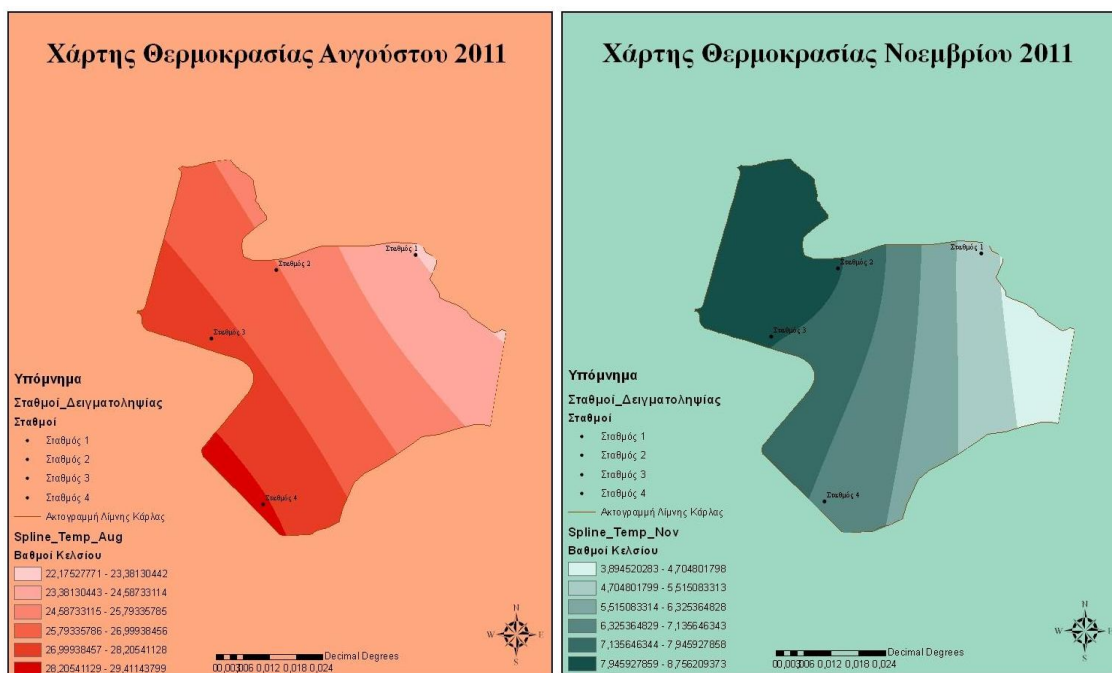
3.6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Από τις αναλύσεις προέκυψε ότι, οι παράμετροι οι οποίοι μετρήθηκαν την περίοδο Ιουνίου - Νοεμβρίου 2011 με το φορητό όργανο κυμάνθηκαν ως εξής: η θερμοκρασία από 7 μέχρι 31,4 °C, το διαλυμένο οξυγόνο από 2,85 έως 8,32 mg/L, η αγωγιμότητα από 2,6 έως 3,2 mS/cm, η θολερότητα από 14,8 έως 148,6, το pH από 7,43 έως 8,73 και τέλος, η αλατότητα από 0,11 έως 0,18 ‰. Οι αναλύσεις του εργαστηρίου την ίδια χρονική περίοδο έδειξαν ότι οι τιμές των νιτρικών κυμάνθηκαν από 0,005 έως 0,134 mg/L, των νιτρικών από 0,05 έως 1,35 mg/L, των αμμωνιακών από 0,029 έως 0,661 mg/L, και τέλος των ορθοφωσφορικών από 0,006 έως 0,180 mg/L.

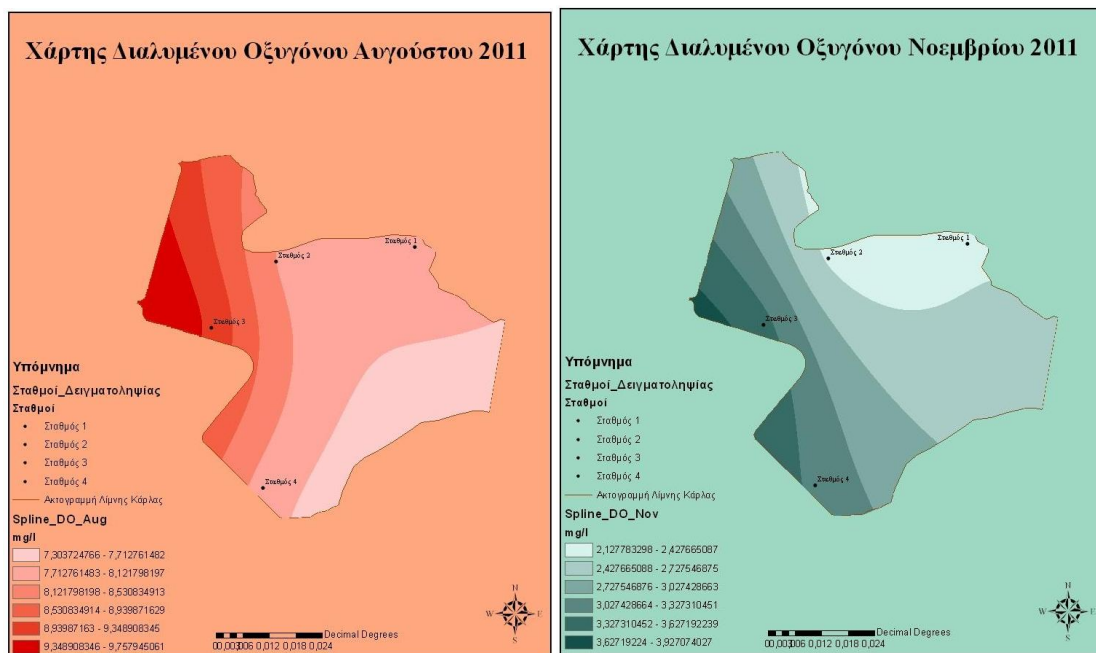
Όπως διαπιστώθηκε και από τα παραπάνω τα ποσοστά των νιτρικών στο συνολικό ανόργανο άζωτο (DIN, Dissolved Inorganic Nitrogen) ήταν τα λιγότερο σημαντικά. Τα νιτρώδη, δεν μπορούν να αξιολογηθούν εμπειριστικά, γιατί είναι μια πολύ ασταθής κατάσταση μεταξύ των νιτρικών και των αμμωνιακών. Στον αντίποδα, τα ποσοστά των νιτρικών επικρατούν καθώς συγκεντρώνουν το μεγαλύτερο ποσοστό στο συνολικό ανόργανο άζωτο, με δεύτερες τις συγκεντρώσεις των αμμωνιακών ιόντων.

Τέλος, οι τιμές της χλωροφύλλης-α κυμάνθηκαν από 184,107 μέχρι 381,180 mg/m³. Σύμφωνα με τον Δείκτη Κατάστασης Ευτροφισμού (TSI) (σχέση 3.4), ο οποίος είναι ίσος με 60,6, η λίμνη Κάρλα κατατάσσεται στις ευτροφικές λίμνες.

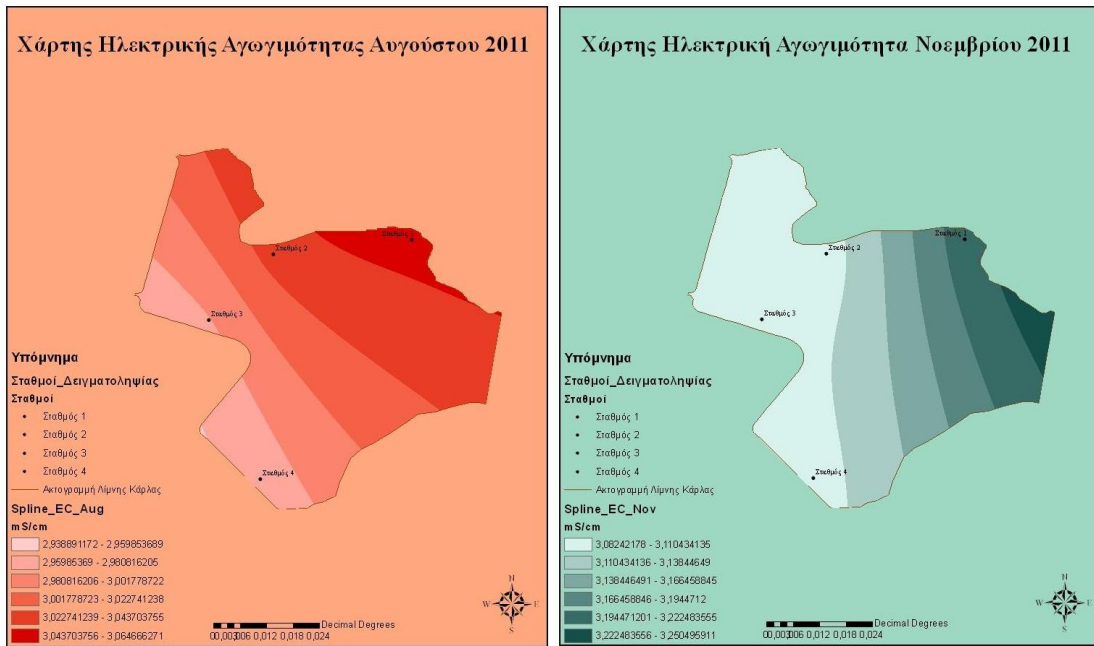
Στην συνέχεια παρατίθενται οι ισοποσοτικοί – ισορροπιατικοί χάρτες κλίμακας 1: 50.000 οι οποίοι προέκυψαν από το λογισμικό ArcMap και την επεκτασή Spatial Analyst και εμφανίζουν την γεωγραφική κατανομή των πιο σημαντικών παραμέτρων που μετρήθηκαν στη λίμνη και οι οποίες είναι: η θερμοκρασία (°C), το διαλυμένο οξυγόνο (DO, Dissolved Oxygen), η ηλεκτρική αγωγιμότητα (ECw), τα νιτρικά ιόντα (NO₃ – N), τα αμμωνιακά ιόντα (NH₄ – N), τα ορθοφωσφορικά ιόντα (PO₄ – P) και η χλωροφύλλη-α (Chl – a). Οι παρακάτω χάρτες προκύπτουν από την εφαρμογή της μεθόδου “RBF” και “IDW” για τους μήνες Αύγουστο και Νοέμβρη του 2011. Λόγω οικονομίας χώρου παρουσιάζεται μόνο η μέθοδος “RBF”, η οποία έδωσε καλύτερα αποτελέσματα από την μέθοδο “IDW”, όπως αναλυτικά θα εξηγηθεί στην συνέχεια.



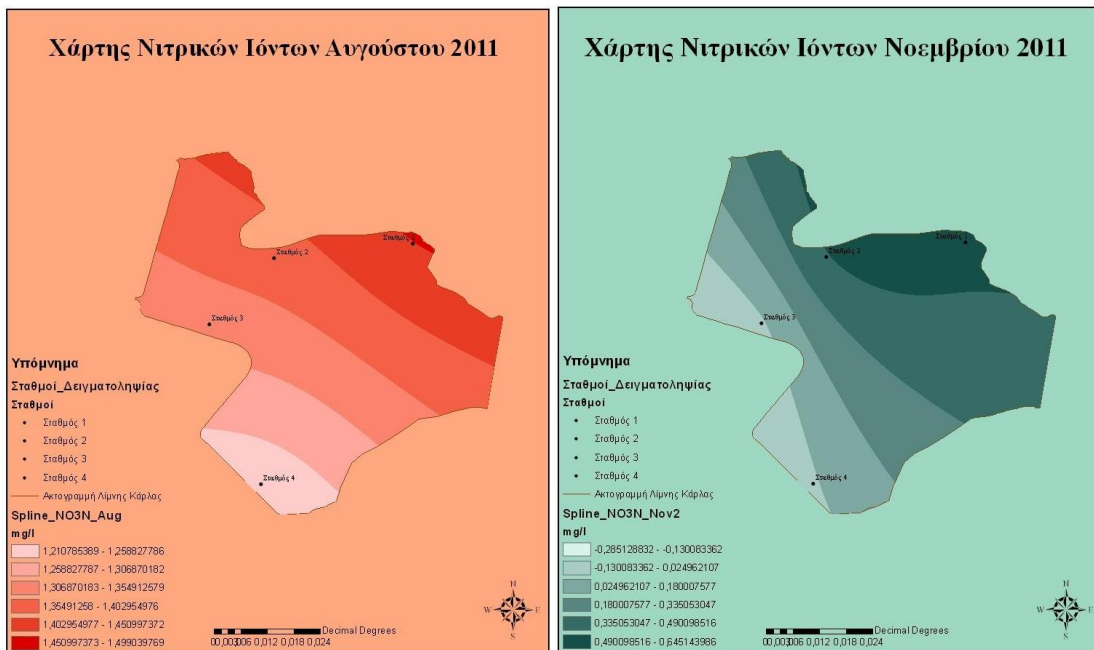
Σχήμα 1: Χάρτης επιφανειακής Θερμοκρασίας για το μήνα Αύγουστο και Νοέμβριο του 2011 με την μέθοδο “RBF”



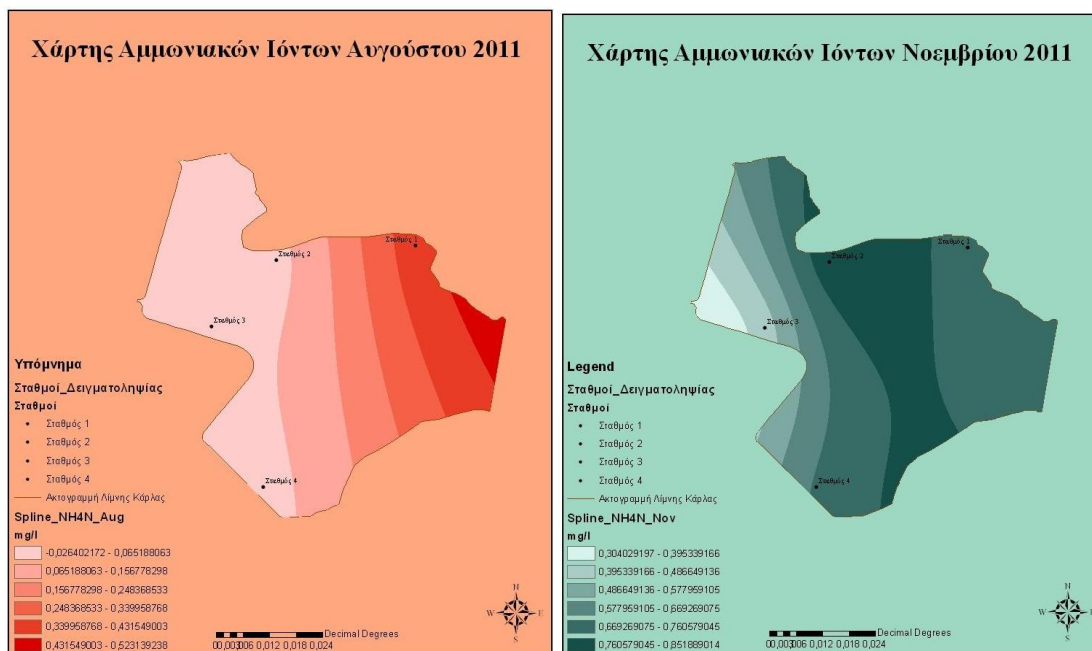
Σχήμα 2: Χάρτης Διαλυμένου Οξυγόνου για το μήνα Αύγουστο και Νοέμβριο του 2011 με τη μέθοδο “RBF”



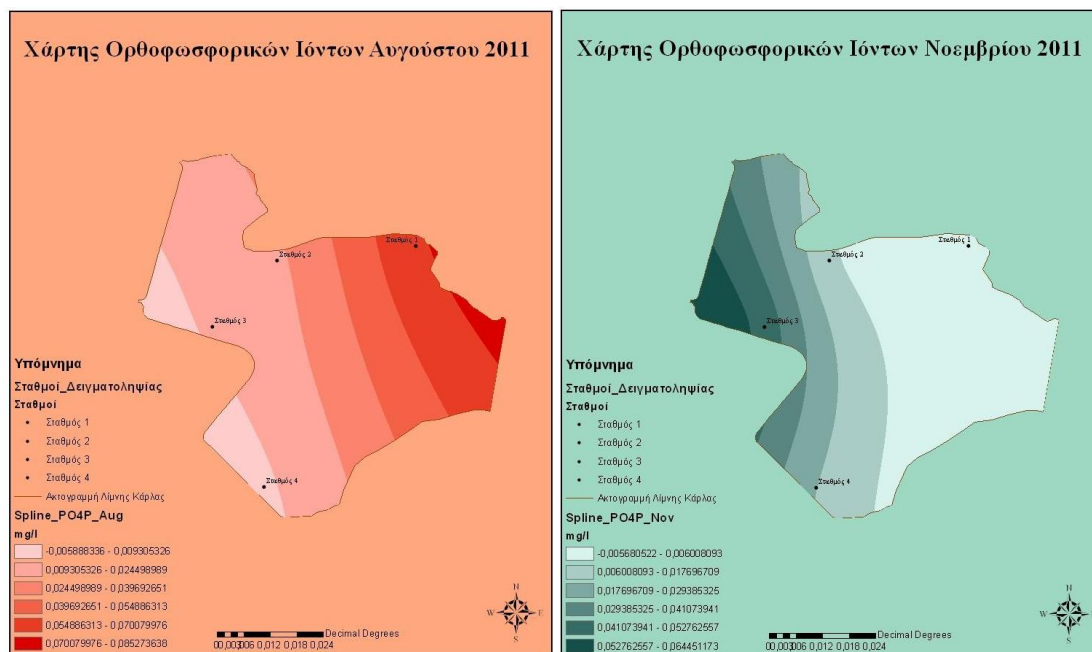
Σχήμα 3: Χάρτης Ηλεκτρικής Αγωγιμότητας για το μήνα Αύγουστο και Νοέμβριο του 2011 με τη μέθοδο “RBF”



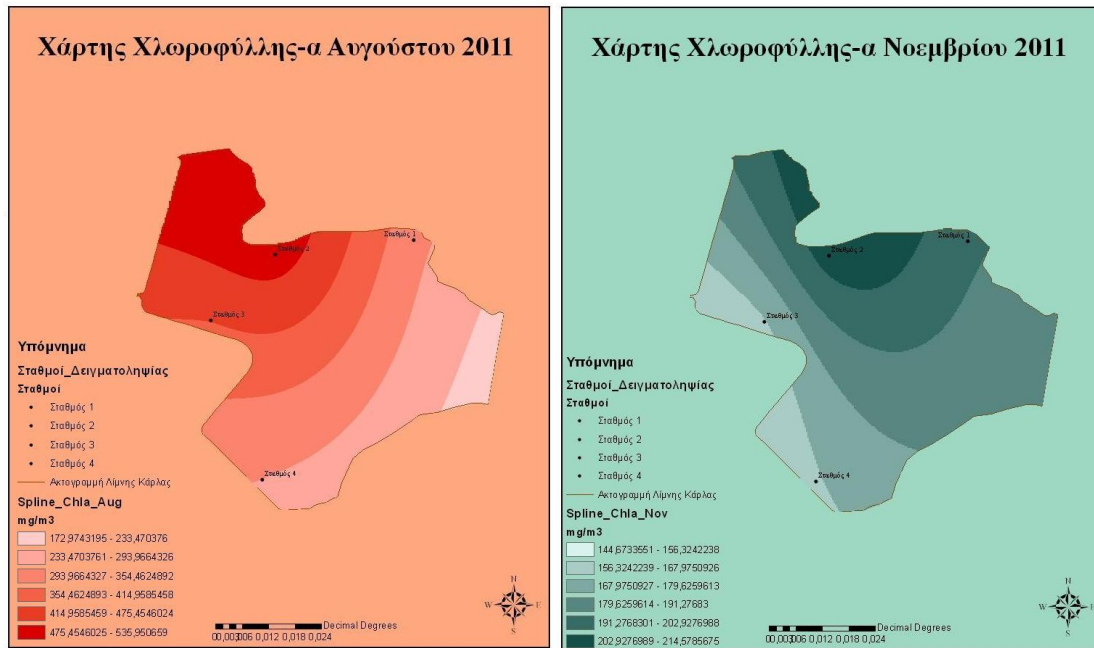
Σχήμα 4: Χάρτης Νιτρικών Ιόντων για το μήνα Αύγουστο και Νοέμβριο του 2011 με τη μέθοδο “RBF”



Σχήμα 5: Χάρτης Αμμωνιακών Ιόντων για το μήνα Αύγουστο και Νοέμβριο του 2011 με τη μέθοδο “RBF”



Σχήμα 6: Χάρτης Ορθοφωσφορικών Ιόντων για το μήνα Αύγουστο και Νοεμβρίου του 2011 με τη μέθοδο “RBF”



Σχήμα 7: Χάρτης Χλωροφύλλης-α για το μήνα Αύγουστο και Νοέμβρη του 2011 με τη μέθοδο “RBF”

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Αρχικά, για τη λίμνη Κάρλα δεν υπήρχαν επαρκείς χρονοσειρές δεδομένων αφού ούτε ο Φορέας Διαχείρισης της Περιοχής (Π.Ο.Κα.Μα.Κε.Βε.) είχε ξεκινήσει επίσημα το πρόγραμμα τακτικής παρακολούθησης, αλλά κάποιες αρχικές μετρήσεις σε δοκιμαστικό επίπεδο. Η εξέταση των παραπάνω φυσικοχημικών παραμέτρων και των συγκεντρώσεων τους οδήγησε στα εξής συμπεράσματα:

- Με βάση τις τιμές της χλωροφύλλης-α και το Δείκτη Ευτροφισμού του Carlson ο οποίος βρέθηκε 60,6, η λίμνη κατατάσσεται στις ευτροφικές. Το 2010 ο αντίστοιχος δείκτης είχε βρεθεί 85,8 (Papadimitriou *et al.*, 2011) με αποτέλεσμα η λίμνη να κατατάσσεται στις υπερτροφικές.
- Τα ποσοστά των νιτρικών στο συνολικό ανόργανο άζωτο επικράτησαν κατά το έτος 2011 σε σχέση με τα αμμωνιακά γεγονός που μπορεί να προέρχεται από τις χαμηλές συγκεντρώσεις οξυγόνου.
- Τα αμμωνιακά, βρίσκονται σε χαμηλά επίπεδα, κάτω από το ανώτερο επιτρεπτό όριο στις λίμνες, που είναι το 1 mg/L για την διαβίωση των ψαριών των γλυκέων υδάτων, σημειώνοντας μια ακραία τιμή για το 2011 στα 0,393 mg/L στο σταθμό 1.
- Το διαλυμένο οξυγόνο κυμαίνεται από χαμηλά (2,85 mg/L) έως υψηλά (8,32 mg/L) επίπεδα και δεν έχει φτάσει ποτέ σε επίπεδο ανοξικών συνθηκών.
- Το pH της λίμνης σημείωσε πτώση από τα προηγούμενα χρόνια με αποτέλεσμα να παραμένει μέσα στα φυσιολογικά όρια των λιμνών που είναι pH 5,5 – 8,5.
- Η ηλεκτρική αγωγιμότητα, παρότι κατά το έτος 2011 σημείωσε πτώση στις τιμές σε σχέση με τα προηγούμενα έτη (Papadimitriou *et al.*, 2011), διατηρείται ακόμη σε υψηλά επίπεδα καθώς ξεπερνάει το ανώτερο επιτρεπτό όριο που είναι 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ και η ελάχιστη τιμή της είναι 2400 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Σύμφωνα με τα παραπάνω καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η λίμνη Κάρλα χαρακτηρίζεται ως μία ευτροφική λίμνη, με υψηλό φορτίο θρεπτικών σε σχέση με τον

όγκο του νερού. Η υδάτινη στήλη παρουσιάζει μεγάλη θολερότητα, η οποία αυξάνει με το χρόνο που υποδηλώνει υψηλή βιολογική δραστηριότητα.

Εφαρμόστηκαν και συγκρίθηκαν μεταξύ τους δύο μέθοδοι προσομοίωσης, από τις οποίες η μία είναι η μέθοδος “IDW” και η δεύτερη είναι η μέθοδος “RBF”. Οι αλγόριθμοι και των δύο μεθόδων είναι προσδιοριστικοί – αιτιοκρατικοί και ύστερα από σύγκριση μεταξύ τους προέκυψε ότι η μέθοδος “RBF” είναι η πιο αξιόπιστη, γιατί οι χάρτες των ισοποσοτικών καμπυλών παρεμβολής δίνουν πιο ομοιόμορφη κατανομή στην επιφάνεια της λίμνης και διέρχονται εγγύτερα από τα σημεία μέτρησης. Η μέθοδος “IDW” δεν μπορεί να αποδώσει με αξιοπιστία τις ισοποσοτικές καμπύλες των τεσσάρων σημείων με αποτέλεσμα να μην γίνεται ομοιόμορφη η κατανομή τους γύρω από τα σημεία δειγματοληψίας, παρά το ότι σε παλαιότερες μελέτες (Ματζαφλήρη, 2007) η μέθοδος “IDW” λειτούργησε καλύτερα για 3 και 5 σημεία. Αποτέλεσμα ήταν, στην παρούσα μελέτη η μέθοδος “RBF” να δώσει μια πιο σαφή αποτύπωση της κατανομής των ισοποσοτικών καμπυλών των φυσικοχημικών παραμέτρων που εξετάστηκαν για την λίμνη Κάρλα.

Λόγω της σημαντικής αξίας που έχει η διατήρηση της λίμνης Κάρλας, έχει περιληφθεί στο δίκτυο των Ελληνικών Προστατευμένων Περιοχών. Επίσης, η λίμνη Κάρλα αποτελεί περιοχή Κοινοτικού ενδιαφέροντος του Πανευρωπαϊκού Οικολογικού Δικτύου Natura 2000 με τον κωδικό GR1420004, καθώς θεωρείται πολύ σημαντικό οικοσύστημα και σε σχέση με την βιοποικιλότητα της αλλά και εξαιτίας του γεγονότος της ανασύστασης της στην περιοχή της πρώην λίμνης Κάρλας. Τέλος, το ουσιαστικότερο εργαλείο για την λήψη αποφάσεων και την σωστή διαχείριση της λίμνης Κάρλας, αποτελεί η συστηματική παρακολούθηση της κατάστασης των υδάτων της λίμνης και του ευρύτερου φυσικού περιβάλλοντος. Η τακτική και επαναλαμβανόμενη παρακολούθηση διαφόρων φυσικοχημικών και βιολογικών παραμέτρων, τόσο *in situ* όσο και τηλεμετρικά, είναι σωτήρια για άμεση επέμβαση στο οικοσύστημα. Όσο περισσότερα και καλύτερα καταγεγραμμένα είναι τα σημεία αυτά, τόσο πιο αξιόπιστα και τα αποτελέσματα της παρακολούθησης, τα οποία με την κατάλληλη αποτίμησή τους, επιτρέπουν εφαρμογή κατάλληλων διαχειριστικών μέτρων.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Abramowitz, M. and Stegun, I.A., 1972. *Handbook of mathematical functions*. National Bureau of Standards, Applied Mathematics Series – 55, 10th Edition, 1972.
- Bishop, C., 1995. *Neural Networks for Pattern Recognition*, Oxford Press, NY.
- Carlson, R., 1977. *A trophic state index*. Limnology and Oceanography, 22(2): 361-369.
- Dingman, L., 1994. *Physical Hydrology*. Prentice Hall, NJ.
- Gerakis, P.A., 1992. *Former Lake Karla rehabilitation case study*. Conservation and management of Greek wetlands (P.A. Gerakis, editor), IUCN, Gland, Switzerland, pp. 429-489.
- Laspidou, C., Kakoulidis, A., and Loukas, A., 2010. *Ecosystem simulation modeling of nitrogen dynamics in restored lake Karla in Greece*. Desalination and Water Treatment, 33: 61-67, DOI: 10.5004/dwt.2011.2618.
- Loukas, A., Mylopoulos, N., Vasiliades, L., Tarnanas, H., Polykretis, J. and Dimitriou, A., 2005. *Sustainable water resources management in Pinios river and lake Karla basins. Thessaly, Greece*. Proc. 6th International Conference, European Water Research Association (EWRA) Menton, France.
- Matzafleri, N., Psilovikos, Ar. And Blanta, A., 2009. *Water quality monitoring and modeling in lake Kastoria, using GIS*. Assessment and Management of Pollution Sources. Water Resources Management, DOI 10.1007/s11269-009-9431-4.

- Moustaka, E., Mylopoulos, N. and Loukas, A., 2002. *Assessment of the restored lake Karla operation under different hydrological and water demand scenarios*. Proceedings of the 6th International Conference of Protection and Restoration of the Environment, Skiathos, Greece pp: 207-215.
- Odermatt, D., Heege, T., Nieke, J., Kneubuhler, M. and Itten, K., 2008. *Water quality monitoring for lake constance with a physically based algorithm for MERIS Data*. Sensors 2008, 8:4582-4599; DOI: 10.3390/s8084582.
- Oikonomou, A., Katsiapi, M., Berillis, P., Moustaka-Gouni, M. and Kormas, K.A., 2010. *Microbial gangs are taking over the water column of a reconstructed lake*. Proc. 14th International Conference on Harmful Algal Blooms, Crete.
- Papadimitriou, Th., Stampouli, Z. and Kagalou, If., 2011. *Preliminary results on the cyanotoxicity in the "new" Lake Karla (Thessaly-Greece)*. Proceedings of the 12th International Conference on Environmental Science and Technology, Rhodes, Greece.
- Psilovikos Ar., Margoni S. and Psilovikos Ant., 2006. *Simulation and trend analysis of the water quality monitoring daily data in Nestos River Delta. Contribution to the sustainable management and results for the years 2000–2002*. Environmental Monitoring and Assessment, 116(1 – 3): 543 – 562.
- Sidiropoulos, P., Papadimitriou, Th., Stampouli, Z. and Kagalou If., 2011. *Past and future concepts for conservation of the re-constructed Lake Karla (Thessaly)*. Proc. 16th International Symposium on Environmental Pollution and its Impact on Life in the Mediterranean Region (MESAEP), Ioannina, Greece.
- Zalidis, G., and Gerakis, P.A., 1999. *Research Evaluating Sustainability of Watershed Resources Management through Wetland Functional Analysis*. Environmental Management 24(2): 193-207.
- Zalidis, G., Takavakoglou, V., Panoras, A., Bilas, G. and Katsavouni, S., 2004. *Re-establishing a sustainable wetland at former Lake Karla, Greece, using Ramsar restoration guidelines*. Environmental Management, 34:875-886.
- Zalidis, G., Takavakoglou, V., Panoras, A., Bilas, G. and Katsavouni, S., 2005. *Re-Establishing a Sustainable Wetland at Former Lake Karla, Greece, Using Ramsar Restoration Guidelines*. Environmental Management 34(6): 875–886.
- Ματζαφλέρη, Ν. Α., 2007. *Χωρική προσομοίωση της ποιότητας των υδάτων της λίμνης Καστοριάς*. Μεταπτυχιακή Διατριβή, Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών, Τμήμα Γεωπονίας, Ιχθυολογίας και Υδάτινου Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.
- Μπαρτζώκα – Τσιόμπρα, Μ. και Ψύλλος Ι., 2011. *Ιστορική αναδρομή της υπό επανασύσταση λίμνης Κάρλας και επιχειρηματικό πλάνο για την ανάδειξη της περιοχής*. Διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, σελ. 256.
- Παπανίκος, Ν., 2008. *Ολοκληρωμένη διαχείριση των υδατικών πόρων στην υπό επανασύσταση λίμνη Κάρλα Θεσσαλίας*. Μεταπτυχιακή διατριβή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.
- Παπανίκος, Ν., Ψιλοβίκος, Αρ., Σαπουντζής, Μ. και Ματσίωρη Σ., 2009. *Τα έργα επανασύστασης και λειτουργίας της λίμνης Κάρλας (Θεσσαλία) και ο πολλαπλός σκοπός της*. Πρακτικά του 2^{ου} κοινού Συνεδρίου ΕΥΕ – ΕΕΔΥΠ, Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Πόρων σε Συνθήκες Κλιματικών Αλλαγών, Τόμος Ι, σελ. 59 – 66, Βόλος.
- Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε., 2002. *Ειδική Περιβαλλοντική Μελέτη Κάρλας – Μαυροβούνιου – Κεφαλόβρυσου-Βελεστίνου, Τεύχος (I & II)*. ΥΠΕΧΩΔΕ, Γενική Διεύθυνση Περιβάλλοντος, Διεύθυνση Περιβαλλοντικού Σχεδιασμού, Τμήμα Διαχείρισης Φυσικού Περιβάλλοντος, Αθήνα.
- Ψιλοβίκος, Α., 2010. *Αειφορική Διαχείριση Υδατικών Πόρων*. Πανεπιστημιακές παραδόσεις, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

**ΜΙΑ ΥΒΡΙΔΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΛΟΓΗ
ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΔΡΑΣΕΩΝ ΣΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ**
Μιχάλης Σπηλιώτης

Μεταδιδακτορικός Ερευνητής ΕΜΠ σε συνεργασία με U.P.M., Κέντρο Εκτίμησης Φυσικών Κινδύνων και Προληπτικού Σχεδιασμού, Εργαστήριο Εγγειοβελτιωτικών Έργων και Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, Ελλάδα -Αθήνα, Τηλ.: 210-7722700, e-mail: m.spiliotis@gmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σύμφωνα με την πρακτική που υιοθετείται στα Σχέδια Διαχείρισης Υδατικών Πόρων με βάση τις κοινοτικές οδηγίες, η επιλογή των έργων βασίζεται ουσιαστικά στην Ανάλυση Κόστους – Αποτελεσματικότητας (CEA). Η εργασία αυτή ορμώμενη από τη CEA, παρουσιάζει μία νέα υβριδική μέθοδο επιλογής πολλαπλών δράσεων για τη διαμόρφωση των σχεδίων διαχείρισης υδατικών πόρων σε λεκάνη απορροής. Τα βασικά μεθοδολογικά εργαλεία της προτεινόμενης μεθόδου εκτός από την CEA, είναι η 0-1 βελτιστοποίηση καθώς και στοιχεία της ασαφούς λογικής και συνόλων προκειμένου η τελική αξιολόγηση των δράσεων να περιλαμβάνει εκτός της οικονομικής, τις κοινωνικές, τεχνικές και περιβαλλοντικές διαστάσεις της διαχείρισης υδατικών πόρων και να είναι η τελική λύση ευέλικτη και προσαρμοστική.

**AN HYBRID METHOD FOR SELECTING MULTIPLE
WATER ACTIONS IN WATER RESOURCES MANAGEMENT**
Mike Spiliotis

Postdoctoral Researcher, National Technical University of Athens, cooperation with U.P.M., Centre for the Assessment of Natural Hazards and Proactive Planning and Laboratory of Reclamation Works and Water Resources Management, School of Rural and Surveying Engineering, Athens – Greece, +30 210 7722700, e-mail: m.spiliotis@gmail.com

ABSTRACT

Based on EU directives the selection of water projects is based primarily on cost - effectiveness analysis (CEA). This article starting from the presentation of the CEA method in water resources management problems, proposes a new hybrid method for selecting multiple water actions. The main methodological tools of the proposed method, apart from the CEA, are the 0-1 optimization and principles of fuzzy sets and logic. By following the proposed method, the opportunity to incorporate the various technical, environmental and social dimensions in the water management process is provided. In addition we can modulate a complex and adaptive final solution.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η λειψυδρία είναι ένας καθολικός όρος που αναφέρεται σε μόνιμη η περιστασιακή περίπτωση όπου η ζήτηση υπερβαίνει τους αξιοποιήσιμους υδατικούς πόρους. Τα αίτια της λειψυδρίας μπορεί να είναι φυσικά είτε ανθρωπογενή, όπως η αύξηση του πληθυσμού, η έλλειψη υποδομών κ.ά. Σε αυτό το πλαίσιο, η λειψυδρία περιλαμβάνει φαινόμενα όπως η ξηρότητα, η ξηρασία, η ερημοποίηση και το έλλειμμα νερού. Η διάκριση σε λειψυδρία μακρού χρονικού ορίζοντα έχει ως στόχο να καταδείξει την αδυναμία των εκμεταλλεύσιμων υδατικών πόρων να καλύψουν τη παρούσα ή και τη μελλοντική ζήτηση μίας ευρύτερης περιοχής (Tsakiris and Spiliotis, 2011).

Ενδεικτικά, ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο μέτρο λειψυδρίας είναι ο δείκτης του Falkenmark ή "δείκτης υδατικού ελλείμματος" (Falkenmark et al., 1989). Ο δείκτης του Falkenmark στηρίζεται στη διαθέσιμη ποσότητα νερού ανά κάτοικο και ανά χρονιά. Στον όρο διαθέσιμη ποσότητα νερού συμπεριλαμβάνεται η αστική, η αγροτική, η βιομηχανική και η ενεργειακή χρήση του νερού. Για τιμές του δείκτη μικρότερες από 1700 m³ ανά κάτοικο ανά χρόνο θεωρείται ότι υπάρχει έλλειμμα νερού. Για ποσότητες μικρότερες από 1000 m³/κάτοικο/ημέρα θεωρείται ότι υπάρχει λειψυδρία, ενώ για ποσότητες μικρότερες από 500 m³, υπάρχει καθοριστικό για την περιοχή πρόβλημα λειψυδρίας (Rijsberman, 2006). Προφανώς, ο δείκτης του Falkenmark θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως δείκτης για τη λειψυδρία μακρού χρονικού ορίζοντα.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό της λειψυδρίας είναι οι επιπτώσεις που έχει σε ένα διαφορετικό σύνολο χρηστών. Πράγματι, σχετικά πρόσφατα, μεγάλο μέρος της επιστημονικής κοινότητας που ασχολείται με τους υδατικούς πόρους κινείται σε ένα πλαίσιο αφομοίωσης αρχών της Συστημικής θεωρίας και συνακόλουθων μεθόδων κατά τη Διαχείριση Υδατικών Πόρων (ΔΥΠ). Θεμέλιος λίθος της Συστημικής προσέγγισης αποτελεί η έννοια του συστήματος. Ο όρος «σύστημα» προέρχεται από το αρχαιοελληνικό ρήμα «συνίστημι» το οποίο σημαίνει «συγκροτώ, συνδυάζω, συνδέω, ενώνω» (Μηλάκης, 2006). Στη Συστημική επιστήμη, το σύστημα ορίζεται ως ένα αντικείμενο μελέτης, το οποίο αποτελείται από ένα σύνολο συστατικών, μέρος των οποίων ή και όλα συνδέονται ή αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Τα βασικά χαρακτηριστικά ενός συστήματος μπορούν να κωδικοποιηθούν ως εξής: *ολότητα, αλληλεπίδραση, πολυπλοκότητα και σχέση με το περιβάλλον του* (Σπηλιώτης, 2007). Προκύπτει λοιπόν ότι για μία ολοκληρωμένη προσέγγιση στη ΔΥΠ θα πρέπει να ληφθούν υπόψη όλες οι διαστάσεις των υδατικών συστημάτων.

Στην εργασία αυτή, γίνεται μία παρουσίαση της μεθόδου κόστους - αποτελεσματικότητας προσανατολισμένης σε προβλήματα λειψυδρίας, παρουσιάζοντας τα πλεονεκτήματά αλλά και τα μειονεκτήματά της, καθώς και τα γκρίζα σημεία της μεθόδου. Κατόπιν, προτείνεται μία τροποποίηση της μεθόδου με την βοήθεια των ασαφών συνεπαγωγών, και τη χρήση της 0-1 βελτιστοποίησης για τη διαμόρφωση της τελικής λύσης, αποτελούμενης από ένα σύνολο υδατικών δράσεων.

2. ΜΙΑ ΚΡΙΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΟΣΤΟΥΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗ ΔΥΠ

Αν και η ανάλυση κόστους - αποτελεσματικότητας έχει προταθεί από την Ευρωπαϊκή κοινότητα στα κείμενα οδηγούς (European Commission, 2003), υπάρχουν αρκετά ερωτηματικά για την ίδια την εφαρμογή της μεθόδου αλλά και τη χρήση της ως αποκλειστικού εργαλείου για την ταξινόμηση διαφόρων υδατικών δράσεων αξιοποίησης και προστασίας των υδατικών πόρων.

Στη γενική περίπτωση, η ανάλυση κόστους – αποτελεσματικότητας προσδιορίζεται από τον αντίστοιχο λόγο του κόστους σε ένα χρονικό διάστημα προς την αντίστοιχη αποτελεσματικότητα στο ίδιο χρονικό διάστημα.

Σε προβλήματα Διαχείρισης Υδατικών Πόρων (ΔΥΠ) με δεδομένη την περιπλοκότητα των υδατικών συστημάτων και τη στοχαστική τους φύση, θα πρέπει να διευκρινιστεί ότι ως "παραγόμενες" διαθέσιμες ποσότητες νερού (αποτελεσματικότητα) από μία υδατική δράση θα πρέπει να θεωρηθούν οι ετήσιες απολήψεις έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η αποδεκτή αξιοπιστία (που αλλάζει ανάλογα με το χρήστη νερού) αποδεκτής ποιότητας (που επίσης συναρτάται από το χρήστη νερού).

Το παραγόμενο νερό μπορεί να προκύπτει από έργα αξιοποίησης υδατικών πόρων, από έργα εξοικονόμησης νερού (π.χ. εκσυγχρονισμός υδραυλικών δικτύων διανομής, μέτρα περιορισμού της ζήτησης κ.ά) και από έργα προστασίας υδατικών πόρων (π.χ. βιολογικός καθαρισμός αστικών λυμάτων). Ωστόσο, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η αλληλεπίδραση των έργων ταμίευσης στη λεκάνη απορροής και η μακροσκοπική οπτική του συνακόλουθου υδατικού σώματος. Για παράδειγμα, η βελτίωση της ποιότητας σε ένα τμήμα του υδατορρέματος δεν θα έχει καμία σημαντική επίπτωση σε τμήματα του υδατορρέματος ανάντη, γεγονός ιδιαίτερα σημαντικό, αν υπάρχει ανάντη σημαντικό πρόβλημα ποιότητας (Berbel, 2011).

Το ετήσιο συνολικό κόστος περιλαμβάνει το ετήσιο λειτουργικό κόστος αλλά και τις αρχικές δαπάνες μετατρεπόμενες σε ισοδύναμο ετήσιο κόστος. Το ετήσιο λειτουργικό κόστος συνήθως θεωρείται σταθερό, ενώ σταθερές θεωρούνται και οι ποσότητες του νερού που αποδίδονται από το έργο (Aulong et al., 2009):

$$\left(\frac{C}{W}\right)_a = \frac{\left(\frac{rI_0(I+r)^T}{(I+r)^T - I} + AOC\right)}{W_a} \quad (2.1)$$

όπου I_0 η αρχική δαπάνη και AOC το ετήσιο κόστος και T ο χρονικός ορίζοντας του έργου.

Ένα σημείο το οποίο χρειάζεται περισσότερη διευκρίνηση είναι η σύγκριση υδραυλικών έργων με διαφορετικό χρονικό ορίζοντα. Συνήθως, η αρχική δαπάνη μετατρέπεται σε ετήσια δαπάνη με βάση το χρονικό ορίζοντα κάθε δράσης που όμως δεν είναι συνήθως κοινός. Ένας τρόπος για μια ορθολογικότερη συμπερίληψη του διαφορετικού χρόνου ζωής κάθε υδατικής δράσης είναι η θεώρηση *εικονικού χρονικού ορίζοντα μελέτης* πολλαπλάσιου με τη δράση του μικρότερου χρονικού ορίζοντα. Κατόπιν, σε αυτόν τον εικονικό χρονικό ορίζοντα, τα έργα μικρότερου χρονικού ορίζοντα επαναλαμβάνονται μέχρι την κάλυψη όλου του εικονικού χρονικού ορίζοντα μελέτης (Heathcote, 1998).

Εναλλακτικά, οι Aulong et al. (2009) πρότειναν την αναγωγή όλων των όρων του κόστους σε αρχικές δαπάνες. Με αυτόν τον τρόπο υποστήριξαν ότι επιταχύνεται μία κοινή χρονική βάση μελέτης. Επιπλέον, η θεώρηση ενός εικονικού επιτοκίου για την αναγωγή της ετήσιας αποτελεσματικότητας νερού σε μία αρχική αξία ποσότητας νερού είναι μία ενδιαφέρουσα ιδέα, αλλά εμπερικλείει στοιχεία μίας υποκειμενικής εκτίμησης. Ο λόγος κόστους – αποτελεσματικότητας νερού σε αρχικές αξίες διαμορφώνεται όπως παρακάτω:

$$\left(\frac{C}{W}\right) = \frac{PV(C)}{PV(W)} \quad (2.2)$$

όπου $PV(C), PV(W)$ είναι οι “παρούσες αξίες” του κόστους και της ετήσιας παραγόμενης ποσότητας νερού αντιστοίχως.

Ένα από τα μειονεκτήματα της ανάλυσης κόστους – αποτελεσματικότητας σε ετήσια βάση, είναι ότι κατατείνει στην επιλογή μεγάλων υδραυλικών έργων που πολλές φορές δεν είναι φιλικά προς το περιβάλλον (π.χ. Aulong et al., 2009). Οι Aulong et al. (2009) επίσης, υποστήριξαν με παραδείγματα από την Ιορδανία και το Λίβανο ότι η ανάλυση κόστους – αποτελεσματικότητας νερού σε όρους παρούσας αξίας βελτιώνει ελαφρώς αυτή την τάση εφόσον, το αρχικό κόστος ενός μεγάλου έργου με κατά τεκμήριο μεγάλο χρόνο ζωής δεν κατανέμεται σε αυτό το μεγάλο χρόνο ζωής. Εντούτοις, εφαρμόζοντας τη μέθοδο του *εικονικού χρονικού ορίζοντα μελέτης* η αναγωγή των ποσών σε αρχικές δαπάνες, ιδιαίτερα για έργα με μικρό χρονικό ορίζοντα, φαίνεται να μην προσδίδει κάποιο σημαντικό πλεονέκτημα στην ανάλυση με βάση την παρούσα αξία.

Μία άλλη πρόταση για τη συμπερίληψη της κοινωνικής και περιβαλλοντικής διάστασης των έργων, είναι η θεώρηση ενός ισοδύναμου κοινωνικού ή περιβαλλοντικού κόστους, όπως έχει παρομοίως προταθεί στη μέθοδο κόστους-οφέλους. Ωστόσο, όπως έχει επισημανθεί, η αποτίμηση της περιβαλλοντικής ή κοινωνικής ζημίας ή οφέλους είναι πολύ δύσκολο να αποτιμηθεί αντικειμενικά με χρηματικούς όρους.

Συγκρίνοντας τη μέθοδο κόστους – αποτελεσματικότητας (CEA) με την ανάλυση κόστους οφέλους (Cost Benefit Analysis, CBA) θα μπορούσε να υποστηριχτεί ότι η ανάλυση κόστους – αποτελεσματικότητας είναι λιγότερο υποκειμενική, εφόσον υπεισέρχεται η ίδια η διαθεσιμότητα νερού από κάθε δράση με ευθύ και όχι έμμεσο τρόπο, όπως στην CBA. Από την άλλη πλευρά, η CEA δε λαμβάνει υπόψη με ευθύ τρόπο την περιβαλλοντική και κοινωνική διάσταση των υδατικών δράσεων, ενώ δε δίνει τη δυνατότητα για την εμπλοκή των χρηστών νερού στην απόφαση και την περιβαλλοντική αναβάθμιση μολονότι, αυτοί οι στόχοι είχαν περιγραφεί σε άλλα κείμενα της κοινότητας. Περαιτέρω, προτείνονται δύο σημεία που μπορούν να βελτιώσουν τη μέθοδο:

- Μία τροποποίηση της CBA προκειμένου η αξιολόγηση των λύσεων να συμπεριλάβει τη κοινωνική, περιβαλλοντική και τεχνική διάσταση των έργων.
- Η χρήση της 0-1 βελτιστοποίησης προκειμένου να υπάρξει ένα ευέλικτο και προσαρμοστικό χρονοδιάγραμμα των υδατικών δράσεων.

3. ΥΒΡΙΔΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΑΣΑΦΗ ΣΥΝΕΠΑΓΩΓΗ

Το ασαφές σύνολο είναι μία απεικόνιση από το υπερσύνολο X στο κλειστό διάστημα $[0, 1]$:

$$\mu_G: X \rightarrow [0, 1] \quad (3.3)$$

Τα ασαφή σύνολα περιγράφονται από τη συνάρτηση συμμετοχής μ , που δηλοί τον βαθμό ικανοποίησης της ιδιότητας που χαρακτηρίζει το ασαφές σύνολο από ένα στοιχείο του υπερσυνόλου X (π.χ. Papadopoulos and Sirpi, 1999). Για τη σύνθεση των ασαφών συνόλων μπορούν να χρησιμοποιηθούν μία πλειάδα από ασαφείς τελεστές. Η πιο “συντηρητική” προσέγγιση στη λήψη αποφάσεων είναι η χρήση των ασαφών τομών. Ευρέως χρησιμοποιείται ο τελεστής της \min -τομής που είναι και η τομή της κλασικής λογικής (Klir and Yuan, 1995):

$$\mu(x) = \min(x_1, \dots, x_n) \quad (3.4)$$

Είναι προφανές, ότι επιλέγοντας την ασαφή τομή για τη σύνθεση των κριτηρίων η ασαφής σύνθεση δεν μπορεί να δώσει τιμές μεγαλύτερες από τον βαθμό ικανοποίησης του χαμηλότερου σε απόδοση κριτηρίου.

Εντούτοις, στη λήψη των αποφάσεων συχνά χρησιμοποιούνται περισσότερο αντισταθμιστικοί τελεστές. Σε αυτή την εργασία, στοχεύοντας κύρια, σε μία καλή απόδοση του λόγου κόστους – αποτελεσματικότητας, αλλά και στην διαμόρφωση λύσεων με κοινωνική, περιβαλλοντική και τεχνική ευαισθησία, προτείνεται η συνδυασμένη χρήση της \min - τομής και κατάλληλης ασαφούς συνεπαγωγής.

Στη συμβατική λογική η πρόταση 'P συνεπάγεται Q', όπου η πρόταση P ορισμένη στο σύνολο A και η πρόταση Q ορισμένη στο σύνολο B, είναι ισοδύναμη με την ένωση του συμπληρωματικού συνόλου A και του συνόλου B (Ross, 2004):

$$(P \rightarrow Q) \equiv (\bar{A} \cup B) \equiv (\text{είτε 'όχι A' ή 'B'}) \quad (3.5)$$

Το συμπλήρωμα της κλασικής συνεπαγωγής είναι η διαφορά μεταξύ των συνόλων A και B (Σχ. 1):

$$\overline{(A \rightarrow B)} = A|B(\text{difference}) \quad (3.6)$$

Στο Σχ.1.α η λευκή περιοχή είναι το συμβατικό σύνολο A ενώ η γραμμοσκιασμένη περιοχή είναι το συμπλήρωμά του. Στο Σχ.1.β η γραμμοσκιασμένη περιοχή αναπαριστά τη συνεπαγωγή για τα συμβατικά σύνολα (ένωση του συμπληρώματος του συμβατικού συνόλου A με το συμβατικό σύνολο B), ενώ με λευκό χρώμα αναπαριστάται η διαφορά $A|B(\text{difference})$.

Η συνεπαγωγή της κλασικής λογικής μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στην περίπτωση των ασαφών συνόλων διευρυμένη μάλιστα με τη χρήση ποικίλων ασαφών τελεστών. Συνεπώς, μολονότι η συμβατική λογική με τις "απόλυτες" τιμές αληθείας μεταξύ 0 και 1 αντεδύκνεται σε πολλά προβλήματα λήψης αποφάσεων, η χρήση της ασαφούς λογικής και συνόλων, όπου δέχεται και τις ενδιάμεσες τιμές αληθείας, μπορεί να αποδώσει τη βαθμιαία αποτίμηση των κριτηρίων και να χρησιμοποιήσει αρχές της συμβατικής λογικής διευρυμένες από την οπτική των ασαφών συνόλων, για την τελική αξιολόγηση των εναλλακτικών. Η βασική ιδέα για την τροποποίηση της μεθόδου κόστους – αποτελεσματικότητας είναι η ασαφής ερμηνεία της λογικής πρότασης ότι η άρνηση του γεγονότος ότι ένας ικανοποιητικός λόγος κόστους – αποτελεσματικότητας οδηγεί σε περιβαλλοντικά αρνητικές λύσεις (όρος που εκφράζεται από το ασαφές σύνολο B' , $\beta' \in B'$), αρνητικά κοινωνικές (όμοια $\gamma' \in \Gamma'$) και αρνητικά τεχνικές λύσεις ($\delta' \in \Delta'$):

$$\mu(a, \beta, \gamma) \equiv \overline{(a \rightarrow \beta')} \cap \overline{(a \rightarrow \gamma')} \cap \overline{(a \rightarrow \delta')} \quad (3.7)$$

Από τις ασαφείς συνεπαγωγές επιλέχθηκε η R- συνεπαγωγή που ορίζεται ως εξής (Klir and Yuan, 1995):

$$J(a, b) = \sup \{c \in [0, 1] \mid T(a, c) \leq b\} \quad (\text{R- συνεπαγωγές}) \quad (3.8)$$

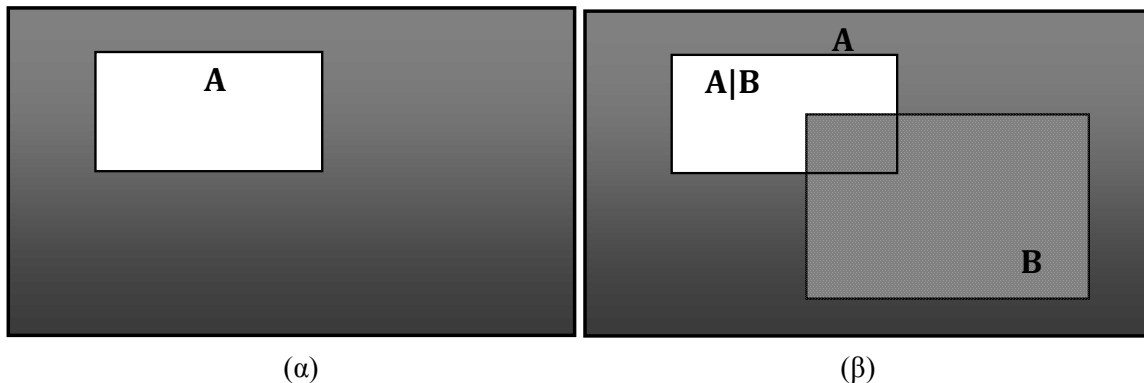
όπου T η ασαφής τομή. Η R - συνεπαγωγή είναι ιδιαίτερα αντισταθμιστική ενώ, έχει χρησιμοποιηθεί για να εκφράσει την έννοια ότι ένα σύνολο περικλείεται σε ένα άλλο.

Μία ιδιαίτερα επιθυμητή ιδιότητα είναι ότι με βάση τη R - συνεπαγωγή αν ο βαθμός ικανοποίησης του κριτηρίου κόστους – αποτελεσματικότητας είναι μικρότερος από το βαθμό ικανοποίησης των αρνητικών επιπτώσεων (π.χ. περιβαλλοντικών) τότε η εναλλακτική έχει μηδενική καταλληλότητα:

$$\text{αν } \alpha < \beta' \text{ τότε, } J(\alpha \rightarrow \beta') = 1, \text{ και τελικά: } \overline{J(\alpha \rightarrow \beta')} = 0 \quad (3.9)$$

Χρησιμοποιώντας τη Goguen συνεπαγωγή (που προκύπτει αν στη 3.8 επιλεγθεί το αλγεβρικό γινόμενο) που εκφράζεται ως:

$$\begin{cases} 1 \text{ if } \alpha = 0 \\ \min(1, \beta' / \alpha) \text{ διαφορετικά} \end{cases} \quad (3.10)$$



Σχήμα 1. (α) συμβατικό σύνολο A και συμπλήρωμα του (γκρίζα περιοχή), και (β) γραφική αναπαράσταση της συμβατικής συνεπαγωγής της κλασσικής λογικής- όλη η γκριζα περιοχή είναι η περιοχή που ισχύει η συνεπαγωγή

ο βαθμός καταλληλότητας κάθε εναλλακτικής προσδιορίζεται ως εξής:

$$\mu(a, \beta', \gamma', \delta') = \min \left[\left(1 - \begin{cases} 1 \text{ if } \alpha = 0 \\ \min(1, \beta' / \alpha) \text{ διαφ.} \end{cases} \right), \left(1 - \begin{cases} 1 \text{ if } \alpha = 0 \\ \min(1, \gamma' / \alpha) \text{ διαφ.} \end{cases} \right), \left(1 - \begin{cases} 1 \text{ if } \alpha = 0 \\ \min(1, \delta' / \alpha) \text{ διαφ.} \end{cases} \right) \right] \quad (3.11)$$

Διευκρινίζεται ότι το συμπλήρωμα των ασαφών συνόλων προσδιορίζεται όπως και στις πιθανότητες ($\bar{\mu} = 1 - \mu$), αν και υπάρχει η δυνατότητα για την αξιωματική θεμελίωση του και τη συνακόλουθη ανάπτυξη διάφορων νορμών συμπληρώματος (π.χ. Klir and Yuan, 1995).

Μία σημαντική διευκρίνηση είναι, ότι για την εφαρμογή της μεθόδου προϋποτίθεται η δημιουργία κατάλληλων εναλλακτικών. Η εναλλακτική είναι μια ή περισσότερες υδατικές δράσεις που θα πρέπει να αποτιμηθούν με ένα καθολικό τρόπο για την ορθολογική εκτίμηση των οικονομικών αλλά και των περιβαλλοντικών, κοινωνικών και τεχνικών επιπτώσεων (π.χ. σύστημα ταμιευτήρων σε μία λεκάνη απορροής).

Στην επόμενη ενότητα ολοκληρώνεται η υβριδική μεθοδολογία με τη χρήση της 0-1 βελτιστοποίησης έτσι ώστε η τελική λύση να αποτελείται από ένα άθροισμα

εναλλακτικών για να είναι η τελική λύση εύκολα προσαρμόσιμη σε τυχόν μεταβολές στη ζήτηση ή στη διαθεσιμότητα νερού.

4. 0-1 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΜΙΑΣ ΑΡΘΡΩΤΗΣ ΤΕΛΙΚΗΣ ΛΥΣΗΣ

Οι μεταβλητές απόφασης, X_i , είναι 0-1 μεταβλητές, για τη μη πραγματοποίηση ή πραγματοποίηση της εναλλακτικής a_i , αντίστοιχα:

$$X_i = \begin{cases} 1 & \text{αν } a_i \text{ επιλεγθεί} \\ 0 & \text{αν } a_i \text{ δεν επιλεγθεί} \end{cases} \quad (4.12)$$

Για την περίπτωση που χρησιμοποιείται αποκλειστικά η CEA τότε η συνάρτηση στόχου λαμβάνει τη μορφή:

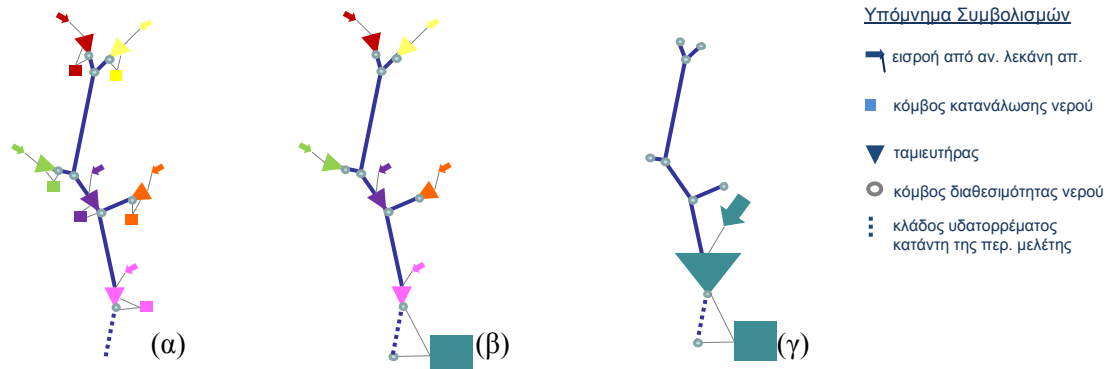
$$\min \left\{ \sum_{i=1}^N \frac{C}{W} (a_i) X_i \right\} \quad (4.13)$$

Για τη περίπτωση που χρησιμοποιείται η τροποποιημένη συνάρτηση στόχου με τη χρήση των ασαφών συνεπαγωγών η συνάρτηση στόχου λαμβάνει τη μορφή:

$$\max \left\{ \sum_{i=1}^N \mu(a_i, \beta_i', \gamma_i', \delta_i') X_{ij} \right\} \quad (4.14)$$

Προφανώς, το τελικό σύνολο από τις επιλεγθείσες εναλλακτικές, θα πρέπει να αντιμετωπίζει ικανοποιητικά τους χρήστες νερού καθώς και άλλους κοινωνικούς, περιβαλλοντικούς περιορισμούς και όρια. Για παράδειγμα, οι υπάρχουσες υποδομές μαζί με τις επιλεγθείσες εναλλακτικές θα πρέπει να καλύπτουν το σύνολο της ζήτησης για κάθε χρήστη νερού.

Ωστόσο, η χρήση της μεθόδου κόστους – αποτελεσματικότητας ενδέχεται να οδηγήσει σε υπερκάλυψη της ζήτησης. Θα πρέπει να ορισθεί ένας περιορισμός για να αποτραπεί αυτό το ενδεχόμενο. Ένας περιορισμός που θα μπορούσε να υιοθετηθεί είναι η προσφερόμενη ποσότητα να μην υπερκαλύπτει τη ζήτηση του επόμενου χρονικού ορίζοντα (συνήθως ανά δεκαετία), με κάποιο ποσοστό ανοχής.



Σχήμα 2 (α) Πραγματικές συνθήκες, (β) Σημειακή συγκεντρωτική κατανάλωση αλλά χωρικά κατανεμημένη λειτουργία των ταμιευτήρων και (γ) σημειακή συγκεντρωτική τοποθέτηση των ταμιευτήρων και της κατανάλωσης

Ένα σημαντικό λάθος που μπορεί να γίνει κατά την ανάλυση είναι η μεμονωμένη μελέτη των έργων επιφανειακής ταμείωσης που αναφέρονται στην ίδια λεκάνη απορροής. Η εξέταση της διαθέσιμης ποσότητας νερού πρέπει να γίνεται για το σύνολο των έργων που αναφέρονται στη λεκάνη απορροής. Χρησιμοποιώντας τις συμβατικές μεθόδους βελτιστοποίησης αυτό μπορεί να επιτευχθεί θεωρώντας εναλλακτικές που εμπεριέχουν τους εφικτούς συνδυασμούς των έργων στη συγκριμένη λεκάνη απορροής. Για να αποφευχθεί η επιλογή μίας κοινής υδατικής δράσης (π.χ. λιμνοδεξαμενή) που εμπεριέχεται σε δύο διαφορετικές εναλλακτικές, προτείνεται ο ορισμός ανισοτήτων αμοιβαίου αποκλεισμού εναλλακτικών που περιέχουν κοινές δράσεις νερού:

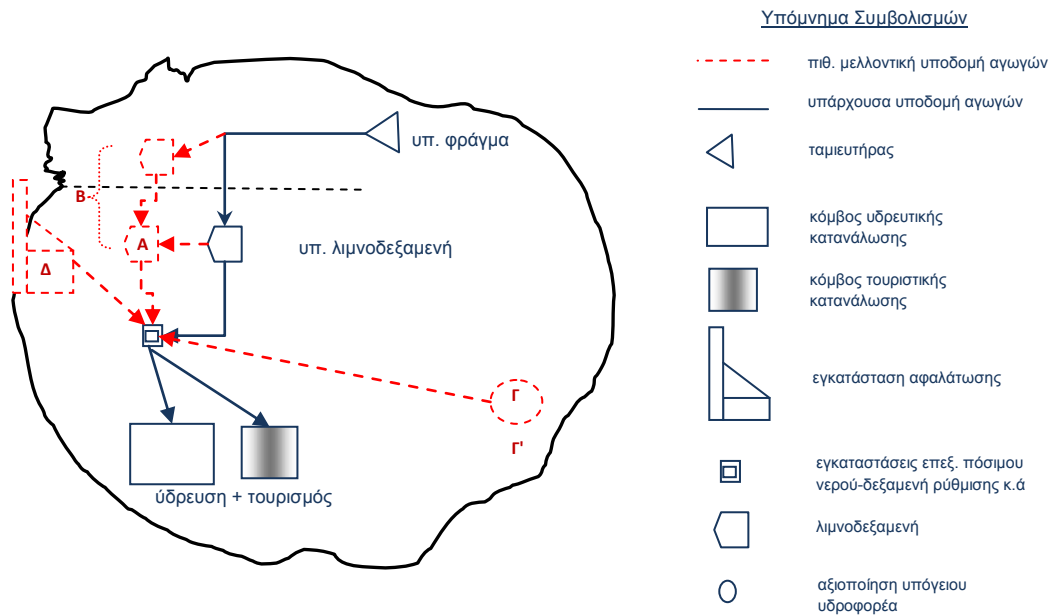
$$\sum_{i(r)} X_i \leq 1 \quad (4.15)$$

Παρόμοιοι περιορισμοί αμοιβαίου αποκλεισμού μπορούν να εγκαθιδρυθούν για τη συμπερίληψη του χρονικού προγραμματισμού των έργων σε διάφορους χρονικούς ορίζοντες επιτυγχάνοντας έτσι, το χρονικό προγραμματισμό των λύσεων για διάφορους χρονικούς ορίζοντες (Tsakiris and Spiliotis, 2011). Η προσομοίωση μίας σειράς συνδυασμών δράσεων νερού και η μετέπειτα εφαρμογή του μοντέλου λήψης αποφάσεων είναι μια επίπονη διαδικασία ακόμη και για μέτριες από πλευράς μεγέθους λεκάνες απορροής. Εναλλακτικά, προτείνεται η χρήση ευρετικών μεθόδων βελτιστοποίησης (π.χ. Kennedy and Eberhart, 2001) που δίνουν τη δυνατότητα στην πλήρη ενσωμάτωση της προσομοίωσης κατά τη βελτιστοποίηση. Με αυτό τον τρόπο για κάθε συνδυασμό έργων λαμβάνει χώρα η προσομοίωση με βάση την οποία κάθε φορά προσδιορίζεται η αξιοπιστία και η αποτίμηση άλλων κριτηρίων. Επίσης, οι περιορισμοί κάλυψης της ζήτησης αλλά και αποφυγής της υπερπροσφοράς μπορεί να ενσωματωθούν στον αλγόριθμο με τη χρήση κατάλληλης συνάρτησης ποινής.

Πιο γενικά, η απλοποίηση από τη πραγματική κατάσταση σε συνολικά συγκεντρωτική κατανάλωση αλλά με μεμονωμένη λειτουργία των ταμιευτήρων, αποτελεί μία ικανοποιητική προσέγγιση για μικρές λεκάνες απορροής ή για τη συνήθη περίπτωση όπου κατάντη είναι συγκεντρωμένο το μεγαλύτερο ποσοστό των αστικών και γεωργικών δραστηριοτήτων (Σχ.2.β). Από την άλλη πλευρά, η συγκεντρωτική σημειακή τοποθέτηση των ταμιευτήρων σε ένα κόμβο, μπορεί να είναι ορθή μόνο όταν υπάρχει μεγάλη συνδεσιμότητα μεταξύ των έργων (Σχ.2.γ) (π.χ. αντλιοστάσια, αγωγοί μεταξύ ταμιευτήρων κ.ά). Σε κάθε άλλη περίπτωση η παραπάνω θεώρηση δεν είναι ορθή (Garrote et al., 2011).

5. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ

Στο Σχ.3 παρουσιάζεται το παράδειγμα εφαρμογής, που είναι μία εξιδανικευμένη περίπτωση από το νησιωτικό χώρο. Θεωρώντας ότι η αρδευτική ζήτηση θα καλυφθεί από κατασκευαζόμενο μικρό ταμιευτήρα, το πρόβλημα σε αυτή την εφαρμογή επικεντρώνεται στη λήψη αποφάσεων για την αντιμετώπιση της λειψυδρίας στην ύδρευση και στις τουριστικές υπηρεσίες με ορίζοντα το 2021. Προφανώς, για τη μελλοντική κατανάλωση, λαμβάνεται υπόψη η αύξηση του πληθυσμού. Η σημερινή κατανάλωση εκτιμάται λίγο λιγότερη από 1,400,000 m³, ενώ η συνολική ζήτηση το 2021 εκτιμάται σε 2,200,000 m³. Η σημερινή κατανάλωση εξυπηρετείται επαρκώς από μικρό ταμιευτήρα με ετήσια διαθεσιμότητα νερού 1,100,000 m³ και λιμνοδεξαμενή με ιδιαίτερα ευνοϊκές υδρολογικές συνθήκες, με ετήσια διαθεσιμότητα νερού για ύδρευση 400,000 m³. Επίσης υπάρχει αγωγός που συνδέει τη λιμνοδεξαμενή με το φράγμα.



Σχήμα 3 Παράδειγμα εφαρμογής από το νησιωτικό χώρο

Ωστόσο, προκύπτει ότι οι σημερινές υποδομές δεν θα επαρκούν για την κάλυψη της ζήτησης το 2021. Προτείνονται πέντε εναλλακτικές. Η εναλλακτική Α είναι η κατασκευή μιας νέας λιμνοδεξαμενής κατάντη της υπάρχουσας λιμνοδεξαμενής. Στην εναλλακτική Β θα κατασκευασθεί και μία επιπλέον λιμνοδεξαμενή κατάντη του φράγματος. Αξίζει να επισημανθούν οι σημαντικές κλίσεις, τα στεγανά πετρώματα που συνθέτουν τις λεκάνες του φράγματος και της λιμνοδεξαμενής, καθώς και οι στατιστικά σημαντικές παρατηρημένες υπερχειλίσεις. Σημειώνεται επίσης, ότι η χρήση της μονάδας αφαλάτωσης (Δ) μπορεί να καλύψει όλο το μελλοντικό έλλειμμα.

Το πρόβλημα διαμορφώνεται ως εξής:

$$\begin{cases}
 \min(1.2X_A + 1.2X_B + 0.36X_{\Gamma} + 0.36X_{\Gamma'} + 0.8X_{\Delta}) \\
 \text{υ.π.} \\
 X_{\Gamma} + X_{\Gamma'} \leq 1 \ \& \ X_A + X_B \leq 1 \\
 1,100,00 + 400,000 + 600,000X_A + 1,200,000X_B + 450,000X_{\Gamma} + 300,000X_{\Gamma'} + 1,000,000X_{\Delta} \geq 2,200,000 \ (2021) \\
 1,100,00 + 400,000 + 600,000X_A + 1,200,000X_B + 450,000X_{\Gamma} + 300,000X_{\Gamma'} + 1,000,000X_{\Delta} \leq 2,900,000 \ (2031 + 10\%)
 \end{cases}$$

Η λύση η οποία επιλέγεται με βάση το προτεινόμενο μοντέλο του 0-1 γραμμικού προγραμματισμού είναι η κάλυψη της ζήτησης με την κατασκευή μίας μονάδας αφαλάτωσης, λύση που δε λαμβάνει υπόψη το περιβαλλοντικό κόστος, τη τεχνική εφικτότητα αλλά και την ανάγκη για αξιοποίηση του πόρου. Επιπλέον, δεν μπορεί να γίνει καμία διάκριση μεταξύ της οριακής (Γ) και της ήπιας εκμετάλλευσης του υπόγειου υδροφόρου (Γ'). Ακολούθως, εξετάζεται η προτεινόμενη τροποποίηση της CEA με τη χρήση της ασαφούς τομής του Goguen (Εξ. 3.11) και της min - ασαφούς τομής (Εξ. 3.4). Το πρώτο πρόβλημα που πρέπει να επιλυθεί σε αυτή την περίπτωση είναι η κανονικοποίηση του κριτηρίου κόστους – αποτελεσματικότητας. Ένα κρίσιμο σημείο για την ανάπτυξη της ασαφούς μεθόδου είναι η κανονικοποίηση του λόγου κόστους – αποτελεσματικότητας. Εάν επιλεγεί για την κανονικοποίηση ο περισσότερο δαπανηρός λόγος από τις υπάρχουσες εναλλακτικές, τότε με τη χρήση της ασαφούς τομής αυτή η λύση (εν προκειμένω η λύση των δύο νέων λιμνοδεξαμενών) πρακτικά αποκλείεται από την απόφαση εφόσον θα έχει μηδενική συνάρτηση συμμετοχής.

Πινάκας 1: Προτεινόμενες εναλλακτικές και αξιολόγησή τους

Εναλλακτικές	Ετ. λόγος κόστους – αποτελεσματικότητας (€/m ³)	Περιβαλλοντική ζημία (β')	Αρνητική τεχνική εφικτότητα (δ')	Προσφερόμενη ποσότητα με αποδεκτή αξιοπιστία	μ (Εξ. 3.11)
Υπάρχουσα λιμνοδεξαμενή +υπ. φράγμα+νέα λιμνοδεξαμενή (Α)	1.20	0.5	0.3	600,000	0.41
Υπάρχουσα λιμνοδεξαμενή +υπ. φράγμα+2 νέες λιμνοδεξαμενές (Β)	1.20	0.65	0.4	1,200,000	0.24
Οριακή χρήση υπογείου υδροφορέα (Γ)	0.36	0.6	0.5	450,000	0.37
Ήπια χρήση υπογείου υδροφορέα (Γ')	0.36	0.3	0.5	300,000	0.48
Αφαλάτωση (Δ)	0.80	0.7	0.7	Δυνατότητα επιλογής	0.22

Προτείνεται ως μέτρο κανονικοποίησης μία περισσότερο δαπανηρή λύση ανά κυβικό που να μην εμπεριέχεται στις υπάρχουσες εναλλακτικές, που στην περίπτωση των Κυκλάδων θα μπορούσε να είναι η ύδρευση με μεταφορά νερού από υδροφόρα πλοία (8€/m³ στις Κυκλάδες). Η συνάρτηση συμμετοχής που εκφράζει την καταλληλότητα για κάθε εναλλακτική (Εξ.3.11) παρατίθεται στον Πίνακα 1. Η συνάρτηση στόχου διαμορφώνεται ως εξής (Πίνακας 1 και με βάση την Εξ. 4.14):

$$\max f = (0.41X_A + 0.24X_B + 0.37X_\Gamma + 0.48X_{\Gamma'} + 0.22X_{\Delta'})$$

Σε αυτή την περίπτωση, επιλέγεται η κατασκευή μίας λιμνοδεξαμενής (εναλλακτική Α) και η ήπια εκμετάλλευση του υπόγειου υδροφορέα (εναλλακτική Γ'). Η τελική λύση θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως ορθολογική. Επιπλέον, η αρθρωτή δομή της απόφασης δίνει τη δυνατότητα προσαρμογής της, σε περίπτωση κλιματικών, ανθρωπογενών αλλαγών ή πιο απλά, σε περίπτωση κακής εκτίμησης.

Σημειώνεται ότι ο δείκτης του Falkenmark δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί γιατί δεν εμπεριέχεται η συνήθως σημαντική, αρδευτική κατανάλωση νερού. Επίσης, η κοινωνική διάσταση είναι αυταπόδεικτη για έργα ύδρευσης ενώ για την περίπτωση της μικρής κλίμακας μελέτης δεν υπεισέρχεται η γεωγραφική κατανομή των έργων σε περιοχές με ανάμοια οικονομική ανάπτυξη.

Μία αξιοσημείωτη μεθοδολογική παρατήρηση είναι ότι η εναλλακτική Β αναφέρεται στη συνδυασμένη αξιοποίηση του υπάρχοντος φράγματος και της λιμνοδεξαμενής καθώς και όλων των νέων έργων μαζί, εφόσον θα λειτουργήσουν συνδυαστικά. Με αυτή τη θεώρηση το πρόβλημα καταλήγει σε ένα μοντέλο 0-1 γραμμικού προγραμματισμού. Ωστόσο, η θεώρηση αυτή όπως προαναφέρθηκε, δεν μπορεί να εφαρμοσθεί σε ηπειρωτικές λεκάνες απορροής εφόσον είναι πρακτικά δυσχερής η εξέταση όλων των συνδυασμών των έργων ταμίευσης. Η θεώρηση επίσης, της συγκεντρωτικής κατανάλωσης τουρισμού και ύδρευσης τεκμηριώνεται από την κάλυψη των αναγκών από ενιαίο δίκτυο.

Με δεδομένο ότι η τροποποιημένη μέθοδος κόστους - αποτελεσματικότητας στηρίζεται αφηρητικά στον ομώνυμο λόγο, η χρήση της μεθόδου προτείνεται για

περιπτώσεις όπου υπάρχει λειψυδρία συνδυασμένη με έλλειψη υδατικών και χρηματικών πόρων ενώ παράλληλα, υπάρχει η προφανής ανάγκη να συνυπολογισθεί η τυχόν αρνητική διάσταση στην τεχνική εφικτότητα, καθώς και στο φυσικό και κοινωνικό περιβάλλον από τις εξεταζόμενες εναλλακτικές.

Ενδεικτικά, για την περίπτωση που επιθυμείται η λήψη της απόφασης να ενσωματώνει με πιο ρωμαλέο τρόπο, πολλαπλά κριτήρια και η λύση να μην στηρίζεται κύρια στο λόγο κόστους – αποτελεσματικότητας μπορεί να χρησιμοποιηθεί η παρόμοια μέθοδος Promethee V (π.χ. Abu-Taleb and Mareschal, 1995) που συνδυάζει την πολυκριτηριακή ανάλυση με το 0-1 γραμμικό προγραμματισμό, ή η μέθοδος των Tsakiris and Spiliotis (2011) που επιπλέον, ενσωματώνει την περίπτωση της αβεβαιότητας, του χρονικού προγραμματισμού των έργων καθώς και το δικαίωμα της αρνησικυρίας σε επιλεγμένα κριτήρια.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία παρουσιάζεται μία υβριδική μέθοδος για την επιλογή πολλαπλών υδατικών δράσεων για την αντιμετώπιση της λειψυδρίας σε μακρύ χρονικό ορίζοντα. Η χρήση της 0-1 βελτιστοποίησης επιτρέπει τη δημιουργία μίας αρθρωτής λύσης που εύκολα μπορεί να ανταποκριθεί σε μεταβαλλόμενες συνθήκες.

Για τη συνάρτηση στόχου μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε ο λόγος κόστους – αποτελεσματικότητας, είτε ένας τροποποιημένος λόγος, με στόχο να αποκλειστεί η δυνατότητα ένας ικανοποιητικός λόγος κόστους – αποτελεσματικότητας να οδηγεί σε περιβαλλοντικά, τεχνικά και κοινωνικά δυσμενείς λύσεις.

Διαπιστώθηκε επίσης, ότι η αποκλειστική χρήση του λόγου κόστους – αποτελεσματικότητας οδηγεί πολλές φορές σε μη ισόρροπες και δύσκολα τεχνικά εφικτές λύσεις, ενώ δημιουργεί ακόμη και βασικές δυσχέρειες κατά τη συγκριτική αξιολόγηση παρόμοιων εναλλακτικών.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η πρόταση υλοποιείται στο πλαίσιο της Δράσης «Ενίσχυση Μεταδιδασκτόρων Ερευνητών/τριών» του ΕΠΕΔΒΜ με Δικαιούχο την Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας και συγχρηματοδοτείται από το Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο (ΕΚΤ) και από Εθνικούς Πόρους. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καθηγητές Γ.Τσακίρη και L.Garrote για τις εύστοχες παρατηρήσεις και υποδείξεις τους.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Abu-Taleb, F., and Mareschal, B., 1995. *Water resources planning in the Middle East: application of the PROMETHEE V multicriteria method*. Eur. J. Oper. Res., 81:500–511.
- Aulong, S., Bouzit, M., and Dörfliger, N., 2009. *Integrating water balance and cost-effectiveness analysis for water management: an application in Jordan and Lebanon*. Water Resour. Manag., 23:731–753.
- Berbel, J., Martin-Ortega, J., Mesa, P., 2011. *A Cost-Effectiveness Analysis of Water-Saving Measures for the Water Framework Directive: the Case of the Guadalquivir River Basin in Southern Spain*. Water Resour. Manag, 25, 2: 623-640.

- European Commission, 2003. *Economics and the environment: the implementation challenge of the water framework directive*. A guidance document, WATECO, Brussels.
- Garrote, L., Iglesias, A., Martín-Carrasco, F., and Mediero, L., 2011. *WAAPA: A Model For Water Availability And Climate Change Adaptation Policy Analysis*. In VI Ewra International Symposium - Water Engineering And Management In A Changing Environment Catania, June 29 - July 2, 2011.
- Heathcote I., 1998. *Integrated Watershed Management*. John Wiley & Sons.
- Falkenmark M., Lundquist, and Widstrand C., 1989. *Macro-scale water scarcity requires micro-scale approaches: aspects of vulnerability in semi-arid development*. Nat. Resour. Forum 13: 258–267.
- Kennedy, J., and Eberhart, R., 2001. *Swarm Intelligence*. Morgan Kaufmann, San Francisco, CA.
- Klir, G., and Yuan, B.T., 1995. *Fuzzy Sets and Fuzzy Logic Theory and its Applications*. Prentice Hall.
- Μηλάκης, Δ., 2006. *Χρήσεις γης και Μεταφορές. Διερεύνηση της επίδρασης των πολεοδομικών χαρακτηριστικών μακρο- και μικρο- κλίμακας στις επιλογές μετακίνησης*. Διδακτορική Διατριβή, Ε.Μ.Π.
- Papadopoulos, B. and Sirpi, M., (1999). *Similarities in fuzzy regression models*. Journal of Optimization Theory and Applications, 102(2): 373 – 383.
- Rijsberman, F., 2006. Water scarcity: Fact or fiction? *Agricultural Water Management* 80: 5–22.
- Σπηλιώτης, Μ., 2007. *Ασαφής Συστημική Θεωρία για τη Λήψη Αποφάσεων στη Στρατηγική Διαχείριση των Υδατικών Πόρων*. Διδακτορική Διατριβή, Ε.Μ.Π.
- Tsakiris, G., and Spiliotis, M., 2011. *Planning Against Long Term Water Scarcity: A Fuzzy Multicriteria Approach* *Water Resour. Manag.*, 25(4): 1103–1129.

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΥΓΓΡΑΦΕΩΝ

Disse M.	546	Γρηγοριάδης Δημ. Γ.Ε.	617
Etiopie G.	694	Δαμιανίδης Π.	908
Ferreira R. M.L.	617	Δαμίγος Δ.	240
Ricardo A. M.	617	Δέσκος Γ. Β.	200
Αγγελάκης Α. Ν.	509	Δημακόπουλος Α. Σ.	617
Αγγέλης Ι.	607	Δήμας Αθ.	130, 1033
Αγγελίδης Π.	107, 327, 533	Δήμας Χρ.	1174
Αθανασάκης Μ.	1200	Δημητρακόπουλος Αλ. Κ.	130
Αϊβαζίδης Αλ.	447	Δημητριάδης Π. Γ.	200
Αλεξίου Ι.	36	Δημόπουλος Γ.	958
Αλεξίου Ν. Α.	142	Δημούδη Ειρ.	476
Αναστασιάδου-Παρθενίου Ε.	802	Διαμαντής Β.	447, 456
Αντωνάτος Έκτ.	447	Διαμαντής Ι.	920, 932
Αντωνόπουλος Β. Ζ.	815, 834	Δόκου Ζ.	896
Ανυφαντής Β.	719	Δουλιγέρης Χ.	500
Αραβαντινού Α.Φ.	415	Ευαγγελίδης Χ.	709
Αραμπατζής Γ.	572	Ζάβρα Α.	572
Αράπογλου Δ.	500	Ζαγγανά Ε.	1008
Αργυρίου Αθ.	67	Ζάννης Π.	595
Αυγέρης Ι.	1023, 1046	Ζήσης Θ.	802
Βαλιάντζας Ι. Δ.	3	Ζήσου Χ.	1250
Βαρβέρης Αν.	376	Ζούβελου Στ.	466
Βαρζάκας Θ.	500	Ζουμπούλης Α.	670, 1111
Βασιλείου Α.	1238	Ηλίας Α.	744
Βαφειάδης Μ.	46	Θεοδωρακόπουλος Μ.Α.	415
Βεράνης Ν.	944, 970, 996	Θεοχάρης Μ.	648, 756
Βλάχος Π.	376	Ισραηλίδης Κ.	500
Βλυσίδης Α.	500	Κάγκαλου Ιφ.	489
Βρουχάκης Ι.	572	Καζαντζίδης Α.	67
Βύρλας Π.	825	Κακαλής Χ.	670
Γαλαζούλας Ευάγ.	390	Καλαβρουζιώτης Ι.	466
Γαλιατσάτου Π.	25	Καλέρης Β.	75
Γείτονας Αθ.	1058	Καλκάνη Ευφρ.	637
Γεραγά Μ.	694	Καλλιώρας Α.	908
Γεωργίου Π.Ε.	278, 744, 767, 834, 1162	Καλφούντζος Δ.	825
Γεωργουλός Α.	107, 327, 533	Κανάκης Π.Χ.	1162
Γιαννακοπούλου Ε.	1058	Κανακούδης Β.	227, 291, 1111
Γιαννόπουλος Π. Χρ.	165, 350, 546, 1123	Καπράρα Ε.	670
Γιαννόπουλος Στ.	252, 476, 719, 1134, 1148, 1186, 1226	Καραμούζης Δ.Ν.	767
Γιαννοπούλου Ι.	252	Καραμπάς Θ.	1023, 1046, 1083
Γιουβάνης Β.	780	Καρατάσιου Ε.	791
Γκίκας Γ. Δ.	425, 435, 626, 1174	Καρατζάς Γ. Π.	896
Γκίνη Μ.	376	Κάργας Γ.	847, 858, 870
Γκινίδη Π.	1226	Καρπούζος Δ.Κ.	767
Γκιουγκής Ι.	932	Κασάπη Κ.Α.	572
Γκονέλας Κ.	291	Καστρινάκης Ε. Γ.	682
Γραβάνης Γ.	36	Κατζουράκης Β. Ε.	582

Κατηρτζόγλου Αλ. Κ.	95	Παγανέλης Γ.	660
Κατιμάδα Χ.	932	Παναγόπουλος Α.	572
Κατσιφάρικης Κ.	46	Παναγόπουλος Π.	362, 376
Κεραμάρης Ε.	154	Παντελάκης Δ.	802
Κερκίδης Π.	847, 858, 870	Παντελόπουλος Π.	376
Κιουτσιούκης Ι.	67	Πανώρας Α.	744
Κόκκορα Μ.	825	Παπαδοπούλου Μ. Π.	1212
Κολοκυθάς Γερ.	1033	Παπαευαγγέλου Β.	435
Κολοτούρος Χ.Α.	834	Παπαθεοδώρου Γ.	694
Κοπασάκης Κ.	107, 327, 533	Παπακωνσταντής Η.	176, 682
Κορδέλλα Σ.	694	Παπαμιχαήλ Δ.Μ.	278, 1162
Κορμάς Κ.	489	Παπανικολάου Π. Ν.	188, 200, 682
Κουρτίδου Συμ.	626	Παπανικολάου Χ.	791
Κουτίτας Χρ.	1046	Παππάς Ηλ. Δ.	188
Κουτρουβέλη Θ. Ι.	130	Παρασκευάς Χ.	744
Κρεστενίτης Ι. Ν.	1070	Πασαπόρτη Χρ. Ν.	1123
Κωτούλας Γρ.	1186	Πεταλά Ε.	327
Κώτσικας Μ.	327	Πεταλάς Χρ.	390
Κωτσοβίνος Ν.	107, 327, 533	Πέτκου Ολ.	252
Κωτσόπουλος Σπ.	36	Πεχλιβανίδης Γ.Η.	154
Κωτσόπουλος Στ. Α.	815	Πεχλιβανίδης Η.Γ.	154
Λαγγούσης Α.	75	Πεχτελίδης Α.	920
Λαμπροπούλου Α.	847	Πλάκας Κ.	476
Λασπίδου Χ.	489	Πλέγα Χρ. Χ.	582
Λεοτσινίδης Μ.	466, 595	Πλιάκας Θ.	376, 908
Λιάπης Α.Γ.	278	Πλιάκας Φ.	920
Λόκκας Φ.	36	Ποδηματά Μ. Β.	350
Λουκάς Αθ.	1148	Πρίνος Π.	25
Μαγαλιός Στ.	36	Σαζακλή Ε.	466, 595
Μακρής Χρ. Β.	1070	Σακελλαρίου- Μακραντωνάκη Μ.	780, 791
Μακροβασίλη Κ.	944	Σαμαράς Π.	670, 1111
Μαλάμος Ν.	660	Σιάνου Α.	648, 756
Μανάκος Αντ.	984, 996	Σιδηρόπουλος Π.	339
Μαναριώτης Ι.Δ.	415	Σκληβανιώτης Μ.	595
Μάρης Φ.	1238	Σούλης Ι. Β.	83, 95, 142, 212
Ματιάτος Ι.	1212	Σπανοθύμιου Μ.	1134
Μαχτής Π.	1238	Σπανουδάκη Κ.	558
Μελίδης Παρ.	447	Σπάχος Θ.	46
Μέμος Κ. Δ.	1083	Σπηλιώτης Μ.	1134, 1262
Μήτρακας Μ.	447, 670	Σταθάκη Σ.	572
Μιμίδης Κ.	456, 920	Στάμου Α.	558
Μίχας Σ.	400	Στεργιοπούλου Άλκ.	637
Μπαλιώτη Β.	709	Στυλιανού Σ.	670
Μπαλτάς Ε.	36, 802	Συγγούνα Β. Η.	883
Μπαμπατζιμόπουλος Χ.	744	Ταπόγλου Ευδ.	896
Μπεκρή Ε. Σπ.	546	Τασόγλου Σπ.	376
Μπέλλος Β.	12	Τέντες Γ.	240
Μπενσασσών Λ.	1200	Τέρτη Γ.	25
Μπλούτσος Αρ. Α.	165	Τζεβελέκης Θ.	932
Μυλόπουλος Ν.	266, 339	Τζιμόπουλος Χ.	252, 709, 719, 733, 780, 791, 1226
Μυριούνης Χ.	648, 958, 1186	Τζιρίτης Ε.	572
Μυρωνίδης Δ.	317	Τζώρτζης Ι.	54
Νάκας Χ.	791	Τριανταφύλλου Αικ.	376
Νάνου-Γιάνναρου Αικ.	558	Τριχάκης Ι. Χ.	896
Νικηφοράκης Ι.	176	Τσακίρης Γ.	12
Νικολάου Κ.	400	Τσακμάκης Ι. Δ.	425
Ντζόλα Β.	595	Τσερόλας Π.	1008
Οικονόμου Ε.	303, 476, 1058	Τσιάλας Θ.	400

Τσιτσιφλή Σ.	227, 1111	Χρηστίδης Χρ.	944, 970, 1148
Τσιχριντζής Β. Α.	425, 435, 626, 1174	Χριστοδούλου Γ.	120, 176
Τσουκαλά Β.Κ.	1096	Χριστοδούλου Δ.	694
Φαφούτης Χρ.	266	Χριστόπουλος Σπ.	1023, 1046
Φερεντίνος Γ.	694	Χριστοφίδου Δ.	858
Φονιάς Ε. Ν.	1083	Χρυσάνθου Βλ.	607
Φουρνιώτης Ν. Θ.	130, 521	Χρυσάφη Α.Α.	572
Φυτανίδης Δ. Κ.	83, 142, 212	Χρυσάφη Αλ.	944
Χαλκίδης Ηρ.	54	Χρυσικόπουλος Κ. Β.	582, 883
Χατζηνικολάου Γ.	362, 376	Χρυσοχοϊδης Δ. Α.	83
Χατζηρόδου Α.	1096	Ψιλοβίκος Α.	1250
Χορς Γ. Μ.	521		

ΧΟΡΗΓΟΙ



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΑΤΡΩΝ**



**ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑ
ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ**

ΤΕΕ

**ΤΕΧΝΙΚΟ ΕΠΙΜΕΛΗΤΗΡΙΟ ΕΛΛΑΔΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ**



ΥΔΡΟΕΞΥΓΙΑΝΤΙΚΗ
Λ.Σ. ΛΑΖΑΡΙΔΗΣ & ΣΙΑ Ε.Ε.

METRICA
Ολοκληρωμένα Βιολογικά και Χημικά Συστήματα
**ΜΕΤΡΗΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ
ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ Α.Ε.Ε.**

