

4ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωργικής Μηχανικής
Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών

6 - 8 Οκτωβρίου 2005



ΠΡΑΚΤΙΚΑ
ΑΝΑΛΥΤΙΚΩΝ ΠΕΡΙΛΗΨΕΩΝ



ΕΤΑΙΡΕΙΑ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΛΛΑΔΟΣ

Ε.Γ.Μ.Ε.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η Εταιρεία Γεωργικών Μηχανικών Ελλάδας (Ε.Γ.Μ.Ε.) διανύει τον 13^ο χρόνο ύπαρξής της. Ιδρύθηκε τον Ιούλιο του 1993 με έδρα την Αθήνα και είναι μέλος της Ευρωπαϊκής Ένωσης Γεωργικών Μηχανικών (EurAgEng). Η επωνυμία της αποδίδεται στην αγγλική ως “Hellenic Society of Agricultural Engineers” (HelAgEng). Τα τακτικά μέλη της υπερβαίνουν τα 100.

Το παρόν τεύχος των πρακτικών περιέχει 87 επιστημονικές ανακοινώσεις που παρουσιάστηκαν στο 4^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωργικής Μηχανικής, το οποίο έλαβε χώρα στην Αθήνα στις 6 και 7 Οκτωβρίου 2005. Για την κρίση των εργασιών αυτών τόσο για ανακοίνωση όσο και για δημοσίευση στα Πρακτικά, εργάστηκαν μέλη της Επιστημονικής Επιτροπής καθώς και άλλοι ειδικοί επιστήμονες. Το συνέδριο οργανώθηκε υπό την αιγίδα του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών.

Το Συνέδριο δίνει την ευκαιρία στο Επιστημονικό δυναμικό της χώρας μας να παρουσιάσει την Επιστημονική πρόοδο και τις νέες μεθόδους προσέγγισης που αφορούν τη διαχείριση των εδαφικών και υδάτινων πόρων, τα γεωργικά μηχανήματα, τις αγροτικές κατασκευές, τη συντήρηση και επεξεργασία των γεωργικών προϊόντων, την ενέργεια και ειδικά τις ανανεώσιμες πηγές της, νέες τεχνολογίες και ως επιστέγασμα όλων το περιβάλλον. Απευθύνεται σε πτυχιούχους θετικών επιστημών, οι οποίοι είτε λόγω μεταπτυχιακής εκπαίδευσης, είτε λόγω μακράς ενασχόλησης απέκτησαν γνώσεις και εμπειρία σε ένα ή περισσότερα από τα παραπάνω γνωστικά αντικείμενα.

Η συζήτηση και τα συμπεράσματα που θα προκύψουν από το Συνέδριο πιστεύουμε ότι θα εδραιώσουν το ρόλο του Γεωργικού Μηχανικού στη χώρα μας. Εκφράζονται θερμές ευχαριστίες προς τα μέλη της Οργανωτικής και της Επιστημονικής Επιτροπής του συνεδρίου, τους συγγραφείς και τους κριτές των εργασιών που αφιέρωσαν πολύτιμο χρόνο για την επιστημονικά αρτιότερη εμφάνιση του συνεδρίου.

Προς την Πρυτανεία του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών καθώς και τους άλλους χορηγούς και εκθέτες απευθύνονται ειλικρινείς ευχαριστίες για την οικονομική ενίσχυση που προσέφεραν ώστε να πραγματοποιηθεί με επιτυχία το παρόν συνέδριο.

Αθήνα, Οκτώβριος 2005

Καθηγητής Γρηγ. Π. Λαμπρινός
Πρόεδρος Οργανωτικής Επιτροπής

Οργανωτική Επιτροπή

Γρ. Λαμπρινός Πρόεδρος Ε.Γ.Μ.Ε.
Γ. Παπαδάκης Γεν. Γραμματέας Ε.Γ.Μ.Ε.
Λ. Γερονικολού Ταμίας Ε.Γ.Μ.Ε.
Γ. Κυριακαράκος Μέλος Ε.Γ.Μ.Ε.
Γ. Παπαγεωργίου Μέλος Ε.Γ.Μ.Ε.
Γ. Ξανθόπουλος Μέλος Ε.Γ.Μ.Ε.

Επιστημονική Επιτροπή

Αγγελίδης Σ., Καθηγητής Γ.Π.Α.
Ακριτίδης Κ., Καθηγητής Α.Π.Θ.
Αναστασιάδου-Παρθενίου Ε., Καθηγήτρια Α.Π.Θ.
Αντωνόπουλος Β., Καθηγητής Π.Θ.
Αρβανίτης Κ. Επ. Καθηγητής Γ.Π.Α.
Ασημακόπουλος Ι., Καθηγητής Γ.Π.Α.
Βαλιάντζας Ι., Καθηγητής Γ.Π.Α.
Βάλμης Σ., Καθηγητής Γ.Π.Α.
Γέμτος Θ., Καθηγητής Π.Θ.
Γεωργακάκης Δ., Καθηγητής Γ.Π.Α.
Κερκίδης Π., Καθηγητής Α.Π.Θ.
Κίττας Κ., Καθηγητής Π.Θ.
Κόλλια Β., Καθηγήτρια Γ.Π.Α.
Κοσμάς Κ., Καθηγητής Γ.Π.Α.
Κυρίτσης Σ., Ομ. Καθηγητής Γ.Π.Α.
Λιακατάς Α. Καθηγητής Γ.Π.Α.
Μαρτζόπουλος Γ., Καθηγητής Α.Π.Θ.
Μαυρογιαννόπουλος Γ., Καθηγητής Γ.Π.Α.
Μπαμπατζιμόπουλος Χ., Καθηγητής Α.Π.Θ.
Μπριασούλης Δ., Καθηγητής Γ.Π.Α.
Νικήτα-Μαρτζοπούλου Χ., Καθηγήτρια Α.Π.Θ.
Παναγάκης Π. Επ. Καθηγητής Γ.Π.Α.
Παπαδάκης Γ. Αν. Καθηγητής Γ.Π.Α.
Παρισόπουλος Γ., Δ/ντης Ι.Γ.Ε.Μ.Κ., ΕΘ.Ι.Α.Γ.Ε.
Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη Μ., Καθηγήτρια Π.Θ.
Συγριμής Ν., Καθηγητής Γ.Π.Α.
Τζιμόπουλος Χ., Καθηγητής Α.Π.Θ.
Τσατσαρέλης Κ., Καθηγητής Α.Π.Θ.
Φραγκουδάκης Α. Καθηγητής Γ.Π.Α.
Χαϊντούτη Κ., Καθηγήτρια Γ.Π.Α.

Ευχαριστίες

Η Εταιρεία Γεωργικών Μηχανικών Ελλάδος εκφράζει τις θερμές της ευχαριστίες της στους πενήντα περίπου συναδέλφους που ανέλαβαν το δύσκολο και όχι τόσο ευχάριστο έργο της κρίσης και διόρθωσης των Επιστημονικών Εργασιών του Συνεδρίου, μέσα στο κατακαλόκαιρο θυσιάζοντας πολύτιμο χρόνο και από τις διακοπές τους.

Γρ. Λαμπρινός
Πρόεδρος ΕΓΜΕ

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΣΗΓΗΤΩΝ

<p>Blackmore S. Griepentrog H. Kurstjens D. Mohamed E. Mueller J. Pedersen S. Vahdati M. Wembe-Foba-Kue F.F. Αγγελίνας Π. Αγγελοπούλου Α. Ακριπίδης Κ. Αλεξάνδρου Α. Αλεξίου Ι. Αμπατζίδης Γ. Αναστασιάδου-Παρθενίου Ε. Αναστασίου Α. Αντωνόπουλος Β. Αραβαντινός Ε. Αρβανίτης Κ. Αργυροκαστρίτης Ι. Αργυροπούλου Κ. Αρχοντούλης Σ. Ασημακόπουλος Α. Βαβουλίδου Ε. Βαλιάντζας Ι. Βάλμης Σ. Βαρλάγκας Η. Βασιλάρου Α. Βαφειάδης Δ. Βελιώτης Ι. Βουγιούκας Σ. Γέμτος Θ. Γερωνικολού Λ. Γεωργακάκης Δ. Γεωργακόπουλος Γ. Γεωργίου Π. Γεωργούσης Χ. Γιαλαμάς Θ. Γιαννόπουλος Σ. Γιαννοπούλου Ι. Γιαννούλας Β. Γκαγκάκη Α. Γκούμας Κ. Γράβαλος Ι. Δαναλάτος Ν. Δεδούσης Α. Δέρκας Ν. Δημητριάδης Α. Δημοπούλου Κ. Διαμαντοπούλου Μ. Δουλγέρης Χ. Δραγοΐδου Κ. Δρόσος Β. Ελμαλόγλου Σ.</p>	<p>Ζαβάκος Γ. Ζαλίδης Γ. Ζήσης Θ. Ζουμπανιώτης Α. Θεοχάρης Μ. Ιωσηφίδης Α. Καβαλάρης Χ. Καλαβρουζιώτης Ι. Καλαμπίδης Δ. Καλλιτσάρη Χ. Καλύβας Δ. Καλφούντζος Δ. Καραγιάννης Ε. Καραγιάννης Κ. Καραμούτης Χ. Καραντούνιας Γ. Καραρίζος Π. Κάργας Γ. Κατέρης Δ. Κατσούλας Ν. Καυγά Α. Κερκίδης Π. Κίττας Κ. Κλάδης Γ. Κόκκορα Μ. Κόκκορας Ι. Κόλλια Β. Κουκλίδης Χ. Κούρτης Α. Κουτσοφίτης Ζ. Κουφάκη Α. Κρικοριάν Α. Κυριακαράκος Γ. Κυριακίδης Ν. Κυρίτσης Σ. Κωτσόπουλος Θ. Κωτσόπουλος Σ. Λαμνάτου Χ. Λαμπρινός Γ. Λάμπρου Δ. Λόντρα Π. Λύχνος Γ. Μαθιουλάκης Ε. Μαλάμος Ν. Μαλέτσικα Π. Μανώλης Κ. Μανωλοπούλου Ε. Μαρίτσα Ι. Μαρτζόπουλος Γ. Μητρόπουλος Δ. Μισοπολινός Ν. Μπαλτάς Ε. Μπαμπατζιμόπουλος Χ. Μπαμπίλης Δ. Μπαντή Μ.</p>	<p>Μπαρτζάνας Θ. Μπελεσιώτης Β. Μπουροδήμος Γ. Μπόχτης Δ. Μπριασούλης Δ. Μυγδάκος Ε. Νάνος Γ. Νάτσης Α. Νικήτα- Μαρτζοπούλου Χ. Νικολαΐδης Χ. Ντιούδης Π. Ξανθόπουλος Γ. Ξένος – Κοκολέτσης Π. Οικονόμου Ν. Σούλης Κ. Πανώρας Α. Παπαγιαννοπούλου Α. Παπαδάκης Γ. Παπαθανασίου Ι. Παπαϊωάννου Χ. Παπαμιχαήλ Δ. Παρισόπουλος Γ. Παστρωμάς Γ. Πατερράκη Π. Ράππος Ε. Ράπτης Ι. Ρήγκου Μ. Ροζάκης Σ. Σάββας Δ. Σακελλαρίου- Μακραντωνάκη Μ. Σακκάς Χ. Σαπουνάς Α. Σεραφείμ Γ. Σερσελουδής Χ. Σιώμος Α. Σουλιώτης Μ. Σταυρινός Ε. Συγριμής Ν. Συκιώτης Ι. Ταμβακίδης Σ. Τερζίδης Γ. Τζιμόπουλος Χ. Τριαντακωνσταντής Δ. Τρυπαναγνωστόπουλος Ι. Τσάκαλος Α. Τσατσαρέλης Κ. Τσιτσιπής Ι. Φασουλή Β. Φιλίντας Α. Φουντάς Σ. Χαλούλης Ι. Χατζής Ε. Χατζησπύρογλου Ι. Χριστοπούλου Ν.</p>
--	---	--

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΝΟΤΗΤΑ 1: ΑΓΡΟΤΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΤΥΠΟΥ ΤΩΝ ΑΝΟΙΓΜΑΤΩΝ ΑΕΡΙΣΜΟΥ ΣΤΟ ΜΙΚΡΟΚΛΙΜΑ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΑΦΥΓΡΑΝΣΗ	
Θ. Μπαρτζάνας, Κ. Κίττας.....	1
ΕΛΕΓΧΟΣ ΦΩΤΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΣΤΑ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΦΑΚΩΝ FRESNEL	
Μ. Σουλιώτης, Ι. Τρυπαναγνωστόπουλος, Α. Καυγά.....	10
ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΔΙΧΤΥΩΝ ΕΝΤΟΜΟΣΤΕΓΑΝΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΤΥΠΟΥ ΤΩΝ ΑΝΟΙΓΜΑΤΩΝ ΑΕΡΙΣΜΟΥ ΣΤΟ ΡΥΘΜΟ ΑΝΑΝΕΩΣΗΣ ΤΟΥ ΑΕΡΑ	
Κ. Κίττας, Ν. Κατσούλας, Θ. Μπαρτζάνας.....	19
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΕΥΚΑΜΠΤΩΝ ΧΑΜΗΛΩΝ ΤΟΥΝΕΛ ΜΕ ΒΙΟΔΙΑΣΠΩΜΕΝΑ ΦΥΛΛΑ ΚΑΛΥΨΗΣ	
Δημήτρης Μπριασούλης.....	28
ΧΡΗΣΗ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΦΥΛΛΩΝ ΓΙΑ ΕΛΕΓΧΟ ΤΗΣ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΣΤΟ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟ	
Νικόλαος Κατσούλας, Κωνσταντίνος Κίττας.....	38
ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΣΜΟΥ ΚΤΗΝΟΤΡΟΦΙΚΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ: ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΤΥΡΒΗΣ.	
Α. Σαπουνάς, Θ. Μπαρτζάνας, Χ. Νικήτα – Μαρτζοπούλου, Κ. Κίττας.....	48
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ ΜΕΣΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΟΛΙΚΗΣ ΘΕΡΜΟΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΑΓΡΟΤΙΚΩΝ ΚΤΙΡΙΩΝ	
Ν. Οικονόμου, Γρ. Λαμπρινός.....	57
ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΥΠΕΡΙΩΔΟΥΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΤΑ ΠΟΙΟΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΡΠΩΝ ΤΟΜΑΤΑΣ	
Π. Μαλέτσικα, Χ. Παπαϊωάννου, Α. Σιώμος, Κ. Κίττας.....	65

ΕΝΟΤΗΤΑ 2: ΓΕΩΡΓΙΚΑ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΑ

ΔΙΑΓΝΩΣΤΙΚΗ ΣΥΣΚΕΥΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΤΗΣ ΑΝΤΛΙΑΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΟΥ ΤΩΝ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΕΛΚΥΣΤΗΡΩΝ	
I. Γράβαλος, I. Ράπτης, Δ. Κατέρης, I. Βελιώτης, Γ. Σεραφείμ.....	71
ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΜΕ ΤΗ ΒΟΗΘΕΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ	
Θ.Α. Γιαλαμάς, I.Γ. Γράβαλος, Α.Θ. Φιλίντας, Ζ.Ι.Κουτσοφίτης.....	80
ΤΕΧΝΙΚΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΑΥΤΟ-ΟΔΗΓΟΥΜΕΝΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΣΤΗ ΓΕΩΡΓΙΑ	
Σ. Φουντάς, S. Pedersen, S. Blackmore, Θ. Γέμτος.....	89
ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΠΕΡΙΟΧΩΝ Ν. ΑΙΤΩΛ/ΝΙΑΣ ΣΤΑ ΠΛΑΙΣΙΑ ΤΗΣ ΑΕΙΦΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ	
Γ. Παστρομάς, I. Καλαβρουζιώτης, Α.Νάτσης.....	98
ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΠΕΡΙΘΩΡΙΩΝ ΜΕΙΩΣΗΣ ΤΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΤΟΥ ΒΑΜΒΑΚΙΟΥ ΜΕ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΜΕΙΩΜΕΝΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ	
Χ. Καβαλάρης, Ε. Μυγδάκος, Θ.Α. Γέμτος.....	107
ΕΠΑΝΑΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΥΠΕΔΑΦΟΚΑΛΛΙΕΡΓΗΤΗ ΓΙΑ ΜΕΙΩΣΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	
I. Παπαθανασίου, Χρ. Καραμούτης, Θ.Α. Γέμτος.....	116
ΜΑΚΡΟΧΡΟΝΙΑ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΕΝΤΕ ΜΕΘΟΔΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΣΕ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΖΑΧΑΡΟΤΕΥΤΛΩΝ	
Α. Αγγελοπούλου, Χ. Καβαλάρης, Χ. Καραμούτης, Ε. Βαβουλίδου, Θ. Γέμτος.....	125
ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΝΟΣ ΑΠΛΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΗΣ ΠΡΟΣΤΑΤΕΥΤΙΚΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ ΑΝΕΜΟΘΡΑΥΣΤΩΝ	
Γεώργιος Α. Καραντούνιας, Γεώργιος Δ. Κυριακαράκος.....	134
ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΤΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΣΤΗ ΖΩΝΗ ΤΗΣ ΣΠΟΡΟΚΛΙΝΗΣ	
Χ. Καβαλάρης, Α. Αλεξάνδρου, Θ.Α. Γέμτος.....	142
ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΣΤΗΝ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΖΙΖΑΝΙΩΝ ΣΕ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΖΑΧΑΡΟΤΕΥΤΛΩΝ	
Χ. Καβαλάρης, Χ. Καραμούτης, Δ. Παπαμιχαήλ, Θ.Α. Γέμτος.....	151
Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΕΚΜΗΧΑΝΙΣΗΣ ΤΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ ΤΟΥ ΑΜΠΕΛΩΝΑ ΣΤΟ ΔΕΙΚΤΗ Β ΑΣΤΑΘΕΙΑΣ ΤΗΣ ΔΟΜΗΣ ΤΟΥ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ	
Κρικοριάν Α., Νάτσης Α, Αργυροκαστρίτης I ,Βάλμης Σ.....	159
ΚΑΤΑΠΟΛΕΜΗΣΗ ΤΩΝ ΖΙΖΑΝΙΩΝ ΜΕ ΘΕΡΜΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ	
Α.Π. Δεδούσης, D. Kurstjens, J. Mueller.....	167
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ, ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΝΟΣ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΟΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ	

ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΣΕ ΛΩΡΙΔΕΣ ΓΙΑ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΒΑΜΒΑΚΙΟΥ Θ.Α. Γέμτος, Χρ Καβαλάρης, Χρ. Καραμούτης.....	176
ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΠΤΩΣΗΣ ΤΩΝ ΦΘΑΡΜΕΝΩΝ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ Ι. Γράβαλος, Θ. Γιαλαμάς, Ι. Ράπτης, Δ. Κατέρης.....	185

ΕΝΟΤΗΤΑ 3: ΟΙΚΟΝΟΜΙΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ - ΒΙΟΚΑΥΣΙΜΑ

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΧΟΙΡΟΣΤΑΣΙΩΝ Ταμβακίδης Στέλιος, Κουκλίδης Χαράλαμπος, Μαρτζόπουλος Γεράσιμος.....	194
ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΠΑΘΗΤΙΚΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΤΑ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑ ΜΕ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟ CO ₂ Βαφειάδης Δ., Κωτσόπουλος Θ., Νικήτα- Μαρτζοπούλου Χ.....	203
ΜΕΛΕΤΗ ΕΝΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΗΛΙΑΚΩΝ ΑΠΟΣΤΑΚΤΗΡΩΝ Χρυσοβαλάντου Λαμνάτου, Γεώργιος Παπαδάκης, Στυλιανός Ροζάκης.....	211
ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΤΟΥ ΤΟΥ Η ₂ ΩΣ ΜΕΣΟ ΕΠΟΧΙΑΚΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ Γ. Κυριακαράκος, Γ. Παπαδάκης.....	220
ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΝΟΣ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΑΥΤΟΝΟΜΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΠΟ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΚΑΙ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΠΟΥ ΤΡΟΦΟΔΟΤΕΙ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΩΣΜΩΣΗΣ Essam Sh. Mohamed, Γ. Παπαδάκης, Ε. Μαθιουλάκης, Β. Μπελεσιώτης.....	231
ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΑΠΟ ΛΥΜΑΤΑ ΑΓΕΛΑΔΩΝ Κωτσόπουλος Θ., Βαφειάδης Δ., Μαρτζόπουλος Γ.....	240
ΤΕΧΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΥΟ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΝΤΛΗΣΗΣ ΝΕΡΟΥ ΜΕΣΩ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗΣ-ΦΥΣΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ Γ. Κυριακαράκος, Γ. Παπαδάκης.....	248
ΝΕΕΣ ΤΑΣΕΙΣ ΣΤΑ ΒΙΟΚΑΥΣΙΜΑ Λουκία Γερονικολού, Σπύρος Κυρίτσης.....	258
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΛΑΔΙΟΥ ΗΛΙΑΝΘΟΥ ΜΕ ΣΚΟΠΟ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΩΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ Λ. Γερονικολού, Ν. Δαναλάτος, Σ. Αρχοντούλης, Γ. Παπαδάκης.....	268
ΑΠΟΣΤΑΞΗ ΜΕ ΜΕΜΒΡΑΝΗ Γ. Λύχνος, Γ. Λαμπρινός, Μ. Μ. Vahdati.....	279
Ο ΝΟΜΟΣ 3175/2003 ΩΣ ΑΝΑΠΤΥΞΙΑΚΟ ΕΡΓΑΛΕΙΟ ΓΙΑ ΤΙΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ	

**ΕΝΟΤΗΤΑ 4:
ΕΚΜΗΧΑΝΙΣΗ- ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ
ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ - ΑΣΦΑΛΕΙΑ**

ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΩΝ-ΝΕΕΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΕΣ ΓΙΑ ΜΙΑ ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΙΚΗ ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ	
A. Παπαγιαννοπούλου, Χ. Σακκάς, Γ. Κλάδης, Γ. Παρισόπουλος.....	296
ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ 6 ΤΟΥ ΟΕCD ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΔΑΣΙΚΟΥΣ ΚΑΙ ΓΕΩΡΓΙΚΟΥΣ ΕΛΚΥΣΤΗΡΕΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΧΡΗΣΗΣ	
A. Ζουμπανιώτης, Α. Νάτσης, Γ. Παπαδάκης, Χ. Σερσελούδης.....	305
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΤΡΑΠΕΖΑ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΓΩΝΙΩΝ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΕΛΚΥΣΤΗΡΩΝ	
Θ.Α. Γιαλαμάς, Ι.Α. Χαλούλης, Ζ.Ι. Κουτσοφίτης, Α.Θ. Φιλίντας, Κ.Α. Τσατσαρέλης, Α.Η. Τσάκαλος, Κ.Η. Μανώλης.....	318
ΨΕΚΑΣΤΙΚΑ: ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΙ ΣΤΟΝ ΑΓΡΟ	
Νικολαΐδης Χ.Π, Θ.Α.Γέμτος, Ι.Α. Τσιτσιπή.....	327
ΕΛΕΓΧΟΙ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΩΝ ΦΥΤΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΣΤΙΣ ΕΥΡΩΠΑΪΚΕΣ ΧΩΡΕΣ – ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ & ΝΟΜΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ	
Χ. Σακκάς, Α. Παπαγιαννοπούλου, Γ. Παρισόπουλος.....	336
ΤΟ ΓΕΩΡΓΙΚΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΚΑΙ Η ΓΕΩΡΓΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ	
Γ. Γεωργακόπουλος.....	346
ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΙΝΟΥΡΓΩΝ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΩΝ ΦΥΤΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΙΣ ΕΥΡΩΠΑΪΚΕΣ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ	
Γ. Μπουροδήμος, Α. Παπαγιαννοπούλου, Π. Αγγελίνας, Χ. Σακκάς, Γ. Παρισόπουλος.....	350

**ΕΝΟΤΗΤΑ 5:
ΝΕΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ – ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ**

ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΑΛΛΑΓΩΝ ΧΡΗΣΕΩΝ ΓΗΣ ΤΟΥ ΔΑΣΟΥΣ ΤΗΣ ΔΑΔΙΑΣ ΕΒΡΟΥ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ Γ.Π.Σ.	
Δ. Π. Τριαντακωνσταντής, Β. Ι. Κόλλια, Δ. Π. Καλύβας.....	359
ΕΛΕΓΧΟΣ ΟΣΜΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΚΟΜΠΟΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΠΤΗΝΟΤΡΟΦΕΙΩΝ ΑΥΓΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	
Κ. Αργυροπούλου, Νικολ. Χριστοπούλου, F.F. Wembe-Foba-Kue, Δ. Γεωργακάκης.....	369
Η ΕΚΠΛΥΣΗ ΤΩΝ ΝΙΤΡΙΚΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΜΕΤΡΟ ΑΡΔΕΥΤΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ Π. ΣΤΡΥΜΩΝΑ- ΣΥΝΙΣΤΩΣΑ ΤΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ	
Ε. Σταυρινός.....	380
Ο ΤΑΡΑΤΣΟΚΗΠΟΣ ΩΣ ΜΕΣΟΝ ΑΝΤΙΠΛΗΜΜΥΡΙΚΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΤΩΝ ΑΣΤΙΚΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ	
Δ. Ι. Μπαμπίλης, Π. Λόντρα.....	388
ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ G.P.S. ΣΤΙΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΤΟΥ ΔΑΣΟΥΣ	
Καραγιάννης Ευάγγελος, Καραρίζος Πλούταρχος, Δρόσος Βασίλειος, Γιαννούλας Βασίλειος.....	394
ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΗ ΓΕΩΡΓΙΑ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ. ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΧΑΡΤΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΠΟΙΟΤΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΔΥΟ ΠΟΙΚΙΛΙΩΝ ΜΗΛΩΝ	
Ε. Ράππος, Α. Αγγελουπούλου, Ι. Παπαθανασίου, Θ.Α Γέμτος, Γ. Νάνος.....	403
ΑΚΡΙΒΗΣ ΚΑΙ ΑΔΙΑΛΕΙΠΤΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΘΕΣΗΣ ΑΥΤΟΝΟΜΩΝ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΦΙΛΤΡΟΥ KALMAN	
Αμπατζίδης Γ., Βουγιούκας Σ., Blackmore B.S.....	412
ΟΡΓΑΝΩΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΩΝ ΣΤΙΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΤΟΥ ΔΑΣΟΥΣ	
Καραρίζος Πλούταρχος Καραγιάννης Ευάγγελος, Δρόσος Βασίλειος, Γιαννούλας Βασίλειος.....	421
ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΟΡΙΟΘΕΤΗΣΗΣ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΕΚΤΑΣΕΩΝ ΜΕΣΑ ΣΕ ΔΑΣΙΚΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ - ΕΠΙΛΟΓΗ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΩΝ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΔΡΟΜΩΝ	
Βασίλειος Κ. Δρόσος, Βασίλειος Ι. Γιαννούλας, Ευάγγελος Α. Καραγιάννης, Πλούταρχος Β. Καραρίζος.....	429
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΑΥΤΟΝΟΜΩΝ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ	
Βουγιούκας, Σ., Blackmore, Σ., Griepentrog, Η., Φουντάς, Σ.....	438
ΧΩΡΟΧΡΟΝΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΚΛΙΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΙΚΤΩΝ ΣΤΗ ΒΟΡΕΙΑ ΕΛΛΑΔΑ	
Ευάγγελος Μπαλτάς.....	447
HORTIMED-DSS ΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΥΔΡΟΠΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ	
Α. Αναστασίου, Δ. Σάββας, Κ.Αρβανίτης, Ν. Συγριμής.....	457
ΠΟΛΥΠΡΑΚΤΟΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΤΗΝ ΚΑΘΟΔΗΓΗΣΗ ΤΗΣ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΗΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΩΝ	

Δ. Λάμπρου, Α. Αναστασίου, Η. Βαρλάγκας, Κ. Αρβανίτης, Ν. Συγριμής.....	467
ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΑΛΛΑΓΩΝ ΧΡΗΣΕΩΝ ΓΗΣ ΣΕ ΕΝΑ ΧΩΡΟΧΡΟΝΙΚΟ Γ.Π.Σ.	
Δ. Π. Τριαντακωνσταντής, Β. Ι. Κόλλια, Δ. Π. Καλύβας.....	476

ΕΝΟΤΗΤΑ 6: ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ - ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΓΡΟΤΙΚΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ

ΨΗΦΙΑΚΟΣ ΑΥΤΟΜΑΤΟΣ ΈΛΕΓΧΟΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΑΕΡΑ ΣΕ ΕΙΣΟΔΟ ΞΗΡΑΝΤΗΡΑ	
Δ. Μπόχτης, Σ. Βουγιούκας, Κ. Ακριτίδης.....	489
ΕΛΑΧΙΣΤΟΣ ΧΡΟΝΟΣ ΑΣΦΑΛΟΥΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΡΥΘΜΟΥ ΑΝΑΠΝΟΗΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΕΚΛΥΟΜΕΝΟ CO ₂ , ΜΗΛΩΝ ΠΟΥ ΣΥΝΤΗΡΗΘΗΚΑΝ ΣΕ ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ	
Δ. Μητρόπουλος, Γρ. Λαμπρινός.....	499
ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ ΤΟΥ ΑΜΥΛΟΥ ΣΕ ΔΙΑΛΥΤΑ ΣΑΚΧΑΡΑ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΜΗΛΩΝ DELICIOUS PILAFA.	
Δ. Μητρόπουλος, Ε. Μανωλοπούλου, Γρ. Λαμπρινός.....	508
ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΣΥΣΚΕΥΑΣΙΑΣ ΣΤΗΝ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΚΟΜΜΕΝΟΥ ΕΤΟΙΜΟΥ ΓΙΑ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΜΑΡΟΥΛΙΟΥ	
Ι. Μαρίτσα, Ε. Μανωλοπούλου, Γ. Λαμπρινός.....	516
ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΜΗΛΩΝ DELICIOUS PILAFA ΚΑΙ GRANNY SMITH ΚΑΤΑ ΤΗ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΤΟΥΣ.	
Δ. Μητρόπουλος, Γρ. Λαμπρινός, Ε. Αραβαντινός.....	526
ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗ ΞΗΡΑΝΣΗΣ ΣΥΚΩΝ ΣΕ ΜΟΝΗ ΣΤΡΩΣΗ ΜΕ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΝΤΛΙΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ	
Γ. Ξανθόπουλος, Ν. Οικονόμου, Ε. Μανωλοπούλου, Γρ. Λαμπρινός.....	535
ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΣΤΟΝ ΜΩΛΩΠΙΣΜΟ ΤΡΙΩΝ ΠΟΙΚΙΛΙΩΝ ΜΗΛΩΝ	545
Χ. Παπαϊωάννου, Μ. Κόκκορα, Π. Ντιούδης, Ι. Κόκκορας.....	
ΜΕΤΑΣΥΛΛΕΚΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΧΛΩΡΙΟΥΧΟΥ ΑΣΒΕΣΤΙΟΥ ΣΕ ΣΥΝΤΗΡΟΥΜΕΝΗ ΜΕ ΨΥΞΗ ΠΙΠΕΡΙΑ ΚΑΙ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΗΝ ΠΟΙΟΤΗΤΑ	
Α. Κουφάκη, Ε. Μανωλοπούλου.....	552
Ο ΡΟΛΟΣ ΤΗΣ ΣΥΣΚΕΥΑΣΙΑΣ ΣΤΗΝ ΑΝΑΠΝΟΗ ΚΑΙ ΣΤΑ ΠΟΙΟΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΜΑΝΤΑΡΙΝΙΟΥ ΠΟΙΚΙΛΙΑΣ “ENCORE”	
Γ. Λύχνος, Γ. Λαμπρινός, Ε. Μανωλοπούλου, Ι. Συκιώτης.....	561
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΡΥΘΜΟΥ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ	

ΚΑΤΑΝΑΛΙΣΚΟΜΕΝΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΤΕΧΝΗΤΗ ΞΗΡΑΝΣΗ ΣΥΚΩΝ	
N. Οικονόμου, Γ. Ξανθόπουλος, Γρ. Λαμπρινός.....	571
ΠΟΙΟΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΑΡΟΥΛΙΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΧΡΩΜΑΤΟΜΕΤΡΟΥ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΕΙΚΟΝΑΣ	
E. Χατζής, Γ. Ξανθόπουλος, Γρ. Λαμπρινός, Α. Κούρτης.....	580
ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΞΗΡΑΝΣΗΣ ΜΑΝΙΤΑΡΙΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΘΕΡΜΟΥ ΑΕΡΑ ΚΑΙ ΥΠΕΡΘΕΡΜΟΥ ΑΤΜΟΥ	
Αυγερινός Ν. Δημητριάδης.....	588
ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΣΥΣΚΕΥΑΣΙΩΝ ΣΤΗΝ ΑΦΥΔΑΤΩΣΗ ΚΑΙ ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ ΣΥΝΤΗΡΟΥΜΕΝΩΝ ΛΕΜΟΝΙΩΝ ΠΟΙΚΙΛΙΑΣ “ΜΑΓΛΗΝΟ”	
A.-M. Βασιλάρου, E. Μανωλοπούλου, Γ. Λαμπρινός.....	598
ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΑΣΤΙΚΟΥ ΠΟΛΥΔΥΝΑΜΟΥ ΨΥΓΕΙΟΥ	
E. Χατζής, Π. Ξένος – Κοκολέτσης, Γρ. Λαμπρινός.....	606
ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΗ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΔΡΕΠΤΟΥ ΤΡΙΑΝΤΑΦΥΛΛΟΥ	
M. Ρήγκου, Δ. Μητρόπουλος, Π. Πατεράκη, Γ. Λαμπρινός.....	614

ΕΝΟΤΗΤΑ 7^η ΥΔΑΤΙΚΟΙ ΠΟΡΟΙ

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΒΕΛΤΙΣΤΟ ΥΔΡΑΥΛΙΚΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΙΚΡΟΑΡΔΕΥΣΗΣ ΣΕ ΕΠΙΚΛΙΝΗ ΕΔΑΦΗ Ι.Δ.Βαλιάντζας, Α.Ασημακόπουλος, Ν.Δέρκας, Κ.Σούλης.....	624
ΑΠΛΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΣΥΝΕΧΗΣ ΜΕΘΟΔΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΩΝ ΑΡΔΕΥΤΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ Μ. Θεοχάρης, Χ. Τζιμόπουλος, Σ. Γιαννόπουλος, Μ. Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη.....	640
ΑΡΔΕΥΣΗ ΖΑΧΑΡΟΤΕΥΤΛΩΝ ΜΕ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΣΤΑΓΟΝΑ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΕΠΙΠΕΔΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΝΕΡΟΥ Μ. Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, Κ. Δημοπούλου	650
ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟΥ ΕΥΡΟΥΣ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΣΕ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΖΑΧΑΡΟΤΕΥΤΛΩΝ. Μ. Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, Κ. Δημοπούλου	658
ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΥΣΤΕΡΗΣΗΣ ΣΤΗΝ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΩΝ ΚΑΤΑΤΟΜΩΝ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΚΛΥΣΗ ΕΔΑΦΩΝ Κάργας Γ., Αργυροκαστρίτης Ι., Π. Κερκίδης.....	667
ΟΡΘΟΛΟΓΙΚΗ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΥΔΑΤΩΝ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΛΙΒΑΔΙΟΥ Ν. ΛΑΡΙΣΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΡΔΕΥΣΗ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ Δ. Καλφούντζος, Γ. Ζαβάκος, Ι. Καλαβρουζιώτης, Ι. Αλεξίου, Σ. Κωτσόπουλος , Κ. Γκούμας, Κ. Δραγοΐδου.....	677
ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΒΑΘΟΥΣ ΤΟΥ ΜΕΤΩΠΙΟΥ ΔΙΑΒΡΟΧΗΣ ΥΠΟ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΠΗΓΗ ΣΤΑΓΔΗΝ ΑΡΔΕΥΣΗΣ, ΛΑΜΒΑΝΟΝΤΑΣ ΥΠΟΨΗ ΤΗΝ ΕΞΑΤΜΙΣΗ ΚΑΙ ΤΗ ΔΙΑΠΝΟΗ Νικόλαος Μαλάμος, Σταμάτης Ελμαλόγλου.....	687
ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ ΕΠΑΡΚΕΙΑΣ ΣΥΛΛΟΓΙΚΩΝ ΑΡΔΕΥΤΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΥΠΟ ΠΙΕΣΗ-ΠΙΛΟΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΔΙΚΤΥΟ ΤΟΥ ΠΗΝΕΙΟΥ ΗΛΕΙΑΣ Αικ. Γκαγκάκη, Ν.Δέρκας, Γ.Καραντούνιας.....	700
ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΧΩΡΙΚΗΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΤΗΤΑΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ Χ. Καλλιτσάρη, Χ. Γεωργούσης, Χ. Μπαμπατζιμόπουλος, Α. Πανώρας, Δ.Καλαμπίδης.....	711
ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΠΡΟΕΛΑΣΗΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΑΡΔΕΥΣΗ ΜΕ ΛΩΡΙΔΕΣ Ιωάννης Ι. Χατζησπύρογλου, Ευαγγελία Αναστασιάδου-Παρθενίου.....	721
ΡΗΤΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΣΥΖΥΓΩΝ ΒΑΘΩΝ ΥΔΡΑΥΛΙΚΟΥ ΑΛΜΑΤΟΣ ΣΕ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ Γεώργιος Α. Τερζίδης, Μαρία Δ. Μπαντή.....	731
ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΟΥ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ΚΑΙ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΤΗΣ ΛΙΜΝΗΣ ΒΟΛΒΗΣ Ι. Γιαννοπούλου, Δ. Παπαμχαήλ, Β. Αντωνόπουλος.....	740
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΠΟΛΥΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΝΕΡΟΥ ΠΟΤΑΜΩΝ ΤΗΣ Β. ΕΛΛΑΔΑΣ	

Μαρία Ι. Διαμαντοπούλου, Βασίλειος Ζ. Αντωνόπουλος.....	750
ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΟΥ ΚΑΘΕΣΤΩΤΟΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΣΤΑ ΥΔΑΤΙΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΩΝ ΠΟΤΑΜΩΝ ΤΗΣ ΒΟΡΕΙΑΣ ΕΛΛΑΔΟΣ	
Κυριακίδης Ι.Ν., Γ. Ζαλίδης, Β. Ζ. Αντωνόπουλος, Ν. Μισοπολινός.....	760
ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΜΟΝΑΔΙΑΙΩΝ ΥΔΡΟΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΗ ΒΟΗΘΕΙΑ ΤΗΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΘΕΙΣΑΣ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΗΣ ΔΙΧΜΗΣ ΜΙΑΣ ΡΑΓΔΑΙΑΣ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ	
Π. Ε. Γεωργίου, Δ. Μ. Παπαμιχαήλ, Δ. Ν. Καραμούζης.....	773
ΣΥΝΘΕΤΙΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΠΙΣΥΜΒΑΣΗΣ ΗΜΕΡΗΣΙΩΝ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΕΩΝ ΜΕ ΤΗ ΒΟΗΘΕΙΑ ΑΛΥΣΙΔΩΝ ΜΑΡΚΟΒ	
Π. Ε. Γεωργίου, Δ. Μ. Παπαμιχαήλ.....	782
ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΟΡΙΟΥ ΕΚΡΟΗΣ ΤΟΥ ΓΛΥΚΟΥ ΝΕΡΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΘΑΛΑΣΣΙΝΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΕ ΠΑΡΑΚΤΙΟΥΣ ΥΔΡΟΦΟΡΕΙΣ	
Χ. Δουλγέρης, Θ. Ζήσης.....	792
ΕΝΔΟΔΑΣΙΚΗ ΚΙΝΗΣΗ ΕΛΚΥΣΤΗΡΩΝ ΣΕ ΑΔΙΑΤΑΡΑΚΤΑ ΕΔΑΦΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΤΟΥ ΞΥΛΟΥ	
Καραγιάννης Κωνσταντίνος.....	801
ΤΟ ΥΣΤΕΡΗΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ PARLANGE . ΧΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΑΔΥΝΑΜΙΕΣ	
Κάργας Γ., Φασουλή Β., Κερκίδης Π., Ι. Αργυροκαστρίτης.....	810

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΒΕΛΤΙΣΤΟ ΥΔΡΑΥΛΙΚΟ
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΙΚΡΟΑΡΔΕΥΣΗΣ
ΣΕ ΕΠΙΚΛΙΝΗ ΕΔΑΦΗ**

Ι.Α.Βαλιάντζας, Α.Ασημακόπουλος, Ν.Δέρκας, Κ.Σούλης
Εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής
Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών
lhyd2vay@aua.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται ένα λογισμικό που αναπτύχθηκε με στόχο την διευκόλυνση του βέλτιστου σχεδιασμού συστημάτων μικροάρδευσης. Στο πρόγραμμα αυτό υλοποιείται μια νέα μέθοδος σχεδιασμού αγωγών πολλαπλών εκροών με δυο διαφορετικές διαμέτρους. Τα κόστη των αγωγών υπεισέρχονται έμμεσα κατά το σχεδιασμό ενώ υπάρχει η δυνατότητα να ληφθεί υπόψη και το κόστος ενέργειας. Η μέθοδος έχει άμεση εφαρμογή στο σχεδιασμό συστημάτων μικροάρδευσης, όπου οι πλευρικοί ή οι δευτερεύοντες αγωγοί μπορεί να βρίσκονται υπό κλίση. Γίνεται συστηματική διερεύνηση για την εύρεση της θέσης του απόλυτου μέγιστου ή ελάχιστου φορτίου πίεσης καθ' όλο το μήκος του αγωγού. Γίνεται παρουσίαση του διαγράμματος ροής του προγράμματος και των βασικών παραθύρων εισόδου δεδομένων και εξαγωγής αποτελεσμάτων. Για την ανάπτυξη της εφαρμογής, η οποία τρέχει σε περιβάλλον Windows, χρησιμοποιήθηκε η γλώσσα προγραμματισμού MS Visual Basic.

**DEVELOPMENT OF A SOFTWARE TOOL FOR THE HYDRAULIC
DESIGN OF MICROIRRIGATION SYSTEMS WITH SLOPING
IRRIGATION PIPELINES.**

J.D.Valiantzas, A.Asimakopoulos, N.Dercas, K.Soulis
Laboratory of Agricultural Hydraulics
Agricultural University of Athens
lhyd2vay@aua.gr

ABSTRACT

A software tool was developed in order to aid the design of microirrigation systems. A new design method for sloping two-diameter multi-outlet pipelines is used in this software. The pipe size costs interfere implicitly in the design procedure. The cost of energy can be also taken into consideration. The method can be applied for the design of microirrigation systems with sloping laterals or manifold pipelines. A systematic investigation of the position of the global maximum or minimum pressure head values along the two diameter pipelines is also given. In this program, the above described methodology was implemented using Microsoft's Visual Basic programming language and is running under the MS Windows Operating System. Lastly, the flow chart and the main windows of the program are presented.

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα συστήματα μικροάρδευσης χαρακτηρίζονται από σχετικά υψηλό κόστος επένδυσης και κόστος λειτουργίας. Καθώς τα συστήματα μικροάρδευσης γίνονται όλο και περισσότερο δημοφιλή, η ανάγκη εφαρμογής ενός βέλτιστου σχεδιασμού (εξασφάλιση της επιθυμητής δόσης άρδευσης και ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση του κόστους) είναι πλέον εμφανής. Η μέθοδος της μικροάρδευσης συνίσταται σε περιπτώσεις εδαφών με κλίση αλλά και σε οριζόντια εδάφη. Συχνά, οι πλευρικοί αγωγοί των υπομονάδων μικροάρδευσης σχεδιάζονται να είναι οριζόντιοι, ενώ οι δευτερεύοντες υπό κλίση. Σε άλλες πάλι περιπτώσεις οι πλευρικοί αναγκαστικά βρίσκονται υπό κλίση. Σε όλες όμως τις περιπτώσεις με κλίσεις συνίσταται η χρήση αγωγών δυο ή ακόμα και τριών διαφορετικών διαμέτρων καθώς τα φορτία πίεσης που αναπτύσσονται στο τέλος των αγωγών ενδέχεται να έχουν υπερβολικά μεγάλες τιμές.

Πολλοί ερευνητές έχουν ασχοληθεί με το βέλτιστο σχεδιασμό δικτύων αγωγών με ενιαία όμως διάμετρο σε όλο τους το μήκος. Οι Wu and Gitlin (1975) και Wu (1997) προτείνουν την ανάλυση αγωγών πολλαπλών εκροών με μια και μοναδική διάμετρο. Ο Valiantzas (1998) πρότεινε αναλυτικές διαδικασίες σχεδιασμού αγωγών με μια διάμετρο κατά τις οποίες λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της ανομοιομορφίας των παροχών εκροής καθώς και του πλήθους των εκροών (Valiantzas, 2002a). Αριθμητικές τεχνικές σχεδιασμού με τη βοήθεια H/Y έχουν επίσης αναπτυχθεί, οι οποίες όμως συνήθως περιορίζονται στη βελτιστοποίηση δικτύων αγωγών με μια και μοναδική διάμετρο (Bralts et al. 1993, Kang and Nishiyama 1996a,b).

Οι γραφικές μέθοδοι που αναφέρονται από τους Keller and Bliesner (1990) για το σχεδιασμό αγωγών πολλαπλών εκροών με διαφορετικές διαμέτρους δίνουν έμφαση στην ικανοποίηση του υδραυλικού κριτηρίου χωρίς να λαμβάνουν υπόψη το κόστος των αγωγών. Ο Valiantzas (2002b) πρότεινε μια αναλυτική λύση υδραυλικής ανάλυσης αγωγών με διαφορετικές διαμέτρους, στην οποία λαμβάνονται υπόψη η ανομοιομορφία των παροχών εκροής και το πλήθος των εκροών. Σε άλλη εργασία του ο Valiantzas (2003a) πρότεινε μια αναλυτική μέθοδο βέλτιστου υδραυλικού σχεδιασμού μιας υπομονάδας μικροάρδευσης στην οποία οι δευτερεύοντες και οι πλευρικοί αγωγοί είναι πολλών διαμέτρων. Τα κόστη των σωλήνων λαμβάνονται άμεσα υπόψη, ενώ για κατηγορικές κλίσεις των αγωγών εξετάζονται η πιο συχνά εμφανιζόμενη περίπτωση κατά την οποία το απόλυτο μέγιστο φορτίο βρίσκεται στην είσοδο του αγωγού, ενώ το απόλυτο ελάχιστο στο τελευταίο τμήμα του αγωγού με τη μικρότερη διάμετρο. Τέλος, πρόσφατα ο Valiantzas (2003b) πρότεινε μια απλή διαδικασία προσδιορισμού των οικονομικών διαμέτρων σε δευτερεύοντες αγωγούς μεταφοράς με διαφορετικές διαμέτρους λαμβάνοντας υπόψη και το κόστος ενέργειας.

Πιο κάτω παρουσιάζεται μέθοδος σχεδιασμού υπομονάδας μικροάρδευσης όπου λαμβάνεται υπόψη: α) η άμεση ικανοποίηση του υδραυλικού κριτηρίου (ομοιομορφία άρδευσης), β) εμμέσως το κόστος των αγωγών (Βαλιαντζας, 2003). Επιπρόσθετα, υπολογίζεται το συνολικό κόστος της υπομονάδας (κόστος αγωγών + κόστος ενέργειας).

Ο δευτερεύων αγωγός της υπομονάδας βρίσκεται στο κέντρο της. Μπορεί να είναι υπό κατηγορική κλίση ή οριζόντιος και να αποτελείται από μία ή δυο διαφορετικές διαμέτρους. Οι πλευρικοί αγωγοί είναι οριζόντιοι μιας και μοναδικής διαμέτρου.

Η μέθοδος της υδραυλικής ανάλυσης που χρησιμοποιείται λαμβάνει υπόψη: α) την ανομοιομορφία των παροχών εκροής και β) την επίδραση του πλήθους των εκροών. Για την διευκόλυνση των υπολογισμών παρέχεται η δυνατότητα επίλυσης της μεθόδου με τη βοήθεια προγράμματος ηλεκτρονικού υπολογιστή.

2. ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ

2.1. Βέλτιστος σχεδιασμός των πλευρικών αγωγών

Ένα γενικό κριτήριο σχεδιασμού υπομονάδας ορίζει ότι η μέγιστη διαφορά φορτίων στους διανεμητές νερού (σταλλάκτες και μικροεκτοξευτήρες) που βρίσκονται σε όλη την έκταση της υπομονάδας πρέπει να είναι μικρότερη ενός μέγιστου επιτρεπτού ορίου μεταβολής ΔH_{su} (ASAE Standards, 1998). Η τιμή του ΔH_{su} προκύπτει από την επιθυμητή τιμή του συντελεστή ομοιομορφίας EU που ορίζεται (Karmeli and Keller, 1975):

$$EU = \left(1 - 1,27 \frac{C_v}{\sqrt{N_p}} \right) \frac{q_{\min}}{q_{av}} \quad (1)$$

όπου C_v = συντελεστής μεταβολής του διανεμητή (από κατασκευαστή), N_p = αριθμός διανεμητών ανά φυτό, q_{\min} = ελάχιστη παροχή διανεμητή στην υπομονάδα, q_{av} = μέση παροχή διανεμητών υπομονάδας. Θεωρώντας ότι το q_{av} προσεγγίζεται από την κανονική παροχή λειτουργίας των διανεμητών ($q_{av}=q_s$) και για γνωστή τιμή του συντελεστή ομοιομορφίας προσδιορίζεται η ελάχιστη παροχή διανεμητή στην υπομονάδα q_{\min} και το ελάχιστο φορτίο πίεσης H_{\min} από την εξίσωση της καμπύλης εκροής των διανεμητών:

$$q = cH^y \quad (2)$$

όπου q η παροχή του διανεμητή σε L/s, το φορτίο λειτουργίας σε m και c, y σταθερές του διανεμητή. Στα συστήματα μικροάρδευσης η y παίρνει τιμές μεταξύ 0 και 1. Σημειώνεται όταν το H είναι ίσο με το κανονικό φορτίο H_s , τότε η παροχή παίρνει την κανονική τιμή q_s .

Σύμφωνα με του Keller and Bliesner (1990) η μέγιστη επιτρεπτή μεταβολή του φορτίου πίεσης στην υπομονάδα υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\Delta H_{su} = 2,5 (H_{av} - H_{\min}) \quad (3)$$

Η μεταβολή αυτή μοιράζεται ισόποσα μεταξύ των πλευρικών αγωγών και του δευτερεύοντα (Keller and Bliesner, 1990)

$$\Delta H_L = \Delta H_M = 0,5 \Delta H_{su} \quad (4)$$

Οι Scaloppi and Allen (1993) θεωρώντας γραμμική αποφόρτιση των εκροών κατά μήκος του αγωγού (οι εκροές δίνουν όλες την ίδια παροχή q_{av}) και άπειρο τον αριθμό των διανεμητών, προσδιόρισαν τη σχέση που δίνει την συνολική παροχή που διέρχεται κατά μήκος του αγωγού:

$$Q(x) = Q_{in} \left(\frac{x}{L} \right) \quad (5)$$

όπου

L = μήκος του αγωγού

$Q_{in} = q_s N$ = παροχή εισόδου

x = απόσταση απ' το τέλος του αγωγού

N = αριθμός τροφοδοτούμενων διανεμητών

H σχέση που προσδιορίζει την κλίση των γραμμικών απωλειών ενέργειας κατά μήκος αγωγού είναι (Christiansen, 1942):

$$\frac{dH_f(x)}{dx} = S_f(x) = C_f \frac{Q^m(x)}{D^{m+3}} \quad (6)$$

όπου

$S_f(x)$ = κλίση των απωλειών ενέργειας κατά μήκος του αγωγού

$Q(x)$ = παροχή που διέρχεται από σημείο που απέχει απόσταση x από το τέλος του αγωγού

D = εσωτερική διάμετρος αγωγού

m , C_f = σταθερές παράμετροι που εξαρτώνται από τη μορφή του τύπου που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των γραμμικών απωλειών ενέργειας.

Έτσι, όταν χρησιμοποιείται ο τύπος των Hazen-Williams, $m=1,852$, $C_f=10.692/(C_{HZ})^m$, όπου C_{HZ} = συντελεστής τραχύτητας κατά Hazen-Williams με Q εκπεφρασμένο σε m^3/s και D σε m . Για πλαστικούς σωλήνες μικροάρδευσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί η εξίσωση των Darcy-Weisbach, $m=1,75$, $C_f=7,89 \times 10^5$ με Q σε L/s και D σε mm .

Από τις Εξ.5 και Εξ.6 προκύπτει σχέση που περιγράφει τις γραμμικές απώλειες συναρτήσει της απόστασης από το τέλος του αγωγού (Valiantzas 2002a):

$$H_f(x) = \frac{H_{f0}}{m+1} \left(\frac{x}{L_r} \right)^{m+1} \quad (7)$$

όπου $H_{f0} = C_f \frac{Q_{in}^m}{D^{m+3}} L_r$ είναι οι απώλειες φορτίου πίεσης σε υποθετικό αγωγό

μήκους $L_r=L=sN$ και διαμέτρου D που μεταφέρει την παροχή Q_{in} σε όλο ο μήκος του.

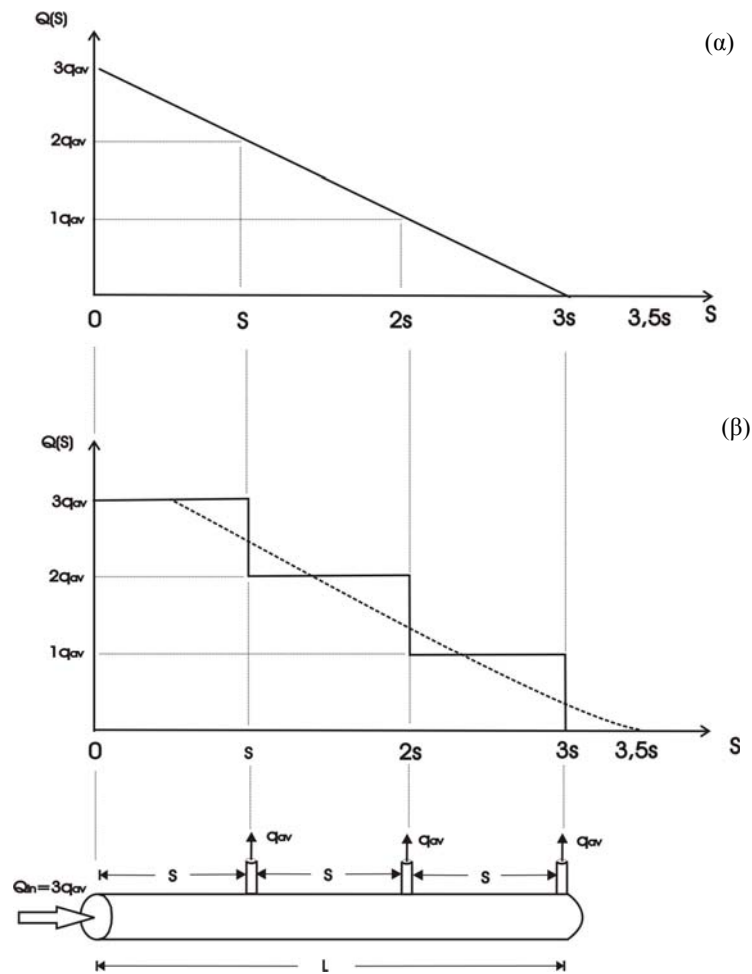
Για $x=L=L_r$ βρίσκουμε τις συνολικές απώλειες (Valiantzas 2002a):

$$H_f(L) = F \cdot H_{f0} \quad (8)$$

όπου $F = \frac{1}{m+1}$ διορθωτικός συντελεστής απωλειών για άπειρο πλήθος εκροών

και ομοιόμορφη ένταση εκροής.

Στη περίπτωση όπου ο αγωγός αποτελείται από τρεις εκροές, που βρίσκονται σε απόσταση 's', η σχέση των Scaloppi and Allen (Εξ.5) οδηγεί σε μεταβολή της παροχής σύμφωνα με το σχήμα 1α. Γίνεται φανερό ότι η τελευταία εκροή έχει μηδενική παροχή.



Σχήμα 1. Κατανομή συνολικής παροχής αγωγού τριών εκροών

Ο Valiantzas (2002a) απέδειξε ότι μια μεταβολή της παροχής κατά μήκος του αγωγού σύμφωνα με αυτή του σχήματος 1β ανταποκρίνεται περισσότερο στο φαινόμενο. Ο Valiantzas (2002a) προσδιόρισε την αντίστοιχη εξίσωση της παροχής λαμβάνοντας υπόψη την ανομοιομορφία των παροχών εκροής:

$$Q(x) = Q_{in} \left(\frac{x}{L_r} + \frac{1}{2N} \right)^a \quad (9)$$

όπου L_r =συνολικό μήκος αγωγού και a =συντελεστής που λαμβάνει υπόψη την ανομοιομορφία της έντασης εκροής κατά μήκος του αγωγού (Valiantzas 1998, 2002a).

Η ολοκλήρωση της Εξ. 6 από 0 έως x , λαμβάνοντας υπόψη την Εξ.9, οδηγεί στη σχέση που δίνει το φορτίο σε κάθε σημείο του αγωγού όπως επίσης το νέο διορθωτικό συντελεστή απωλειών (Valiantzas, 2002a) στο οποίο λαμβάνονται υπόψη ο αριθμός των εκροών αλλά και η ανομοιομορφία της έντασης εκροής κατά μήκος της γραμμής άρδευσης (συντελεστής α):

$$F_V = \frac{1}{am+1} \left[\left(1 + \frac{1}{2N} \right)^{a \cdot m + 1} - \left(\frac{1}{2N} \right)^{a \cdot m + 1} \right]$$

(10)

Το μέγιστο μήκος των πλευρικών αγωγών μπορεί να προσδιοριστεί από την Εξ.8 θεωρώντας ότι οι συνολικές γραμμικές απώλειες του αγωγού είναι ίσες με τη μέγιστη επιτρεπτή μεταβολή του φορτίου πίεσης στους πλευρικούς αγωγούς, δηλαδή $H_r(L) = \Delta H_L$.

Αρχικά, μπορεί να θεωρηθεί ότι ο αγωγός έχει άπειρες εκροές όποτε μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο F_L χωρίς κίνδυνο σφάλματος και να υπολογιστεί ένα αρχικό μήκος L_0 . Στη συνέχεια μπορεί να προσδιοριστεί το πλήθος των εκροών N , η τιμή του εμπειρικού δείκτη α και κατόπιν ο F_V ο οποίος αντικαθίσταται στη σχέση (8) προκειμένου να υπολογιστεί το τελικό μήκος L .

2.2. Βέλτιστος σχεδιασμός δευτερεύοντα αγωγού

Η διαστασιολόγηση του δευτερεύοντα αγωγού θα γίνει με τη βοήθεια των εξισώσεων που περιγράφουν την κατανομή του φορτίου πίεσης κατά μήκος αγωγών πολλαπλών εκροών.

2.2.1. Δευτερεύων 2 διαμέτρων

Πρόσφατα ο Valiantzas (2002b) παρουσίασε μια νέα αναλυτική λύση για τον υπολογισμό του φορτίου πίεσης κατά μήκος αγωγού πολλαπλών εκροών με 2 διαφορετικές διαμέτρους. Στην ανάλυση, που είναι προσέγγιση συνεχούς εκροής, λαμβάνεται υπόψη η επίδραση του πλήθους των εκροών N και η ανομοιομορφία των παροχών εκροής. Για διευκόλυνσή μας εισάγεται η αδιάστατη μεταβλητή μήκους U που είναι ίση με:

$$U = \frac{x}{L_r} + \frac{1}{2N}$$

(11)

με $L_r = L = sN$

Στις αποστάσεις x_0 (κλειστό άκρο), x_1 (σημείο αλλαγής της διαμέτρου) και x_2 (είσοδος του αγωγού) αντιστοιχούν οι αδιάστατες αποστάσεις U_0 , U_1 και U_2 .

Η εξίσωση που περιγράφει την κατανομή του φορτίου πίεσης στο τελευταίο τμήμα του δευτερεύοντα με διάμετρο D_1 συναρτήσει της απόστασης U είναι (Valiantzas, 2002b):

$$H_1(U) = H'_d + \frac{H_{f(1)}}{am+1} U^{a \cdot m + 1} - S_0 L_r U \quad U_0 \leq U \leq U_1$$

(12)

όπου H'_d = εικονικό φορτίο πίεσης στο σημείο U ($x = -s/2$).

Ενώ το φορτίο πίεσης για το αρχικό τμήμα του δευτερεύοντα με διάμετρο D_2 είναι (Valiantzas, 2002b):

$$H_2(U) = H'_d + \frac{H_{f(1)} - H_{f(2)}}{am + 1} U_1^{am+1} + \frac{H_{f(2)}}{am + 1} U^{am+1} - S_0 L_r U$$

$$U_1 \leq U \leq U_2 \quad (13)$$

$$\text{με } H_{f(i)} = C_f \frac{Q_{in}^m}{D_{(i)}^{m+3}} L_r \quad \forall i = 1, 2$$

Οι θέσεις των τοπικά μέγιστων τιμών του φορτίου πίεσης σε έναν τέτοιο αγωγό, που βρίσκεται σε κατηφορική κλίση, θα πρέπει να αναζητηθούν στα άκρα των αγωγών που απαρτίζουν τον δευτερεύοντα αγωγό, δηλαδή στα σημεία U_0 , U_1 και U_2 .

Οι θέσεις των τοπικά ελάχιστων τιμών του φορτίου πίεσης U_{min1} και U_{min2} που αντιστοιχούν στα τμήματα του αγωγού με διάμετρο D_1 και D_2 δίνονται από την παρακάτω σχέση (Valiantzas, 2002b):

$$U_{min(i)} = \left(\frac{S_0 \cdot L_r}{H_{f(i)}} \right)^{\frac{1}{am}}, \quad \forall i = 1, 2 \quad \text{με } U_{min1} \geq U_0, U_{min1} \leq U_1, U_{min2} \geq U_1, U_{min2} \leq U_2 \quad (14)$$

Διερεύνηση

Σύμφωνα με τα παραπάνω, υπάρχουν 6 πιθανές μέγιστες μεταβολές του φορτίου πίεσης:

i) Το ολικό μέγιστο βρίσκεται στην είσοδο του αγωγού ($H_{max} = H_2(U_2)$) και το ολικό ελάχιστο στο τελευταίο τμήμα του αγωγού με διάμετρο D_1 ($H_{min} = H_1(U_{min1})$). Τότε σύμφωνα με τις Εξ.12, Εξ.13 και Εξ.14 προκύπτει:

$$\Delta H^{(0)} = H_2(U_2) - H_1(U_{min1}) = K U_1^{am+1} + F_2(U_2) - F_1(U_{min1})$$

(15)

όπου

$$K = \frac{1}{am + 1} [H_{f(1)} - H_{f(2)}] \quad (16)$$

$$F_i(U) = \frac{H_{f(i)}}{(am + 1)} U^{am+1} - S_0 L_r U \quad \forall i = 1, 2 \quad (17)$$

ii) Το ολικό μέγιστο βρίσκεται στην είσοδο του αγωγού ($H_{max} = H_2(U_2)$) και το ολικό ελάχιστο στο τμήμα του αγωγού με διάμετρο D_2 ($H_{min} = H_2(U_{min2})$). Τότε σύμφωνα με τις Εξ.13, Εξ.14 και Εξ.17 προκύπτει:

$$\Delta H^{(2)} = H_2(U_2) - H_2(U_{min2}) = F_2(U_2) - F_2(U_{min2})$$

(18)

iii) Το ολικό μέγιστο βρίσκεται στο τέλος του αγωγού ($H_{\max}=H_1(U_0)$) και το ολικό ελάχιστο στο τμήμα του αγωγού με διάμετρο D_1 ($H_{\min}=H_1(U_{\min 1})$). Τότε σύμφωνα με τις Εξ.12, Εξ.14 και Εξ.17 προκύπτει:

$$\Delta H^{(3)} = H_1(U_0) - H_1(U_{\min 1}) = F_1(U_0) - F_1(U_{\min 1}) \quad (19)$$

iv) Το ολικό μέγιστο βρίσκεται στο τέλος του αγωγού ($H_{\max}=H_1(U_0)$) και το ολικό ελάχιστο στο τμήμα του αγωγού με διάμετρο D_2 ($H_{\min}=H_2(U_{\min 2})$). Τότε προκύπτει:

$$\Delta H^{(4)} = H_1(U_0) - H_2(U_{\min 2}) = -KU_1^{a-m+1} + F_1(U_0) - F_2(U_{\min 2}) \quad (20)$$

v) Το ολικό μέγιστο βρίσκεται στο σημείο αλλαγής της διαμέτρου ($H_{\max}=H_1(U_1)$) και το ολικό ελάχιστο στο τμήμα του αγωγού με διάμετρο D_1 ($H_{\min}=H_1(U_{\min 1})$). Τότε προκύπτει

$$\Delta H^{(5)} = H_1(U_1) - H_1(U_{\min 1}) = F_1(U_1) - F_1(U_{\min 1}) \quad (21)$$

vi) Το ολικό μέγιστο βρίσκεται στο σημείο αλλαγής της διαμέτρου ($H_{\max}=H_1(U_1)$) και το ολικό ελάχιστο στο τμήμα του αγωγού με διάμετρο D_2 ($H_{\min}=H_2(U_{\min 2})$). Τότε προκύπτει:

$$\Delta H^{(6)} = H_1(U_1) - H_2(U_{\min 2}) = -KU_1^{a-m+1} + F_1(U_1) - F_2(U_{\min 2}) \quad (22)$$

Θεωρώντας γνωστό το συνολικό μήκος του δευτερεύοντα αγωγού και υποθέτοντας ότι ισχύει η περίπτωση (i) (που είναι και η πιο συνηθισμένη), μπορεί να προσδιοριστεί η άγνωστη παράμετρος U_1 θέτοντας $\Delta H^{(1)} = \Delta H_M$. Οποτε προκύπτει:

$$U_1 = \left(\frac{\Delta H_M - F_2(U_2) + F_1(U_{\min 1})}{K} \right)^{\frac{1}{am+1}} \quad (23)$$

Στη συνέχεια θα πρέπει να διερευνηθεί εάν η μέγιστη μεταβολή του φορτίου πίεσης στον αγωγό είναι όντως αυτή που αρχικά υποθέσαμε (περίπτωση (i)). Για το σκοπό αυτό θα πρέπει να υπολογιστούν και οι υπόλοιπες 5 πιθανές μέγιστες μεταβολές του φορτίου πίεσης για την τιμή του U_1 που έχει βρεθεί. Εάν όλες οι μεταβολές είναι μικρότερες ή ίσες από την μέγιστη επιτρεπτή ΔH_M , τότε η παράμετρος U_1 είναι αποδεκτή στο σχεδιασμό. Σε αντίθετη περίπτωση, προσδιορίζεται η παράμετρος U_1 από τις περιπτώσεις (iv) ή (v) ή (vi) (οι (ii) και (iii) δεν λύνονται ως προς U_1) και ακολουθεί πάλι διερεύνηση.

2.2.2. Δευτερεύων 1 διαμέτρου

Στην περίπτωση μιας και μοναδικής διαμέτρου η Εξ.12 περιγράφει την κατανομή του φορτίου πίεσης. Το U_1 δεν αποτελεί πλέον άγνωστη παράμετρο αφού συμπίπτει με το συνολικό μήκος του δευτερεύοντα. Το μόνο που πρέπει να διερευνηθεί είναι η τιμή των μέγιστων μεταβολών του φορτίου πίεσης που προκύπτουν για συγκεκριμένη διάμετρο.

Υπάρχουν 2 περιπτώσεις πιθανών μέγιστων μεταβολών ως εξής:

1) Το ολικό μέγιστο βρίσκεται στην είσοδο του αγωγού ($H_{\max}=H_1(U_1)$). Τότε από τις Εξ.12, Εξ.14 και Εξ.17 προκύπτει:

$$\Delta H^{(1)} = H_1(U_1) - H_1(U_{\min 1}) = F_1(U_1) - F_1(U_{\min 1}) \quad (22)$$

2) Το ολικό μέγιστο βρίσκεται στο τέλος του αγωγού ($H_{\max} = H_1(U_0)$). Τότε προκύπτει:

$$\Delta H^{(2)} = H_1(U_0) - H_1(U_{\min 1}) = F_1(U_0) - F_1(U_{\min 1}) \quad (23)$$

Εάν και οι 2 μεταβολές είναι μικρότερες ή ίσες από την μέγιστη επιτρεπτή ΔH_M τότε η διάμετρος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο σχεδιασμό ειδάλλως απορρίπτεται.

2.3. Συνολικό κόστος υπομονάδας

Μέχρι τώρα ελαχιστοποιήθηκε το κόστος των αγωγών C_p χρησιμοποιώντας τους αγωγούς μικρότερης διαμέτρου για το μέγιστο δυνατό μήκος ώστε να δημιουργείται μεταβολή του φορτίου πίεσης ίση με τη μέγιστη επιτρεπτή. Για να προσδιοριστεί το συνολικό κόστος της υπομονάδας πρέπει να υπολογιστεί και το κόστος ενέργειας C_{EN} που απαιτείται για τη λειτουργία του συστήματος.

Το ετήσιο κόστος ενέργειας C_{ENh} (Ευρώ/έτος) είναι ίσο με:

$$C_{ENh} = \frac{Q_{in} \cdot H_{in}}{102 \cdot \eta} \cdot \frac{E_k \cdot O_t}{3600} \quad (24)$$

όπου

Q_{in} = παροχή εισόδου υπομονάδας σε L/h

H_{in} = φορτίο πίεσης στην είσοδο της υπομονάδας σε m, δηλαδή $H_{in} = H_2(U_2)$ για δευτερεύοντα αγωγό δύο διαμέτρων ή $H_{in} = H_1(U_1)$ όταν ο δευτερεύων αγωγός είναι μίας και μοναδικής διαμέτρου.

η = απόδοση αντλίας

E_k = κόστος κιλοβατώρας (Ευρώ/kWh)

O_t = ετήσιες ώρες λειτουργίας δικτύου (h)

Επειδή οι δαπάνες ενέργειας κατανέμονται μέσα σε όλη την ζωή του έργου γίνεται επικαιροποίηση χρησιμοποιώντας τον παράγοντα της παρούσας αξίας των χρημάτων του Pearson (1974)

$$E_{ea} = \frac{r \left[(1+e)^t - (1+r)^t \right]}{(e-r) \left[(1+r)^t - 1 \right]} \quad (25)$$

όπου

e = πληθωριστική τάση ενέργειας

r = επιτόκιο που λαμβάνει υπόψη τον κίνδυνο της επένδυσης

t = έτη του κύκλου ζωής του έργου

Συνεπώς, το ετήσιο επικαιροποιημένο κόστος ενέργειας είναι:

$$C_{EN} = C_{ENh} \cdot E_{ea} \quad (26)$$

Λαμβάνοντας υπόψη το συντελεστή ανάκτηση κεφαλαίου (Keller and Bliesner, 1990)

$$CRF = \frac{r(1+r)^t}{(1+r)^t - 1} \quad (27) \text{ το συνολικό ετήσιο επικαιροποιημένο κόστος της}$$

υπομονάδας C_i είναι:

$$C_t = C_p CRF + C_{EN} \quad (28)$$

3. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΥΠΟΜΟΝΑΔΑΣ SDesigner

Η μέθοδος για το βέλτιστο σχεδιασμό της υπομονάδας που παρουσιάστηκε πιο πάνω μπορεί να δώσει λύση με εύκολο και ακριβή τρόπο για επιλεγμένες διαμέτρους αγωγών. Η ευρεία επιλογή διαμέτρων όμως που υπάρχουν στην αγορά οδηγεί σε μεγάλο αριθμό συνδυασμών τόσο στο δευτερεύοντα αγωγό (αφού μπορεί να απαρτίζεται από δύο διαμέτρους) όσο και μεταξύ του δευτερεύοντα και των πλευρικών, γεγονός που δυσκολεύει τους υπολογισμούς. Επιπλέον, οι 6 πιθανές περιπτώσεις μέγιστης μεταβολής του φορτίου πίεσης, που προκύπτουν από τη διερεύνηση σε αγωγό δύο διαμέτρων μπορούν να δώσουν μέχρι και 4 διαφορετικές λύσεις για κάθε συνδυασμό (δύο περιπτώσεις δεν δίνουν λύση). Επομένως, είναι αναγκαίο να διερευνηθούν όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί των διαμέτρων ή τουλάχιστον το μεγαλύτερο μέρος αυτών ώστε να βρεθούν αυτοί που ικανοποιούν το υδραυλικό κριτήριο, να υπολογιστεί το κόστος του καθενός χωριστά και να επιλεγεί ο οικονομικότερος.

Η παραπάνω διαδικασία αυτοματοποιήθηκε και επιταχύνθηκε σημαντικά με την ανάπτυξη της εφαρμογής **SDesigner** (Ασημακόπουλος, 2004).

3.1. Περιγραφή Εφαρμογής

Η εφαρμογή **SDesigner**, η οποία έχει αναπτυχθεί με τη γλώσσα Visual Basic και λειτουργεί στο παραθυρικό λειτουργικό περιβάλλον MS Windows, περιλαμβάνει ένα πολύ εύχρηστο γραφικό περιβάλλον διεπαφής με το χρήστη, ενώ παρέχει βοήθεια σε όλα τα στάδια της διαδικασίας υπολογισμού. Τα χαρακτηριστικά αυτά σε συνδυασμό με την απλοποιημένη μέθοδο υπολογισμού που αναλύεται παραπάνω καθιστούν την εφαρμογή αυτή πολύτιμο εργαλείο για τον υδραυλικό σχεδιασμό συστημάτων άρδευσης.

Η εφαρμογή χωρίζεται σε τρία βασικά μέρη:

- *Εισαγωγή Δεδομένων*: Τα δεδομένα εισάγονται σε μια κατάλληλα σχεδιασμένη φόρμα ενώ παρέχονται οδηγίες για την ορθή εισαγωγή των διαφόρων παραμέτρων. Τα κύρια στοιχεία που εισάγονται στην εφαρμογή είναι: αριθμός διανεμητών ανά φυτό, συντελεστής ομοιομορφίας της υπομονάδας, στοιχεία διανεμητή, κανονικό φορτίο λειτουργίας, κανονική παροχή λειτουργίας, εκθετική σταθερά νόμου παροχής διανεμητή, συντελεστής μεταβολής διανεμητή (από κατασκευαστή), απόσταση φυτών στη γραμμή άρδευσης, απόσταση γραμμών άρδευσης, κατά μήκος κλίση υπομονάδας, διάμετροι και κόστη πλευρικού και δευτερεύοντα, κύκλος ζωής Του έργου, κόστος ηλεκτρικού ρεύματος, ετήσιο επιτόκιο, ετήσιες ώρες λειτουργίας της υπομονάδας, απόδοση της αντλίας. Επίσης στη εισαγωγή των δεδομένων υπάρχουν επιλογές για την χρήση διαφορετικού συστήματος μονάδων και για την εισαγωγή δεδομένων που αφορούν το αγροτεμάχιο και τον παραγωγό. Παραδείγματα της φόρμας εισαγωγής δεδομένων φαίνονται στις Εικόνες 1 και 2.
- *Ρουτίνα υπολογισμού*: Κατά την εκτέλεση της ρουτίνας υπολογισμού αφού ελεγχθούν όλα τα δεδομένα εισόδου και γίνουν όλες οι απαραίτητες αλλαγές

μονάδων, υπολογίζεται η μέγιστη επιτρεπτή μεταβολή του φορτίου πίεσης στην υπομονάδα. Κατόπιν πραγματοποιούνται οι υπολογισμοί που αφορούν τον πλευρικό αγωγό οι οποίοι είναι: θέση που βρίσκεται το ελάχιστο φορτίο πίεσης της υπομονάδας, βέλτιστο μήκος του αγωγού, παροχή εισόδου, αριθμός διανεμητών και φορτίο εισόδου. Ακολουθεί ο υπολογισμός του μήκους του δευτερεύοντα. Στη συνέχεια, ακολουθεί μια επαναληπτική διαδικασία κατά την οποία επιλέγονται διαδοχικά διάμετροι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το τελευταίο τμήμα του αγωγού και κατόπιν διάμετροι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το πρώτο τμήμα. Για κάθε ζεύγος διαμέτρων ακολουθεί διερεύνηση και γίνονται αποδεκτά μόνο τα ζεύγη που οι δύο διάμετροι είναι ίδιες (αγωγός μίας διαμέτρου) ή η διάμετρος στο δεύτερο τμήμα είναι μικρότερη από αυτή του πρώτου τμήματος. Για τα αποδεκτά ζευγάρια υπολογίζονται το σημείο αλλαγής διαμέτρου και η μέγιστη μεταβολή του φορτίου πίεσης. Με το τέλος αυτής της διαδικασίας και αφού επιλεγούν οι επιτρεπτές λύσεις υπολογίζονται όλα τα υπόλοιπα στοιχεία που αφορούν στο δίκτυο όπως η κατανομή του φορτίου πίεσης (Σχήμα 2) και το κόστος κατασκευής και λειτουργίας της κάθε λύσης. Το διάγραμμα λειτουργίας της ρουτίνας υπολογισμού φαίνεται στην Σχήμα 3.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ

Αρχείο Μονάδες

ΠΑΡΑΓΩΓΟΣ:

ΑΓΡΟΣ: ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ:

ΥΔΡΑΥΛΙΚΑ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΔΙΑΜΕΤΡΟΙ-ΚΟΣΤΟΙ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ

ΓΕΝΙΚΑ

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΙΑΝΕΜΗΤΩΝ ΑΝΑ ΦΥΤΟ:

ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΙΑΣ ΥΠΟΜΟΝΑΔΑΣ:

ΔΙΑΝΕΜΗΤΗΣ

ΚΑΝΟΝΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ: m

ΚΑΝΟΝΙΚΗ ΠΑΡΟΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ: L/hr

ΕΚΘΕΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΑ γ :

ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ:

ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΔΙΑΝΕΜΗΤΗ
.....
Δίνεται από τον κατασκευαστή του διανεμητή

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ>>>>>

Εικόνα 1. Παράθυρο εισαγωγής δεδομένων. Υδραυλικές Παράμετροι.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ

Αρχείο Μονάδες

ΠΑΡΑΓΩΓΟΣ: ΑΝΔΡΕΟΥ

ΑΓΡΟΣ: ΑΓΙΟΣ ΓΙΑΝΝΗΣ ΚΑΛΙΕΡΓΕΙΑ: ΠΟΡΤΟΚΑΛΙΕΣ

ΥΔΡΑΥΛΙΚΑ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΔΙΑΜΕΤΡΟΙ-ΚΟΣΤΟΙ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ

ΠΛΕΥΡΙΚΟΣ ΑΓΩΓΟΣ

ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ: 14,45 mm ΚΟΣΤΟΣ: 0,37 €/m

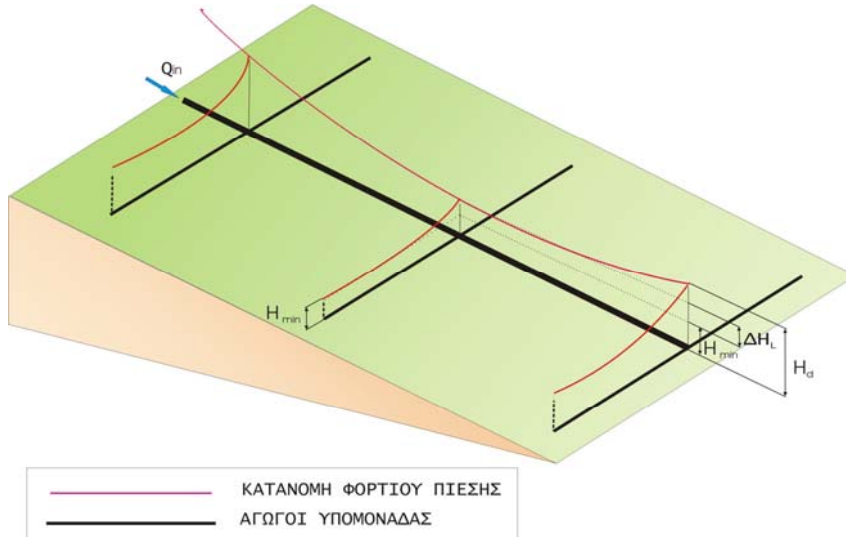
ΔΕΥΤΕΡΕΩΝ ΑΓΩΓΟΣ

ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ 1	36,4 mm	ΚΟΣΤΟΣ 1	0,96 €/m
ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ 2	46,4 mm	ΚΟΣΤΟΣ 2	1,32 €/m
ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ 3	59,2 mm	ΚΟΣΤΟΣ 3	1,68 €/m
ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ 4	0 mm	ΚΟΣΤΟΣ 4	0 €/m
ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ 5	0 mm	ΚΟΣΤΟΣ 5	0 €/m

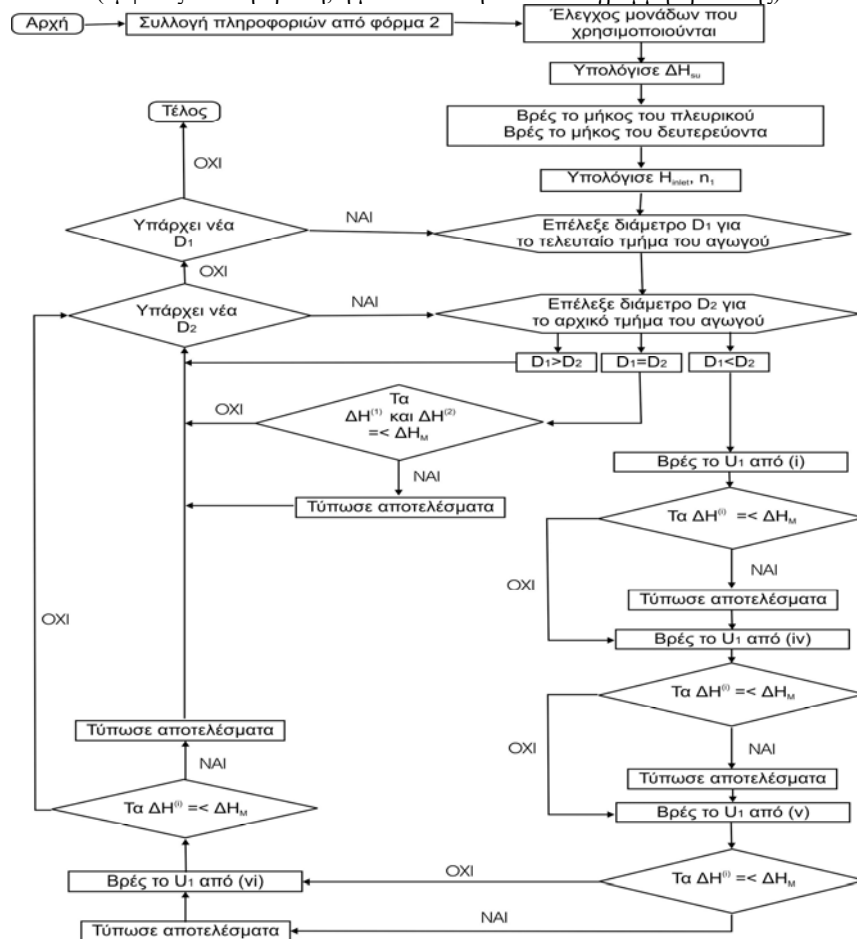
Άνοιγμα Τοποθετήστε την εσωτερική διάμετρο και το κόστος ανά μονάδα μήκους των αγωγών που υπάρχουν στην αγορά στα αντίστοιχα πεδία. Για οικονομία χρησιμοποιήστε τη Αποθήκευση

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ>>>>>>>

Εικόνα 2. Παράθυρο εισαγωγής δεδομένων. Χαρακτηριστικά Αγωγών.



Σχήμα 2. Σχηματική αναπαράσταση της κατανομής του φορτίου πίεσης σε υπομονάδα (εμφανίζονται η πρώτη, η μεσαία και η τελευταία γραμμή άρδευσης)



Σχήμα 3. Διάγραμμα ροής της υπορουτίνας των υπολογισμών

- *Παρουσίαση Αποτελεσμάτων:* Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε δυο παράθυρα. Το πρώτο παράθυρο παρουσιάζεται αυτόματα μετά το τέλος των υπολογισμών (εικόνα 3α). Σε αυτό το παράθυρο φαίνονται όλοι οι επιτρεπτοί συνδυασμοί των διαμέτρων του δευτερεύοντα αγωγού μαζί με τα αποτελέσματα που τους αφορούν ταξινομημένοι σύμφωνα με το συνολικό κόστος της υπομονάδας που προκύπτει για κάθε συνδυασμό. Στο κάτω μέρος του παραθύρου υπάρχουν οι εξής επιλογές: «Εκτύπωση» (τυπώνει φόρμα με όλα τα δεδομένα εισαγωγής και όλα τα αποτελέσματα), «Επιπλέον» (ανοίγει δεύτερο παράθυρο αποτελεσμάτων - εικόνα 3β - όπου σε έναν πίνακα παρουσιάζονται τα φορτία πίεσης στις εκροές του δευτερεύοντα για κάθε αποδεκτό συνδυασμό διαμέτρων).

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

ΥΠΟΜΟΝΑΔΑ

ΜΗΚΟΣ ΥΠΟΜΟΝΑΔΑΣ 91 m

ΠΛΑΤΟΣ ΥΠΟΜΟΝΑΔΑΣ 120,76 m

ΠΑΡΟΧΗ ΕΙΣΟΔΟΥ 14820 L/hr

ΓΡΑΜΜΕΣ ΑΡΔΕΥΣΗΣ 13

ΜΕΓΙΣΤΗ ΕΠΙΤΡΕΠΤΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΦΟΡΤΙΟΥ ΠΙΕΣΗΣ 4,64 m

ΠΛΕΥΡΙΚΟΣ ΑΓΩΓΟΣ

ΑΡΙΘΜΟΣ ΕΚΡΟΩΝ 15

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΙΑΝΕΜΗΤΩΝ 15

ΜΗΚΟΣ ΑΓΩΓΟΥ 60,38 m

ΔΥΝΑΤΕΣ ΛΥΣΕΙΣ ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΝΤΑ ΑΓΩΓΟΥ

D1 mm	L1 m	D2 mm	L2 m	Hinlet m	Hav m	Cp	Ce	Ct
36,4	48,68	59,2	42,32	17,26	18,24	698,68	776,92	1475,6
46,4	82,74	59,2	8,26	17,45	17,87	703,94	785,61	1489,55
46,4	91	0	0	18,09	17,93	700,97	814,32	1515,29
36,4	64,5	59,2	26,5	18,74	18,21	687,29	843,27	1530,56
36,4	57,83	46,4	33,17	19,55	18,19	680,15	879,89	1560,04

ΥΠΟΜΝΗΜΑ ΠΙΝΑΚΑ

Cp=ΚΟΣΤΟΣ ΣΩΛΗΝΩΝ ΥΠΟΜΟΝΑΔΑΣ Hav=ΜΕΣΟ ΦΟΡΤΙΟ ΠΙΕΣΗΣ ΣΤΟ ΔΕΥΤ/Α

Ce=ΚΟΣΤΟΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ D1=ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΣΤΟ ΤΕΛΟΣ ΤΟΥ ΔΕΥΤ/Α

Ct=ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ D2=ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΣΤΗΝ ΑΡΧΗ ΤΟΥ ΔΕΥΤ/Α

Hinlet=ΦΟΡΤΙΟ ΠΙΕΣΗΣ ΣΤΗΝ ΚΕΦΑΛΗ L1=ΜΗΚΟΣ ΑΓΩΓΟΥ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ D1

L2=ΜΗΚΟΣ ΑΓΩΓΟΥ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ D2

ΕΚΤΥΠΩΣΗ

ΕΠΙΓΡΑΦΩΝ

(α)

ΕΠΙΓΡΑΦΗ

ΠΙΝΑΚΑΣ ΦΟΡΤΙΩΝ ΠΙΕΣΗΣ ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΝΤΑ ΑΓΩΓΟΥ ΣΤΑ ΣΗΜΕΙΑ ΕΚΡΟΣΗΣ

ΣΥΝΔΙΑΣΜΟΣ ΔΙΑΜΕΤΡΩΝ

	36,4-46,4	36,4-59,2	36,4-59,2	46,4-0	46,4-59,2
ΕΙΣΟΔΟΣ	19,55	17,26	18,74	18,09	17,45
1	19,17	17,43	18,91	17,71	17,62
2	18,9	17,63	19,11	17,45	17,45
3	18,73	17,87	19,34	17,28	17,28
4	18,66	18,13	19,33	17,2	17,2
5	18,46	18,43	18,46	17,22	17,22
6	17,85	18,74	17,85	17,31	17,31
7	17,45	18,39	17,45	17,47	17,47
8	17,26	18,2	17,26	17,7	17,7
9	17,24	18,18	17,24	17,98	17,98
10	17,37	18,31	17,37	18,31	18,31
11	17,62	18,56	17,62	18,68	18,68
12	17,96	18,89	17,96	19,07	19,07
13	18,35	19,29	18,35	19,48	19,48

Ε
Κ
Ρ
Ο
Σ

(β)

Εικόνα 3. Παράθυρα αποτελεσμάτων του προγράμματος

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ

Αναπτύχθηκε ένα εύχρηστο λογισμικό σε περιβάλλον φιλικό για τον χρήστη (Windows) που βοηθά στην βελτιστοποίηση συστημάτων μικροάρδευσης λαμβάνοντας υπόψη το κόστος των αγωγών, το κόστος ενέργειας και το υδραυλικό κριτήριο προκειμένου να υπάρξει η απαραίτητη ομοιομορφία στη άρδευση. Η χρήση του λογισμικού σε πολλές εφαρμογές θα αναδείξει την χρησιμότητά του και θα επιτρέψει πιθανές βελτιώσεις.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ASAE Standards, 1998. *Design and installation of microirrigation systems*. Am. Soc. of Agric. Engineers, St Joseph, MI, USA.
- Bralts, V.F., Kelly S.F., Shayya W.H. and Segerlind L.J., 1993. *Finite element analysis of microirrigation hydraulics using a virtual emitter system*. Trans. ASAE, 36(3): 717-725.

- Christiansen, J. E. (1942). "Irrigation by sprinkling." California Arg. Exp. Sta. Bull., 670.
- Karmeli, D., and Keller, J. (1975). *Trickle irrigation design Glendora, California: Rain Bird Sprinkler manufacturing Corp.*
- Keller, J. and Bliesner, R.D., 1990. *Sprinkle and trickle irrigation.* Van Nostrand Reinhold, New York.
- Kang, V. and Nishiyama, S., 1996a. *Analysis and design of microirrigation laterals.* J. Irrig. and Drain. Engrg., ASCE, 122(2): 75-82.
- Kang, V. and Nishiyama, S., 1996b. *Design of microirrigation submain units.* J. Irrig. and Drain. Engrg., ASCE, 122(2): 83-89.
- Pearson, G. F. 1974. *Life-cycle costing in an energy crisis era.* Professional Engineer, July, 1974:26-29.
- Scaloppi, E. J., and Allen, R. G. (1993). "Hydraulics of irrigation laterals: Comparative analysis." J. Irrig. Drain. Eng., 119(1), 91-115.
- Valiantzas, J.D., 1998. *Analytical approach for direct drip lateral hydraulic calculation.* J. Irrig. and Drain. Engrg., ASCE, 124(6): 300-305.
- Valiantzas, J. D., 2002a. *Continuous outflow variation along irrigation laterals: Effect of the number of outlets.* J. Irrig. and Drain. Engrg., ASCE, 128(1): 34-42.
- Valiantzas, J. D., 2002b. *Hydraulic analysis and optimum design of multi-diameter irrigation laterals.* J. Irrig. and Drain. Engrg., ASCE, 128(2): 78-86 .
- Valiantzas, J.D., 2003a. *Explicit hydraulic design of microirrigation submain units with tapered manifold and laterals.* J. Irrig. and Drain. Engrg., ASCE, 129(4), 227-236.
- Valiantzas, J. D., 2003b. *Inlet pressure, energy cost and economic design of tapered irrigation submains.* J. Irrig. and Drain. Engrg., ASCE, 129(2), 100-107.
- Wu, I.P., 1997. *An assessment of hydraulic design of microirrigation systems.* Agric. Water Management, 32: 275-284.
- Wu, I.P. and Gitlin, H.M., 1975. *Energy gradient line for drip irrigation laterals.* J. Irrig. and Drain. Div., ASCE, 101(4): 323-326.
- Ασημακόπουλος Ι., 2004. *Σχεδίαση συστημάτων μικροάρδευσης σε επικλινή εδάφη με τη βοήθεια ηλεκτρονικών υπολογιστών, Πτυχιακή μελέτη, ΓΠΑ, σελ 46.*
- Βαλιάντζας, Ι.Δ., (2003). *Βέλτιστος σχεδιασμός συστημάτων μικροάρδευσης σε επικλινή εδάφη.* 9^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης, Θεσσαλονίκη, σσ. 233-240.

ΑΠΛΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΣΥΝΕΧΗΣ ΜΕΘΟΔΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΩΝ ΑΡΔΕΥΤΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

Μ. Θεοχάρης*, **Χ. Τζιμόπουλος****, **Σ. Γιαννόπουλος****,
Μ. Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη***

* ΤΕΙ Ηπείρου, Τμήμα Φυτικής Παραγωγής, 47100 Άρτα, theochar@teiep.gr

** Α.Π.Θ., Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, 54006, Θεσσαλονίκη

*** Παν. Θεσσαλίας, Τμήμα Γεωπ. Φυτ. Παραγ. και Αγροτ. Περιβάλλ., 38334 Βόλος

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο προσδιορισμός του βέλτιστου συνδυασμού των διαμέτρων για την ελαχιστοποίηση του κόστους ενός αρδευτικού δικτύου με εφαρμογή των κλασσικών μεθόδων, απαιτεί πολλές και κοπιαστικές πράξεις, γεγονός το οποίο καθιστά πρακτικά δύσκολη τόσο την εφαρμογή τους, όσο και την εποπτεία και έλεγχο των διαφόρων φάσεων υπολογισμού. Στην παρούσα μελέτη αναπτύσσεται μία απλοποιημένη συνεχής μέθοδος βελτιστοποίησης με μη γραμμικό προγραμματισμό, η οποία οδηγεί στα ίδια ακριβώς αποτελέσματα με τη γενική συνεχή μέθοδο βελτιστοποίησης μη γραμμικού προγραμματισμού. Για το λόγο αυτό μπορεί να υποκαταστήσει την κλασσική μέθοδο με άριστα αποτελέσματα.

A SIMPLIFIED CONTINUOUS OPTIMIZATION METHOD FOR IRRIGATION NETWORKS

M. Theocharis*, **C. Tzimopoulos****, **S. Yannopoulos*****,
M. Sakellariou - Makrantonaki ***

* Tech. Educ. Inst. of Epirus, Dep. of Crop Production, 47100 Arta, Greece

** Arist. Univ. of Thessalon, Dep. of Rural and Surv. Engs, 54006, Thessaloniki, Greece

*** Univ. of Thessaly, Dep. of Agric., Crop Prod., and Rur. Env., 38334, Volos, Greece

ABSTRACT

The use of optimal pipe diameters method in order to minimize the cost of an irrigation network with common optimization methods, calls for a lot and complex calculations. For this reason the application of the methods as well as the supervision and the control of the various calculations is time-consuming and difficult. In this paper a simplified continuous nonlinear optimization method is developed, giving results of the same accuracy with the classic nonlinear optimization method and therefore can be easily applied in the irrigation networks study.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το πρόβλημα της βελτιστοποίησης τυχόντος ακτινωτού δικτύου με τη συνεχή μέθοδο μη γραμμικού προγραμματισμού, ανάγεται στη μόνωση ενός συστήματος στο οποίο οι άγνωστοι είναι τα διαθέσιμα υδραυλικά φορτία των κλάδων του δικτύου. Το σύστημα επιδέχεται απλή αναλυτική λύση μόνο για την περίπτωση δικτύου με αγωγούς στη σειρά, ενώ για κάθε δίκτυο με διακλαδώσεις το υπόψη σύστημα αποτελείται από $n + k$ εξισώσεις, [n είναι ο αριθμός των τροφοδοτούντων κλάδων και k είναι ο αριθμός των περάτων του δικτύου] δεν είναι γραμμικό και η μαθηματική επίλυσή του είναι αδύνατη. Σε αυτή την περίπτωση η αναζήτηση της αριθμητικής λύσης του συστήματος επιτυγχάνεται με διαδοχικές προσεγγίσεις, μία διαδικασία που απαιτεί πολλές και κοπιαστικές πράξεις ιδιαίτερα για περιπτώσεις δικτύου με πολλές διακλαδώσεις [1,2,3, 5,6,7]. Διάφοροι ερευνητές [1,3,6] επεχείρησαν κατά το παρελθόν να αντιμετωπίσουν την παραπάνω δυσχέρεια και εισηγήθηκαν απλουστευμένους τρόπους υπολογισμού των διαθέσιμων υδραυλικών φορτίων των αγωγών του δικτύου. Στην παρούσα μελέτη αναπτύσσεται μία απλοποιημένη συνεχή μέθοδος βελτιστοποίησης η οποία οδηγεί στα ίδια ακριβώς αποτελέσματα με τη γενική συνεχή μέθοδο βελτιστοποίησης με χρησιμοποίηση των πολλαπλασιαστών Lagrange. Για το λόγο αυτό μπορεί να υποκαταστήσει την κλασσική μέθοδο με άριστα αποτελέσματα.

2. ΟΙ ΣΥΝΕΧΕΙΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Το προς επίλυση σύστημα στο οποίο ανάγεται το πρόβλημα της βελτιστοποίησης ενός ακτινωτού δικτύου σύμφωνα με τη γενική συνεχή μη γραμμική μέθοδο βελτιστοποίησης, με χρησιμοποίηση των πολλαπλασιαστών Lagrange [1,3,5,7] είναι:

$$\left[\frac{\Phi_i}{\Delta H_i} \right]^\omega = \sum_{r=i}^n \sum_{j=1}^p \left[\frac{\Phi_{\pi_{rj}}}{\Delta H_{\pi_{rj}}} \right]^\omega \quad i = 1, 2, \dots, r, \dots, n \quad (1)$$

όπου:

$$\Delta H_{\pi_{rj}} = (H_A - H_{\pi_{rj}}) - \sum_{i=1}^r \Delta H_i \quad (2)$$

Στις παραπάνω σχέσεις είναι:

$$\omega = 1 + 0,2\nu, \quad (3)$$

$$\Phi_i = \sum_{t=1}^v \varphi_{it} = \sum_{t=1}^v \left[\frac{A}{1,6465^v} f^{\frac{\nu\omega}{\nu+5}} L_{it} Q_{it}^{0,4\nu} \right]^{\frac{1}{\omega}}, \quad (4)$$

$$\Phi_{\pi_{rj}} = \sum_{b=1}^{\tau} \varphi_{rjb} = \sum_{q=1}^{\tau} \left[\frac{A}{1,6465^v} f^{\frac{\nu\omega}{\nu+5}} L_{rjb} Q_{rjb}^{0,4\nu} \right]^{\frac{1}{\omega}}. \quad (5)$$

A και ν είναι παράμετροι της συνάρτησης κόστους του Mandry [4]:

$$\delta = A \cdot D^\nu, \quad (6)$$

f είναι ο συντελεστής τριβών που υπολογίζεται από την εξίσωση των Colebrook–White και για τους συμβολισμούς γίνεται αναφορά παρακάτω (παρ .3.1).

Η επίλυση του συστήματος γίνεται με τη μέθοδο της τέμνουσας ως εξής: Με βάση τις επιλεγμένες τιμές οι οποίες προκύπτουν από τη μέση κλίση της πλήρους διαδρομής με την ελάχιστη μέση κλίση $\Delta H_{i(1)}$ και $\Delta H_{\pi_{rj}(1)}$, υπολογίζονται οι ποσότητες F_i και G_i , που είναι οι τιμές των πρώτων και των δεύτερων μελών των πρώτων εξισώσεων του συστήματος. Κατόπιν υπολογίζονται διαδοχικά οι παράγωγοι αυτών:

$$F'_{i(1)} = \frac{\partial F_{i(1)}}{\partial \Delta H_{i(1)}} = -\frac{\omega}{\Delta H_{i(1)}} \left[\frac{\Phi_i}{\Delta H_{i(1)}} \right]^\omega, \quad (7)$$

$$G'_{i(1)} = \frac{\partial G_{i(1)}}{\partial \Delta H_{i(1)}} = -\frac{\omega}{\Delta H_{\pi_{rj}(1)}} \left[\frac{\Phi_{\pi_{rj}}}{\Delta H_{\pi_{rj}(1)}} \right]^\omega, \quad (8)$$

$$F_{i(2)} = \frac{F_{i(1)} - G_{i(1)} \frac{F'_{i(1)}}{G'_{i(1)}}}{1 - \frac{F'_{i(1)}}{G'_{i(1)}}} \quad (9), \Delta H_{i(2)} = \frac{\Phi_i}{F_{i(2)}^{1/\omega}} \quad (10)$$

$$\text{και} \quad \Delta H_{\pi_{rj}(2)} = (H_A - H_{\pi_{rj}}) - \sum_{i=1}^r \Delta H_{i(2)}. \quad (11)$$

Κατ' αυτό τον τρόπο προκύπτουν οι τιμές των $\Delta H_{i(2)}$ και των $\Delta H_{\pi_{rj}(2)}$ της πρώτης επανάληψης. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρις ότου οι τιμές να συγκλίνουν.

Ο Θεοχάρης [3], ανέπτυξε 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. Έτσι εάν εκλεγεί η πλήρης διαδρομή του δικτύου η οποία παρουσιάζει την ελάχιστη μέση κλίση και αγνοηθούν όλες οι υπόλοιπες διαδρομές, είναι δυνατό να υπολογιστούν τα διαθέσιμα πιεζομετρικά φορτία, $\Delta H'_i$, των τροφοδοτούντων κλάδων οι οποίοι ανήκουν σε αυτή την πλήρη διαδρομή, από τη σχέση :

$$\Delta H'_i = \frac{\Phi_i}{\sum_{i=1}^r \Phi_i + \Phi_{\pi_{rj}}} \left(H_A - H_{\pi_{rj}} \right) \quad (12)$$

Τα $\Delta H'_i$ που υπολογίζονται με τον παραπάνω απλοποιημένο τρόπο, έχουν σημαντικές αποκλίσεις από τις τιμές των ΔH_i της γενικής μη γραμμικής μεθόδου, αφού το μέσο τετραγωνικό σφάλμα της τάξεως του 25 %. Ωστόσο προσδιορίζουν τις οικονομικές διαμέτρους του δικτύου με ικανοποιητική προσέγγιση, αφού το μέσο τετραγωνικό σφάλμα σε αυτή την περίπτωση ισούται με το 4 % του σφάλματος υπολογισμού των πιεζομετρικών φορτίων, είναι δηλαδή της τάξεως του 1 %. Για την αντιμετώπιση της αδυναμίας αυτής προτείνεται από τον ίδιο ερευνητή όπως, παράλληλα με την παράλειψη των τροφοδοτούμενων κλάδων του δικτύου, συγχρόνως να παραλειφθούν και οι παροχές αυτών, δηλαδή να αντικατασταθεί η παροχή των τροφοδοτούντων κλάδων με την

τιμή της παροχής που θα προέκυπτε αν δεν υπήρχαν οι καταργούμενοι τροφοδοτούμενοι κλάδοι.

3. Η ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΑΠΛΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

3.1 Συμβολισμοί

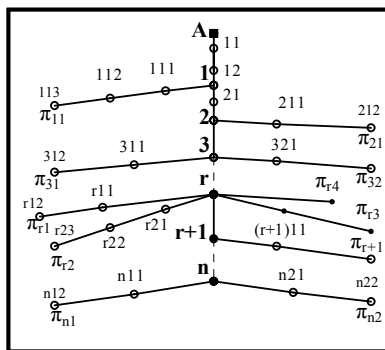
Για την επεξεργασία του προβλήματος είναι αναγκαία η εισαγωγή ορισμένων συμβολισμών οι οποίοι αφορούν τόσο το πραγματικό όσο και το ιδεατό δίκτυο.

3.1.1 Το πραγματικό δίκτυο

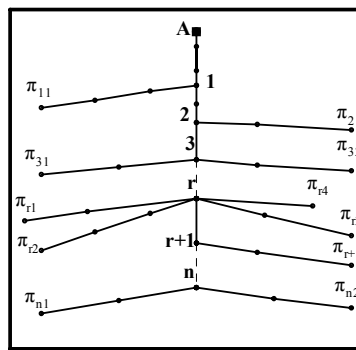
Κάθε κόμβος διακλάδωσης του δικτύου χαρακτηρίζεται με το i και αριθμείται από τα ανάντη προς τα κατόντη με αριθμό $i = 1, 2, \dots, r, \dots, n$, όπου n είναι ο συνολικός αριθμός των κόμβων διακλάδωσης του δικτύου. Κάθε τροφοδοτών κλάδος χαρακτηρίζεται με το σύμβολο του κατόντη κόμβου διακλάδωσης i . Κάθε τροφοδοτούμενος κλάδος του δικτύου χαρακτηρίζεται με το π_{ij} , όπου $r = 1, 2, \dots, n$ είναι ο κόμβος διακλάδωσης από τον οποίο τροφοδοτείται ο κλάδος και $j = 1, 2, \dots, p$ είναι ο αριθμός των τροφοδοτούμενων κλάδων με κεφαλή τον κόμβο r . Κάθε αγωγός του τροφοδοτούμενου κλάδου, i , χαρακτηρίζεται με το it , όπου $t = 1, 2, \dots, v$ είναι ο αριθμός των αγωγών του υπόψη τροφοδοτούμενου κλάδου. Κάθε αγωγός του τροφοδοτούμενου κλάδου, π_{ij} , χαρακτηρίζεται με το ijb , όπου $b = 1, 2, \dots, \tau$ είναι ο αριθμός των αγωγών του υπόψη τροφοδοτούμενου κλάδου. Στο σχήμα 1 απεικονίζεται ένα δίκτυο με τους συμβολισμούς που περιγράφονται παραπάνω.

3.1.2 Το ιδεατό δίκτυο

Θεωρείται ότι το δίκτυο αποτελείται μόνο από κλάδους και, αφού απαλειφθούν έτσι οι απλοί κόμβοι, διατηρούνται μόνο οι κόμβοι διακλάδωσης. Έτσι το πραγματικό δίκτυο του σχήματος 1 παίρνει την ιδεατή μορφή του σχήματος 2. Κάθε κλάδος χαρακτηρίζεται με το σύμβολο του κατόντη κόμβου διακλάδωσης, ή πέρατος. Κάθε κόμβος διακλάδωσης του δικτύου, χαρακτηριζόμενος με το i , αριθμείται από τα ανάντη προς τα κατόντη με αριθμό $i = 1, 2, \dots, r, \dots, n$, όπου n είναι ο συνολικός αριθμός των κόμβων διακλάδωσης του δικτύου.



Σχήμα 1. Πραγματικό ακτινωτό δίκτυο



Σχήμα 2. Ιδεατό ακτινωτό δίκτυο

3.2 Το μαθηματικό πρόβλημα

Όπως προαναφέρθηκε, σύμφωνα με τη γενική μέθοδο βελτιστοποίησης για τον i τροφοδοτούντα κλάδο της πλήρους διαδρομής $A-\pi_{rj}$ ισχύει η σχέση (1).

Αν $A-\pi_{kq}$ είναι η πλήρης διαδρομή με την ελάχιστη μέση κλίση, οι απώλειες $\Delta H_{\pi_{rj}}$ του τροφοδοτούμενου κλάδου π_{rj} του δικτύου, μπορούν να γραφούν με τη μορφή:

$$\Delta H_{\pi_{rj}} = \Delta H_{\pi_{kq}} \frac{\alpha_{rj} L_{rj}}{\alpha_{kq} L_{kq}} \quad (13)$$

όπου α_{rj} είναι η κλίση της πιεζομετρικής γραμμής του τροφοδοτούμενου κλάδου π_{rj} και α_{kq} είναι η κλίση της πιεζομετρικής γραμμής του τροφοδοτούμενου κλάδου της πλήρους διαδρομής με την ελάχιστη μέση κλίση. Η σχέση (1) λόγω της (13) γίνεται:

$$\left[\frac{\Phi_i}{\Delta H_i} \right]^\omega = \sum_{r=i}^n \sum_{j=1}^p \left[\frac{\Phi_{\pi_{rj}}}{\Delta H_{\pi_{kq}} \frac{\alpha_{rj} L_{rj}}{\alpha_{kq} L_{kq}}} \right]^\omega \quad (14)$$

Από τη σχέση (14) προκύπτει ότι:

$$\Delta H_i = \Delta H_{\pi_{kq}} \frac{\Phi_i}{\left[\sum_{r=i}^n \sum_{j=1}^p \left[\frac{\Phi_{\pi_{rj}}}{\frac{\alpha_{rj} L_{rj}}{\alpha_{kq} L_{kq}}} \right]^\omega \right]^{1/\omega}} \quad (15)$$

Για την πλήρη διαδρομή με την ελάχιστη μέση κλίση, $A-\pi_{kq}$, ισχύει ότι:

$$H_A - H_{\pi_{kq}} = \sum_{i=1}^k \Delta H_i + \Delta H_{\pi_{kq}} \quad (16)$$

Από τις σχέσεις (15) και (16) προκύπτει:

$$\frac{H_A - H_{\pi_{kq}}}{\Delta H_{\pi_{kq}}} = \Lambda_{kq} \quad (17)$$

$$\text{όπου: } \Lambda_{kq} = 1 + \sum_{i=1}^k \frac{\Phi_i}{\left[\sum_{r=i}^n \sum_{j=1}^p \left[\frac{\Phi_{\pi_{rj}}}{\frac{\alpha_{rj} L_{rj}}{\alpha_{kq} L_{kq}}} \right]^\omega \right]^{1/\omega}} \quad (18)$$

Επομένως:

$$\Delta H_{\pi_{kq}} = \frac{H_A - H_{\pi_{kq}}}{\Lambda_{kq}} \quad (19)$$

Η ποσότητα Λ_{kq} διαμορφώνεται από τα γεωμετρικά και τα υδραυλικά δεδομένα του δικτύου και μόνο οι λόγοι $\frac{\alpha_{ij}}{\alpha_{kq}}$ είναι άγνωστοι. Για κάθε τροφοδοτούμενο κλάδο ο αντίστοιχος λόγος θεωρητικά μπορεί να μεταβάλλεται από 1 έως ∞ ανάλογα με την απόκλιση της κλίσης του κλάδου από την κλίση του κλάδου της πλήρους διαδρομής με την ελάχιστη μέση κλίση. [Αν για όλους τους τροφοδοτούμενους κλάδους εκτός από τον κλάδο της πλήρους διαδρομής με την ελάχιστη μέση κλίση θεωρηθεί ότι $\alpha_{ij} = \infty$, τότε προκύπτουν τα αποτελέσματα της μεθόδου Μ. Θεοχάρη [3]]. Για τους τροφοδοτούμενους κλάδους του δικτύου ισχύουν τα εξής: α) Όλες οι κλίσεις α_{ij} είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες μέσες κλίσεις $\alpha_{\mu j}$ με μοναδική εξαίρεση τον τροφοδοτούμενο κλάδο της διαδρομής με την ελάχιστη μέση κλίση για τον οποίο ισχύει $\alpha_{kq} < \alpha_{\mu kq}$ [3]. β) Η απόκλιση των α_{ij} από τις αντίστοιχες $\alpha_{\mu j}$ είναι τόσο μεγαλύτερη, όσο η $\alpha_{\mu j}$ μικραίνει και όσο ο αριθμός των τροφοδοτούμενων κλάδων αυξάνει. Για τις συνήθεις περιπτώσεις είναι $\frac{\alpha_{ij}}{\alpha_{\mu j}} = c_1 = 1,15 \div 1,17$. γ) Όσο ο αριθμός των τροφοδοτούμενων κλάδων αυξάνει τόσο η κλίση α_{kq} μεγαλώνει και πλησιάζει την μέση κλίση $\alpha_{\mu kq}$ [3]. Για τις συνήθεις περιπτώσεις, ήτοι για αριθμό τροφοδοτούμενων κλάδων από 2 έως 20 είναι $\frac{\alpha_{kq}}{\alpha_{\mu kq}} = c_2 = 0,85 \div 0,89$. Άρα $\frac{\alpha_{ij}}{\alpha_{kq}} = \frac{c_1 \alpha_{\mu j}}{c_2 \alpha_{\mu kq}} = C \frac{\alpha_{\mu j}}{\alpha_{\mu kq}}$. δ) Για τον τροφοδοτούμενο κλάδο της πλήρους διαδρομής με την ελάχιστη μέση κλίση θα είναι $C = 1$ και για όλους τους τροφοδοτούμενους κλάδους του δικτύου θα είναι $C = \frac{c_1}{c_2} \cong 1,31 \div 1,36$.

3.3 Πειραματικός υπολογισμός του C

Για τον πειραματικό προσδιορισμό του συντελεστή C, ένας αριθμός επιλεγμένων δικτύων επιλύεται α) με τη γενική μη γραμμική μέθοδο βελτιστοποίησης, οπότε προκύπτουν τα ΔH_i των τροφοδοτούντων κλάδων του δικτύου και β) με την προτεινόμενη μέθοδο για C κυμαινόμενο από 1 έως ∞ , οπότε προκύπτουν για κάθε C τα αντίστοιχα $\Delta H'_i$. Στα επιλεγέντα δίκτυα ως φορτίο κεφαλής λήφθηκε $H_A = 89,30$ m και ως ύψος πίεσης στις υδροληψίες επελέγη 25 m. Τα γεωμετρικά και υδραυλικά στοιχεία του σχήματος 3 ισχύουν ανάλογα και για τις περιπτώσεις των σχημάτων 4 και 5. Τα μήκη εκφράζονται σε m και οι παροχές σε l/s. Υπολογίζεται στην συνέχεια το ανηγμένο τετραγωνικό σφάλμα:

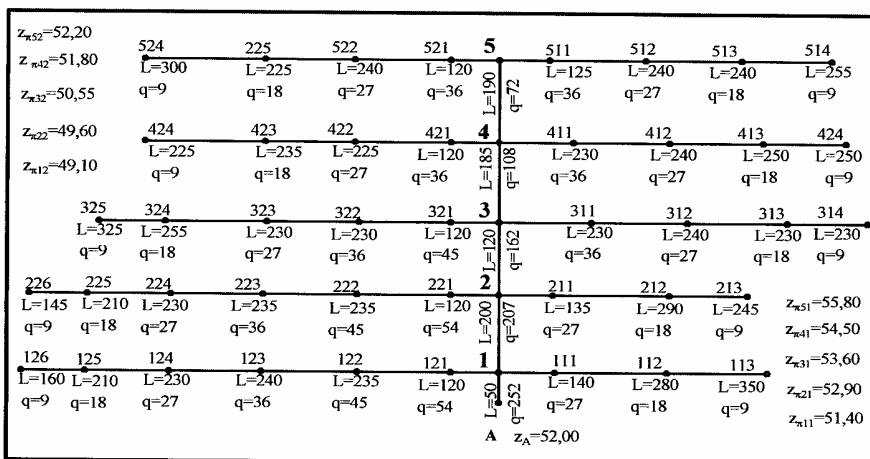
$$\varepsilon_i^2 = 100 \left(\frac{\Delta H_i - \Delta H'_i}{\Delta H_i} \right)^2 \quad (20)$$

καθώς και το ανηγμένο μέσο τετραγωνικό σφάλμα:

$$\varepsilon_\mu = \frac{\sum_{i=1}^r (\varepsilon_i)^2}{r} \quad (21)$$

για όλα τα C. Κατασκευάζονται τα διαγράμματα $\epsilon_\mu - C$ και προσδιορίζεται το C για το οποίο προκύπτει το ελάχιστο ϵ_μ . Από τα παραδείγματα αυτά, αλλά και από μεγάλο αριθμό άλλων παραδειγμάτων που έγιναν από τους συγγραφείς, διαπιστώνεται ότι για $C \cong 1,32$ το ανηγμένο μέσο τετραγωνικό σφάλμα είναι ασήμαντο και επομένως προκύπτει απόλυτη ταύτιση των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων.

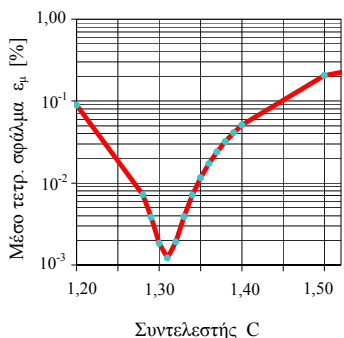
3.3.1 Δίκτυο με δέκα τροφοδοτούμενους κλάδους



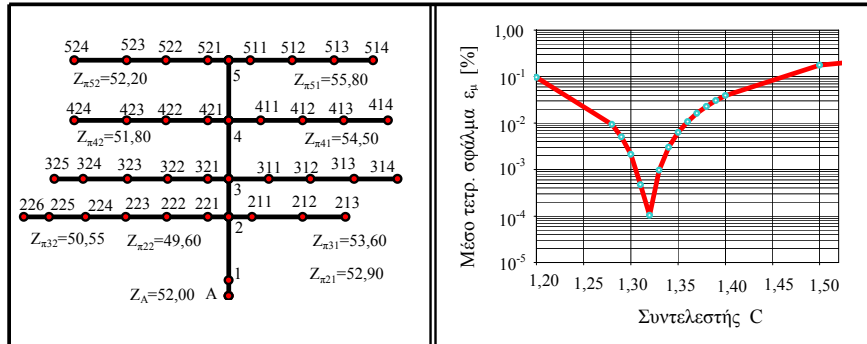
Σχήμα 3. Ακτινωτό δίκτυο με δέκα τροφοδοτούμενους κλάδους

Πίνακας 1. Αποτελέσματα επίλυσης με τις δύο μεθόδους

C ↓	Απλοποιημένη μέθοδος					MTΣ ϵ_μ [%]	Κλασσική μέθοδος				
	$\Delta H'_1$	$\Delta H'_2$	$\Delta H'_3$	$\Delta H'_4$	$\Delta H'_5$		ΔH_1	ΔH_2	ΔH_3	ΔH_4	ΔH_5
	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]		[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
							0,310	1,224	0,731	1,126	1,322
1,10	0,288	1,131	0,682	1,071	1,317	0,355					
1,20	0,299	1,176	0,706	1,098	1,319	0,089					
1,28	0,308	1,208	0,724	1,117	1,320	0,007					
1,30	0,310	1,216	0,728	1,122	1,320	0,002					
1,32	0,313	1,224	0,732	1,126	1,319	0,002					
1,34	0,315	1,232	0,736	1,130	1,319	0,007					
1,36	0,317	1,239	0,740	1,134	1,319	0,017					
1,38	0,319	1,246	0,743	1,138	1,318	0,032					
1,40	0,321	1,254	0,747	1,142	1,318	0,051					
1,50	0,330	1,288	0,765	1,160	1,315	0,205					
∞	0,561	2,021	1,065	1,326	1,099	27,022					

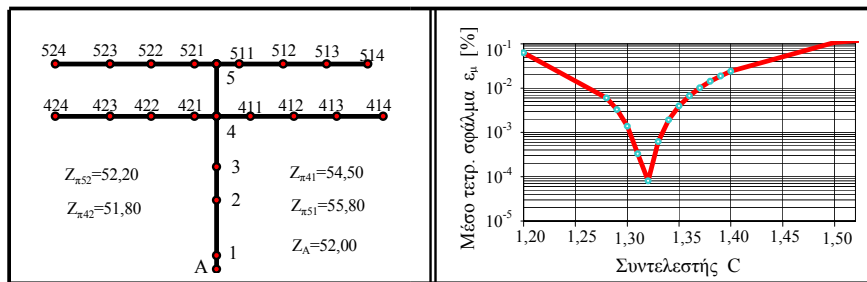


3.3.2 Δίκτυο με οκτώ τροφοδοτούμενους κλάδους



Σχήμα 4. Υπολογισμός του C για δίκτυο με τέσσερες τροφοδοτούμενους κλάδους

3.3.3 Δίκτυο με τέσσερες τροφοδοτούμενους κλάδους



Σχήμα 5. Υπολογισμός του C για δίκτυο με τέσσερες τροφοδοτούμενους κλάδους

3.4 Υπολογιστική διαδικασία προσδιορισμού των ΔΗ_{ij}

Ο υπολογισμός των οικονομικών απωλειών φορτίου των κλάδων του δικτύου σύμφωνα με την προτεινόμενη απλοποιημένη μέθοδο, γίνεται με την επόμενη διαδικασία:

- Υπολογίζονται οι μέσες κλίσεις $\alpha_{\mu ij}$ όλων των πλήρων διαδρομών του δικτύου και από αυτές επιλέγεται η ελάχιστη, η $\alpha_{\mu kq}$.
- Για κάθε τροφοδοτούμενο κλάδο π_{ij} του δικτύου υπολογίζεται η ποσότητα:

$$\beta_{\pi ij} = \left[\frac{\Phi_{\pi ij}}{C \frac{\alpha_{\mu ij} L_{ij}}{\alpha_{\mu kq} L_{kq}}} \right]^{\omega} \quad (22)$$

Για τον τροφοδοτούμενο κλάδο της πλήρους διαδρομής με την ελάχιστη μέση κλίση είναι $\beta_{\pi kq} = \Phi_{\pi kq}^{\omega}$.

- Για τον κάθε τροφοδοτούμενο κλάδο του δικτύου υπολογίζεται η ποσότητα :

$$\Lambda_i = \frac{\Phi_i}{\left[\sum_{r=1}^n \sum_{j=1}^p \beta_{\pi rj} \right]^{1/\omega}} \quad \text{όπου } i=1, 2, \dots, r, \dots, n \quad (23)$$

$$\delta. \text{ Υπολογίζεται η ποσότητα } \Lambda_{kq} = \sum_{i=1}^k \Lambda_i + 1 \quad (24)$$

$$\epsilon. \text{ Υπολογίζεται το } \Delta H'_{\pi kq} = \frac{H_A - H_{\pi kq}}{\Lambda_{kq}} \quad (25)$$

στ. Τέλος από τις σχέσεις (15), (23) και (25) προκύπτουν :

$$\Delta H'_i = \Delta H'_{\pi kq} \Lambda_i \quad (26)$$

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τη συγκριτική μελέτη των δύο μεθόδων προκύπτουν τα ακόλουθα:

- Το ανηγμένο μέσο τετραγωνικό σφάλμα κατά τον υπολογισμό του διαθέσιμου πιεζομετρικού φορτίου των κλάδων του δικτύου είναι μικρότερο από 0,01 % όταν ο συντελεστής C παίρνει τιμές κυμαινόμενες από 1,31 έως 1,35. Το ελάχιστο ανηγμένο μέσο τετραγωνικό σφάλμα παρατηρείται για $C \cong 1,32$ και είναι της τάξεως του 0,001 % .
- Από την εξίσωση των Darcy-Weisbach προκύπτει ότι το ανηγμένο μέσο τετραγωνικό σφάλμα κατά τον υπολογισμό των διαμέτρων των αγωγών είναι το 4 % του μέσου τετραγωνικού σφάλματος που προκύπτει κατά τον υπολογισμό των απωλειών φορτίου ήτοι είναι της τάξεως του 0,00004 %. Επομένως το σφάλμα είναι ασήμαντο και οι δύο μέθοδοι ταυτίζονται απολύτως.
- Η απαιτούμενη υπολογιστική εργασία για τον καθορισμό των διαθέσιμων υδραυλικών φορτίων σύμφωνα με την απλοποιημένη μέθοδο είναι *πολύ μικρότερη* από την αντίστοιχη σύμφωνα με τη γενική μέθοδο, δεδομένου ότι για την τελευταία απαιτείται κατάστρωση προγράμματος στον υπολογιστή ακόμη και για μικρά δίκτυα, ενώ για την προτεινόμενη μέθοδο απαιτείται ένας απλός υπολογιστής τεσσάρων πράξεων και καμμία γνώση προγραμματισμού. Δικαιολογείται, επομένως, πλήρως να προτιμάται η χρησιμοποίηση της απλοποιημένης μεθόδου αντί των άλλων μεθόδων βελτιστοποίησης κατά τη μελέτη των ακτινωτών δικτύων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Βαμβακερίδου. Λ. 1990. Δίκτυα υδρεύσεων - αρδεύσεων υπό πίεση. Επίλυση – βελτιστοποίηση. Αθήνα.
2. Chiplunkar. A. V. and Khanna. P. 1983. Optimal design of branched water supply networks. Jour. Env. Eng. Div. (ASCE). 109(3). 604-618
3. Θεοχάρης. Μ. 2004. Βελτιστοποίηση των αρδευτικών δικτύων. Εύρεση των οικονομικών διαμέτρων. Διδ. Διατρ. Τμήμα Αγρ. και Τοπ. Μηχ. Α.Π.Θ. Θεσσαλονίκη.
4. Mandry. J. E. 1967. Design of pipe distribution for sprinkler and drainage. Jour. of the Irrigation and Drainage Div. (ASCE). 93.
5. Νουτσόπουλος. Γ. 1969. Το πρόβλημα της οικονομικής πιεζομετρικής γραμμής ακτινωτών δικτύων βαρύτητας. Περιοδ. Τεχν. Χρον. Αθήνα. 1969(10). 661 – 676.

6. Swamee. P.K., Kumar. V., and Khanna. P. 1973. Optimization of dead end water distribution mains. Jour. Env. Eng. Div. (ASCE). 99(2). 123-134.
7. Τζιμόπουλος, Χ.. 1982. Γεωργική Υδραυλική Τομ. 1 – Π. Θεσσαλονίκη.

ΑΡΔΕΥΣΗ ΖΑΧΑΡΟΤΕΥΤΛΩΝ ΜΕ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΣΤΑΓΟΝΑ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΕΠΙΠΕΔΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΝΕΡΟΥ

Μ. Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, Κ. Α. Δημοπούλου

Π.Θ., Εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής, Τμήμα Γεωπονίας, Φυτικής Παραγωγής
και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Οδός Φυτόκου, 38446, Νέα Ιωνία, Μαγνησίας
e-mail: msak@agr.uth.gr και roidimop@hotmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία, αξιολογείται η επίδραση της στάγδην άρδευσης στα παραγωγικά χαρακτηριστικά της καλλιέργειας ζαχαροτεύτλων, σε δύο επίπεδα εφαρμογής νερού. Η στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων ($p=0,05$) δεν έδωσε σημαντικές διαφορές στα παραγωγικά χαρακτηριστικά. Συνεπώς, η άρδευση με ποσότητα εφαρμοζόμενου νερού κατά 20% λιγότερο από το απαιτούμενο για την πλήρη κάλυψη των αναγκών της καλλιέργειας φαίνεται εφικτή, χωρίς σημαντικές απώλειες στην παραγωγή.

SUGAR BEET IRRIGATION USING SURFACE DRIP METHOD WITH DIFFERENT WATER APPLICATION DEPTHS

M. Sakellariou-Makrantonaki, K. A. Dimopoulou

University of Thessaly, Department of Agriculture, Crop Production and Rural
Environment, Laboratory of Agricultural Hydraulics, Fytokou Street, 38446
Nea Ionia Magnesias, Greece.

e-mail: msak@agr.uth.gr and roidimop@hotmail.com

ABSTRACT

In the present study, the effects of drip irrigation on yield characteristics of sugar beet under two levels of water application were evaluated. The statistical elaboration of the experimental data did not reveal statistically significant differences in sugar beet yield characteristics. Consequently, irrigation with 20% less water applied than the water needed for meeting the total crop requirements seems feasible, without any substantial yield reduction.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η άρδευση με σταγόνα αποτελεί μια μέθοδο, που δίνει τη δυνατότητα ορθολογικής διαχείρισης των υδάτινων πόρων. Στα μεσογειακά περιβάλλοντα, όπου η ποσότητα του νερού άρδευσης δεν είναι αρκετή και συνήθως χορηγείται σε καλλιέργειες με υψηλή πρόσοδο, οι εναλλακτικές πρακτικές άρδευσης πρέπει να επιδιωχθούν για να λύσουν το πρόβλημα. Η στάγδην άρδευση συγκαταλέγεται ανάμεσα στις σύγχρονες μεθόδους άρδευσης και χαρακτηρίζεται από υψηλή αποδοτικότητα χρήσης ύδατος.

Οι πληροφορίες όμως, που αφορούν την χρήση της συγκεκριμένης μεθόδου στην άρδευση ζαχαροτεύτων, κάτω από μεσογειακές συνθήκες είναι περιορισμένες. Η στάγδην άρδευση είναι ακόμα υπό έρευνα, τα αποτελέσματα της οποίας φαίνεται να είναι ενθαρρυντικά, τόσο όσον αφορά την παραγωγή, αλλά και σε σχέση με την ομοιομορφία άρδευσης, την εξοικονόμηση νερού και την επίδραση στο μικροκλίμα της καλλιέργειας (συνθήκες για ανάπτυξη ζιζανίων και ασθενειών) [8].

Στην Ελλάδα, μόνο το 1% της καλλιεργούμενης έκτασης, το μεγαλύτερο μέρος του οποίου αντιστοιχεί στην περιοχή της Θεσσαλίας, αρδεύεται με το σύστημα της στάγδην άρδευσης (Ιωαννίδης Φ., προσωπική επικοινωνία). Το υψηλό κόστος της εγκατάστασης του συστήματος φαίνεται να είναι ο περιοριστικός παράγοντας για την εξάπλωσή του. Η αγροοικονομική ανάλυση που πραγματοποίησαν οι Sharmasarkar et al. [12], σε καλλιέργεια ζαχαροτεύτων, έδειξε ότι, η άρδευση με σταγόνες είναι πιο κερδοφόρα όταν εφαρμόζεται σε μεγάλες εκτάσεις από ότι σε εγκαταστάσεις μικρής κλίμακας.

Οι Sakellariou et al. [10], αναφέρουν δυνατότητα εξοικονόμησης νερού κατά 20% κάτω από συνθήκες στάγδην άρδευσης χωρίς να υπάρχει ουσιαστική μείωση στην παραγωγή της καλλιέργειας ζαχαροτεύτων.

Οι Tognetti et al. [13], αναφέρουν εξοικονόμηση νερού σε ποσοστό 25% με εφαρμογή στάγδην άρδευσης σε πείραμα που διεξήχθη στην νότια Ιταλία, συγκριτικά με την χαμηλής πίεσης τεχνητή βροχή, χωρίς σημαντικές διαφορές στην παραγωγή της καλλιέργειας ζαχαροτεύτων.

Οι Fabeiro et al. [4], μελετώντας την δυνατότητα εξοικονόμησης νερού στην περιοχή Albacete της Ισπανίας, όπου οι κλιματολογικές συνθήκες είναι ανάλογες με αυτές των περιοχών τευλοκαλλιέργειας στην Ελλάδα, αναφέρουν ότι, όταν ο περιορισμός ύδατος ήταν μέσος στο πρώτο στάδιο ανάπτυξης, μέτριος στο στάδιο διόγκωσης της ρίζας και αυστηρός στο στάδιο της ωρίμανσης, οι παραγωγές ήταν υψηλές.

Στην παρούσα εργασία, αξιολογείται η επίδραση της στάγδην άρδευσης στα παραγωγικά χαρακτηριστικά της καλλιέργειας, σε δύο επίπεδα εφαρμογής νερού (σε κάλυψη 100% και 80% των καθαρών αναγκών βάση της εξατμισοδιαπνοής).

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Η επίδραση δύο επιπέδων εφαρμογής νερού στα παραγωγικά χαρακτηριστικά των ζαχαροτεύτων μελετήθηκε σε αγρό στο αγρόκτημα του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας (39° 23' γεωγραφικό πλάτος, 22° 45' γεωγραφικό μήκος, 50 m υψόμετρο από την επιφάνεια της θάλασσας), κατά την καλλιεργητική περίοδο του έτους 2003, σε έδαφος καλά στραγγιζόμενο, ασβεστούχο, ιλυο-αργιλοπηλώδες που ανήκει στην υπο-ομάδα των Typic Xerochrepts (USDA, 1975) [6]. Το πειραματικό σχέδιο ήταν Πλήρως Τυχαίοποιημένων Ομάδων με δύο μεταχειρίσεις και τέσσερις επαναλήψεις. Το πειραματικό τεμάχιο είχε διαστάσεις 10m x 4,5m και περιελάμβανε 3 σταλακτηφόρους

αγωγούς σε απόσταση 1,5m μεταξύ τους. Η σπορά του πειράματος έγινε στις 17 Απριλίου 2003, με αποστάσεις φυτών 50cm μεταξύ και 15cm επί των γραμμών.

Οι μεταχειρίσεις που εφαρμόστηκαν ήταν:

α) Επιφανειακή Στάγδην Άρδευση (E 100%ET) με εφαρμοζόμενη ποσότητα ύδατος ίση με το 100% των αναγκών της καλλιέργειας βάσει της εξατμισοδιαπνοής, και

β) Επιφανειακή Στάγδην Άρδευση (E 80%ET) με εφαρμοζόμενη ποσότητα ύδατος ίση με το 80% των αναγκών της καλλιέργειας βάσει της εξατμισοδιαπνοής.

Το εύρος άρδευσης και στις δύο μεταχειρίσεις ήταν ανάλογο με αυτό που εφαρμόζεται στην πρακτική καλλιεργητική τεχνική από τους καλλιεργητές ζαχαροτεύλων.

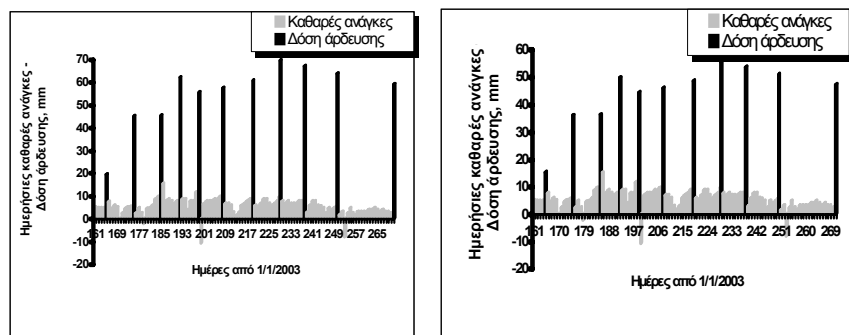
Οι αγωγοί μεταφοράς νερού των δικτύων ήταν από πολυαιθυλένιο διατομής 20 mm. Οι σταλακτήρες ήταν αυτορυθμιζόμενοι και αυτοκαθαριζόμενοι, με ισαποχή 0,6 m επί των σταλακτηφόρων αγωγών και παροχή 3,6 l/h σε πίεση λειτουργίας από 0,5 έως 4,0 atm. Η άρδευση ήταν αυτοματοποιημένη. Το νερό για την άρδευση προερχόταν από παρακείμενη γεώτρηση (αντλία μέσης παροχής 60 – 80 m³/h με άξονα και σωλήνα 4’). Επίσης, τοποθετήθηκαν αντλία προώθησης του νερού στα αρδευτικά δίκτυα, φίλτρα, πιεζόμετρο κ.ά

Η μέτρηση της εξάτμισης, απαραίτητης για τον υπολογισμό των αναγκών άρδευσης της καλλιέργειας, έγινε με την βοήθεια του εξατμισιμέτρου τύπου Α. Οι ενδείξεις του οργάνου που αντιπροσώπευαν την εξάτμιση από τη λεκάνη σε mm/ημέρα, πολλαπλασιαζόμενες με τον συντελεστή διόρθωσης του εξατμισιμέτρου ($K_{ex} = 0,80$) και την αντίστοιχη για κάθε βλαστικό στάδιο τιμή του φυτικού συντελεστή, έδιναν την τιμή της ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας

Η εκτίμηση του Δείκτη Φυλλικής Επιφάνειας πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του αυτόματου οργάνου εμβοδομέτρησης LI – COR.

Μέσω του μετεωρολογικού σταθμού του εργαστηρίου Γεωργικής Υδραυλικής, ο οποίος βρισκόταν σε απόσταση 25m από το κέντρο του αγρού, λαμβάνονταν σε ωριαία βάση, καθ’ όλη τη διάρκεια του 24ώρου, η διακύμανση της θερμοκρασίας του αέρα και η ημερήσια βροχόπτωση.

Πραγματοποιήθηκαν 11 αρδεύσεις (Σχήμα 2.1).



Σχήμα 2.1 Δόσεις άρδευσης των μεταχειρίσεων E 100%ET και E 80%ET αντίστοιχα σε σχέση με τις καθαρές ανάγκες σε νερό της καλλιέργειας.

Κατά την συγκομιδή (13 Οκτωβρίου), μετρήθηκε ο αριθμός ριζών κάθε τεμαχίου και ζυγίστηκαν τα νωπά βάρη του υπέργειου (φύλλα και κορυφές) και υπόγειου τμήματος (ριζών) επί τόπου στον αγρό, ενώ ένα δείγμα ριζών, βάρους ~15kg, από κάθε

πειραματικό τεμάχιο στάλθηκε στο Χημείο του Εργοστασίου Λάρισας της Ελληνικής Βιομηχανίας Ζάχαρης Α.Ε., όπου προσδιορίστηκαν ο ζαχαρικός τίτλος (Pol, ζαχαρόζη % του νοπού βάρους) και η συγκέντρωση των μελασογόνων ουσιών (K, Na, α-N) με τη χρήση ζυγού Venema (Venema automation b.v., Groningen, Holland) και συστήματος ανάλυσης BETALYSER® (Dr Wolfgang Kernchen GmbH, Seelze, Germany). Ο υπολογισμός της χρηματικής αξίας της παραγωγής έγινε με βάση τον Πίνακα Τιμών Ζαχαροτεύτων έτους 2003 της Ελληνικής Βιομηχανίας Ζάχαρης Α.Ε.

Εκτιμήθηκε η διαφορά των μέσων όρων με την βοήθεια του t – κριτηρίου σε επίπεδο σημαντικότητας 0,05. Επίσης, προσδιορίστηκαν οι τυπικές αποκλίσεις των τιμών των δύο μεταχειρίσεων, καθώς και η τυπική απόκλιση της διαφοράς των δύο μέσων όρων. Χρησιμοποιήθηκε το στατιστικό πακέτο M-STAT (MSTAT-C, version 1.41, Crop and Soil Sciences Department, Michigan State University).

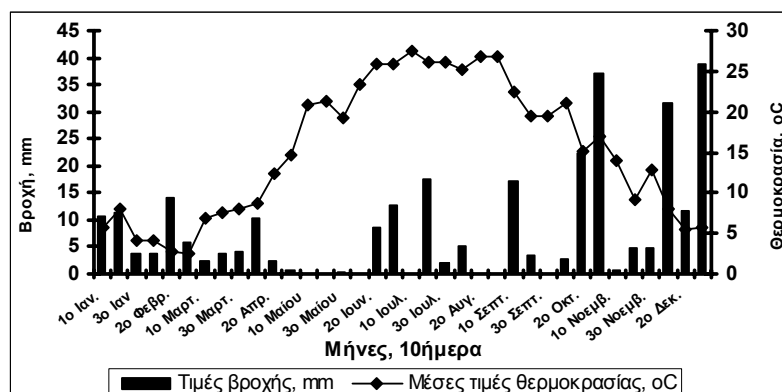
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ

3.1 Κλιματικά δεδομένα

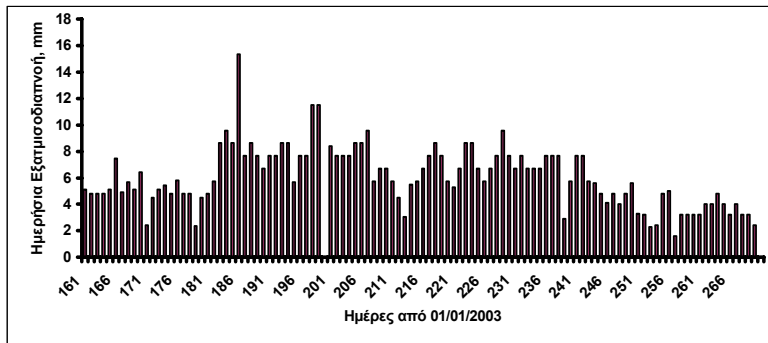
Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζονται, ανά 10ήμερο, οι τιμές της βροχόπτωσης και της μέσης θερμοκρασίας του 24ώρου κατά την διάρκεια του έτους 2003 στην περιοχή του Βελεστίνου Μαγνησίας, όπου διεξήχθη το πείραμα.

Όπως προκύπτει από το Σχήμα 3.1, οι ελαφρές βροχοπτώσεις στο 2^ο και 3^ο 10ήμερο Απριλίου, αν και δεν ήταν μεγάλου ύψους, εν τούτοις αξιοποιήθηκαν από την καλλιέργεια στο στάδιο του φυτρώματος. Από την ημερομηνία έναρξης της στάγδην άρδευσης (14/06/2003) μέχρι και την λήξη των αρδεύσεων (28/09/2003) η βροχόπτωση ήταν συνολικά 74,29 mm.

Η θερμοκρασία κατά το διάστημα αυτό κυμάνθηκε σε υψηλά επίπεδα (μέσες θερμοκρασίες 24ώρου μεγαλύτερες των 25°C). Οι συνθήκες αυτές προκάλεσαν έντονη εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2. Η μεγαλύτερη τιμή εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας (15,36) σημειώθηκαν στις 5/7 (186 ημέρες από 1/1/2003). Την ημέρα εκείνη σημειώθηκε και η μεγαλύτερη μέση θερμοκρασία 24ώρου (Σχ. 3.1).



Σχήμα 3.1 Τιμές βροχόπτωσης και μέσης θερμοκρασίας 24ώρου ανά 10ήμερο έτους 2003.

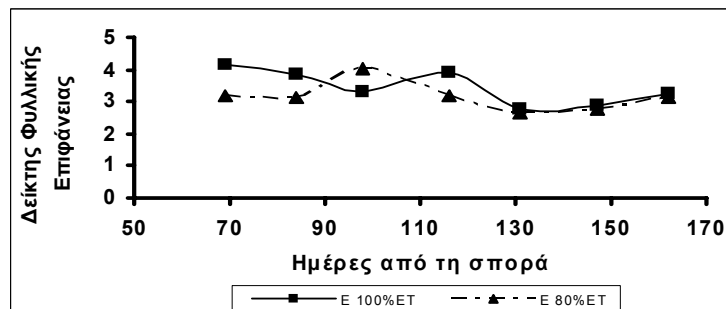


Σχήμα 3.2 Ημερήσια εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας

3.2 Δείκτης Φυλλικής Επιφάνειας

Ο κύριος στόχος σε μια καλλιέργεια ζαχαρότευτλων για την αύξηση της παραγωγικότητας είναι να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή δέσμευση της ηλιακής ακτινοβολίας, η οποία συνδέεται άμεσα με τον Δείκτη Φυλλικής Επιφάνειας (Δ.Φ.Ε.). Το 85-95% του προσπίπτοντος φωτός δεσμεύεται με LAI μόνο 3 ή 4 [11], τιμή που επιτεύχθηκε και στις δύο μεταχειρίσεις. Πραγματοποιήθηκαν 7 μετρήσεις ανά 15ήμερο, από τις 25 Ιουνίου έως τις 26 Σεπτεμβρίου.

Η μεταχείριση που δεχόταν τις μεγαλύτερες ποσότητες νερού φαίνεται να αποκτά περίπου 20 ημέρες νωρίτερα την μέγιστη τιμή του ΔΦΕ



Σχήμα 3.3 Εξέλιξη του Δείκτη Φυλλικής Επιφάνειας.

3.3 Υδατοκατανάλωση

Στην μεταχείριση E 100%ET χορηγήθηκαν συνολικά 606,88mm νερού, ενώ στην μεταχείριση E 80%ET 485,5mm. Η ποσότητα αυτή έρχεται σε συμφωνία με πειραματικά αποτελέσματα της Ελληνικής Βιομηχανίας Ζάχαρης Α.Ε., όπου αναφέρεται ότι οι συνολικές ανάγκες των ζαχαρότευτλων σε νερό στο διάστημα μιας καλλιεργητικής χρονιάς, με στόχο την οικονομικότερη απόδοση, ανέρχονται σε 610 m³/στρ. στην πεδιάδα της Θεσσαλίας με διακυμάνσεις σε ποσοστό περίπου ±10% [2].

Με βάση τα παραγωγικά αποτελέσματα που αναλύονται παρακάτω στην παρούσα εργασία, συμπεραίνουμε, ότι υπάρχει η δυνατότητα εξοικονόμησης αρδευτικού νερού χωρίς επιπτώσεις στην παραγωγή της καλλιέργειας.

3.4 Παραγωγικά αποτελέσματα

Ο αριθμός ριζών/στρ δεν παρουσίασε σημαντικές διαφορές ανάμεσα στις μεταχειρίσεις (Πιν. 3.1, 3.2). Αυτό άλλωστε ήταν αναμενόμενο, αφού υπήρχε καλή ομοιομορφία φυτρώματος στον αγρό. Για τις δεδομένες αποστάσεις σποράς (50 cm μεταξύ των γραμμών και 15 cm επί της γραμμής) υπολογίζεται η φυτρωτική ικανότητα σε ποσοστό περίπου 80% [3].

Στα υπόλοιπα παραγωγικά χαρακτηριστικά, επίσης, δεν προκύπτουν στατιστικά σημαντικές διαφορές, αν και η μικρή υπεροχή του βάρους ριζών στη μεταχείριση που δέχθηκε την μεγαλύτερη ποσότητα ύδατος προσδίδει σε αυτή υψηλότερο στρεμματοζάχαρο και αξία αγοράς τεύτλων, μιας και η τιμή του ζαχαρικού τίτλου ανάμεσα στις δύο μεταχειρίσεις δεν παρουσιάζει αξιόλογη διαφορά. (Πιν. 3.1, 3.2).

Η περιεκτικότητα των στοιχείων K, Na και α-amino N στις ρίζες των ζαχαρότευτλων χρησιμοποιείται στην προσπάθεια περιγραφής της χημικής ποιότητας των ριζών και ως εκ τούτου στην ανάκτησης μεγαλύτερου ποσοστού ζάχαρης από τον χυμό κατά την διαδικασία της κρυστάλλωσης [5]. Μεταξύ των μεταχειρίσεων δεν σημειώθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές, όσον αφορά τα μελασογόνα συστατικά (Πιν. 3.1, 3.2).

Σύμφωνα με τον Milford et al. [7], οι εμπορικά αποδεκτές συγκεντρώσεις K στη ρίζα του ζαχαρότευτλου είναι 700 – 1000 mgr K / 100 g ζάχαρης. Οι συγκεντρώσεις πάνω από τα όρια αυτά μειώνουν το ποσό της ζάχαρης που κρυσταλλώνεται από το χυμό. Σχετικά με το Na, ο Barbanti [1] καθόρισε τα όρια της συγκέντρωσής του στις ρίζες των τεύτλων στη Βόρεια Ιταλία σε 140 mgr / 100 g ζάχαρης. Τέλος, σύμφωνα με τους Palmer et al. [9], τα αποδεκτά όρια του α-αμινο N στις ρίζες των τεύτλων στα ανόργανα εδάφη είναι 150 mgr / 100 g ζάχαρης και στα οργανικά εδάφη 200 mgr / 100 g ζάχαρης.

Κάτω από ελληνικές συνθήκες οι Tsiatas et al. [14], αναφέρουν συγκεντρώσεις K, Na και α-αμινο N στις ρίζες των τεύτλων σε πολύ υψηλότερα επίπεδα από τα αποδεκτά όρια που αναφέρθηκαν. Ανάλογα είναι και τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας.

Πίνακας 3.1 Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία και F-test.

Παραγωγικά Χαρακτηριστικά	M.O. E 100%ET	Τυπική απόκλιση E 100%ET	M.O. E 80%ET	Τυπική απόκλιση E 80%ET	F	P _{0,05}
Αρ. Ριζών	10916,5	419,5	10749,8	500,1	1,4211	0,7797
Βάρος Φ+K	2737,5	355,4	2858,3	426,2	1,4375	0,7727
Βάρος ριζών	7729,8	500,3	7181,5	478,4	1,0937	0,9430
Ζαχαρικός τίτλος	15,763	0,842	15,875	0,638	1,7398	0,6604
Στρεμματοζάχαρο	1218	90,8	1139,3	67,5	1,8081	0,3373
Αξία παραγωγής	401,290	39,119	376,747	24,704	2,3809	0,4948
Κάλιο	1233,225	240,596	1155,975	150,604	2,5521	0,4619
Νάτριο	367,335	72,625	337,100	43,261	2,8182	0,4175
α – amino N	470,243	62,209	448,600	30,673	4,1135	0,2758

Πίνακας 3.2 Σύγκριση των μέσων όρων με το t-test.

Παραγωγικά Χαρακτηριστικά	t	Τυπική απόκλιση Διαφοράς μέσων όρων	ΒΕ	P _{0,05}
Αρ. Ριζών	0,3781	440,9901	3	0,7305
Βάρος Φ+Κ	-0,5872	205,6532	3	0,5984
Βάρος ριζών	1,2933	421,9454	3	0,2847
Ζαχαρικός τίτλος	-0,5087	0,2211	3	0,6460
Στρεμματοζάχαρο	1,1394	69,1151	3	0,3373
Αξία παραγωγής	1,0245	23,9550	3	0,3810
Κάλιο	0,7074	109,1974	3	0,5303
Νάτριο	0,9092	33,2777	3	0,4303
α – amino N	1,1111	19,4801	3	0,3476

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία ερευνήθηκε η επίδραση διαφορετικών επιπέδων άρδευσης με σταγόνα στα παραγωγικά χαρακτηριστικά καλλιέργειας ζαχαροτεύλων, σε έδαφος καλά στραγγιζόμενο, ασβεστούχο, ιλο-αργιλοπηλώδες. Τα επίπεδα ήταν κάλυψη 100% και 80% των καθαρών αναγκών βάση της εξατμισοδιαπνοής. Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν δεν παρατηρήθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές στα παραγωγικά χαρακτηριστικά. Το αποτέλεσμα αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα, ότι υπάρχει η δυνατότητα εξοικονόμησης ύδατος σε ποσοστό 20% των καθαρών αναγκών της καλλιέργειας, χωρίς δυσμενείς επιπτώσεις στην τελική παραγωγή.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. **Barbanti, L.** (1994). *New methods of recommending N-fertilizer use to sugar beet in the Mediterranean area*. In Anonymous, eds. *Proceedings of the 57th IIRB Congress, Brussels*, pp. 281-294. International Institute for Beet Research, Brussels, Belgium.
2. **EBZ ΑΕ** (1997). *Το πότισμα των ζαχαροτεύλων*, σελ. 24.
3. **EBZ ΑΕ** (2001). *Ανοιξιότικη προετοιμασία χωραφιού και σπορά τεύλων*, σελ. 8.
4. **Fabeiro, C., Martín de Santa Olalla, F., López, R. and Domínguez, A.** (2003). *Production and quality of the sugar beet (Beta vulgaris L.) cultivated under controlled deficit irrigation conditions in a semi-arid climate*. *Agricultural Water Management*. **62** (3), pp 215-227.
5. **Harvey, W. C. and Dutton, V. J.** (1993). *Root quality and processing*. In *The Sugar Beet Crop*. pp. 571-617. D. A. Cooke and R. K. Scott (Eds.). Chapman & Hall, London, UK.

6. 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.
7. Milford, G. F. J., Armstrong, J. M., Jarvis, J. P., Houghton, J. B., Bellett-Travers, M. D., Jones, J. and Leigh, A. R. (2000). *Effect of potassium fertilizer on the yield, quality and potassium offtake of sugar beet crops grown on soils of different potassium status*. The Journal of Agricultural Science. **135**, pp 1-10.
8. Neibling, W. H. and Gallian, J. J. (1997). *Irrigation Water Management in Sugarbeet Production*. Presented at Sugarbeet Schools on January 27-31, 1997. Also available in <http://www.uidaho.edu/sugarbeet/irrg/irrgbeet.htm>
9. Palmer, M. and Casburn, C. (1985). *Amino nitrogen analyses – factory experiences*. British Sugar Beet Review **53**, pp 73-76.
10. Sakellariou-Maktantonaki, M., Kalfountzos, D., Vyrlas, P. and Kapetanios, B. (2002). *Water saving using modern irrigation methods*. Hydorama 2002, pp 96–102.
11. Scott, K. R. and Jaggard, W. K. (1993). *Crop physiology and agronomy*. In The Sugar Beet Crop. pp. 179-237. D. A. Cooke and R. K. Scott (Eds.). Chapman & Hall, London, UK.
12. Sharmasarkar, C. F., Sharmasarkar, S., Held, J. L., Miller, D. S., Vance, F. G. and Zhang, R. (2001). *Agroeconomic Analyses of Drip Irrigation for Sugarbeet Production*. Agronomy Journal. **93**, pp 517-523.
13. Tognetti, R., Palladino, M., Minnoci, A., Delfine, S. and Alvino, A. (2003). *The response of sugar beet to drip and low – pressure sprinkler irrigation in southern Italy*. Agricultural Water Management. **60** (2), pp 135 – 155.
14. Tsialtas, T. J. and Maslaris, N. (2004). *Effect of N Fertilization Rate on Sugar Yield and Non-Sugar Impurities of Sugar Beets (Beta vulgaris) Grown Under Mediterranean Conditions*. J. Agronomy & Crop Science. **190** (1-10). Άρθρο υπό εκτύπωση.

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟΥ ΕΥΡΟΥΣ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΣΕ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΖΑΧΑΡΟΤΕΥΤΛΩΝ

Μ. Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, Κ. Α. Δημοπούλου
Π.Θ., Εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής, Τμήμα Γεωπονίας, Φυτικής Παραγωγής
και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Οδός Φυτόκου, 38446, Νέα Ιωνία, Μαγνησίας
e-mail: msak@agr.uth.gr και roidimop@hotmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία διερευνήθηκε η επίδραση του εύρους άρδευσης, με την μέθοδο της επιφανειακής σταγόνας, σε καλλιέργεια ζαχαροτεύτλων που εγκαταστάθηκε στο αγρόκτημα του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας το έτος 2003. Η στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων, έδειξε στατιστικώς σημαντικές διαφορές ($p=0,05$) στην παραγωγή στρεμματοζαχάρου, το οποίο οφειλόταν στο μεγαλύτερο βάρος ριζών, που επιτεύχθηκε στην περίπτωση που το εύρος άρδευσης αντιστοιχούσε σε άθροισμα καθαρών αναγκών κοντά στην τιμή της υπολογιζόμενης πρακτικής δόσης άρδευσης. Αυτό είχε σαν συνέπεια, την σημαντικά μεγαλύτερη αξία αγοράς τεύτλων.

EFFECT OF DIFFERENT IRRIGATION INTERVAL ON SUGAR BEET YIELD.

M. Sakellariou-Makrantonaki, K. A. Dimopoulou
University of Thessaly, Department of Agriculture, Crop Production and Rural
Environment, Laboratory of Agricultural Hydraulics, Fytokou Street, 38446
Nea Ionia Magnesias, Greece
e-mail: msak@agr.uth.gr and roidimop@hotmail.com

ABSTRACT

The effects of the irrigation interval, using drip irrigation, on sugar beet crop performance were studied in a field experiment that was set up in the experimental farm of University of Thessaly in 2003. The results show statistically significant differences ($p=0,05$) in the sucrose yield and in the ultimate value of the crop at this treatment where the irrigation interval corresponded to the level where the net irrigation needs reached the calculated irrigation depth.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η οικονομικότητα της αρδευόμενης καλλιέργειας ζαχαρότευτλων εξαρτάται όχι μόνο από το προστιθέμενο αρδευτικό νερό, αλλά και από το κόστος της άρδευσης και την τιμή που πληρώνεται η παραγωγή των τεύτλων και των υποπροϊόντων τους. Πρακτικά, όλες οι γνωστές μέθοδοι άρδευσης χρησιμοποιούνται για την άρδευση της καλλιέργειας ζαχαρότευτλων ανά τον κόσμο.

Στην Ελλάδα, η καλλιέργεια των ζαχαρότευτλων επεκτείνεται στις κεντρικές και βόρειες περιοχές και αποτελεί το 5% περίπου της καλλιεργούμενης γεωργικής έκτασης στην περιοχή αυτή. Η στάγδην άρδευση είναι ακόμα υπό έρευνα, τα αποτελέσματα της οποίας φαίνεται να είναι ενθαρρυντικά, τόσο όσον αφορά την παραγωγή αλλά και σε σχέση με την ομοιομορφία άρδευσης, την εξοικονόμηση νερού και την επίδραση στο μικροκλίμα της καλλιέργειας (συνθήκες για ανάπτυξη ζιζανίων και ασθeneιών). Η άρδευση με σταγόνες πραγματοποιείται μόλις σε ποσοστό 1% της καλλιεργούμενης έκτασης το μεγαλύτερο μέρος του οποίου, αντιστοιχεί στην περιοχή της Θεσσαλίας (Ιωαννίδης Φ., προσωπική επικοινωνία).

Οι Sharmasarkar et al. [14], αναφέρουν υψηλότερη παραγωγή ριζών ζαχαρότευτλων και στρεμματοζαχάρου (το γινόμενο του νωπού βάρους ριζών και της περιεκτικότητας σε ζάχαρη ανά στρέμμα) κάτω από συνθήκες στάγδην άρδευσης συγκριτικά με την άρδευση με αυλάκια και η υψηλότερη αποδοτικότητα παρουσιάζεται στις περιοχές με μεγαλύτερο κόστος ύδατος και υψηλότερες δαπάνες για καταπολέμηση ζιζανίων. Επίσης, σε πείραμα που διεξήχθη στην περιοχή Wyoming των Η.Π.Α., οι παραπάνω ερευνητές [15] αναφέρουν ότι η αποδοτικότητα χρήσης ύδατος και η αποδοτικότητα χρήσης λιπάσματος ήταν υψηλότερη στη άρδευση με σταγόνα από ότι στην άρδευση με κατάκλυση, δίνοντας παράλληλα και υψηλότερη παραγωγή στρεμματοζαχάρου κατά 3-28% ακόμα και στις περιπτώσεις μειωμένης εφαρμογής ύδατος με το σύστημα της στάγδην άρδευσης.

Οι Tognetti et al. [16], αναφέρουν εξοικονόμηση νερού σε ποσοστό 25% με εφαρμογή στάγδην άρδευσης σε πείραμα που διεξήχθη στην νότια Ιταλία, συγκριτικά με την χαμηλής πίεσης τεχνητή βροχή, χωρίς σημαντικές διαφορές στην παραγωγή της καλλιέργειας ζαχαρότευτλων.

Στην Ελλάδα, εκτός από την έρευνα που διεξάγει η EBZ AE για την επίδραση της στάγδην άρδευσης (επιφανειακής και υπόγειας) στην παραγωγικότητα της καλλιέργειας ζαχαρότευτλων, έχουν ασχοληθεί και οι Σακελλαρίου – Μακραντωνάκη κ.ά. [11, 12] και Ντιούδης κ.α. [9].

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η αξιολόγηση της επίδρασης του εύρους της στάγδην άρδευσης στα παραγωγικά χαρακτηριστικά της καλλιέργειας των ζαχαροτεύτλων με συνολική εφαρμογή ίδιων ποσοτήτων νερού.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Η επίδραση του εύρους της επιφανειακής στάγδην άρδευσης στα παραγωγικά χαρακτηριστικά καλλιέργειας ζαχαροτεύτλων, μελετήθηκε στο αγρόκτημα του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας (39° 23' γεωγραφικό πλάτος, 22° 45' γεωγραφικό μήκος, 50 m υψόμετρο από την επιφάνεια της θάλασσας), κατά την καλλιεργητική περίοδο του έτους 2003, σε έδαφος καλά στραγγιζόμενο, ασβεστόχου, ιλο-αργιλοπηλώδες, που ανήκει στην υπο-ομάδα των Typic Xerochrepts (USDA, 1975) [6]. Το πειραματικό σχέδιο ήταν Πλήρως Τυχαιοποιημένων Ομάδων με δύο μεταχειρίσεις και τέσσερις επαναλήψεις. Κάθε πειραματικό τεμάχιο είχε διαστάσεις 10m x 4,5m και περιελάμβανε

3 σταλακτηφόρους αγωγούς σε απόσταση 1,5m μεταξύ τους. Η σπορά του πειράματος έγινε στις 17 Απριλίου 2003, με αποστάσεις φυτών 50cm μεταξύ και 15cm επί των γραμμών.

Οι μεταχειρίσεις που εφαρμόστηκαν ήταν:

α) Επιφανειακή Στάγδην Άρδευση (E 100%ET) με εύρος άρδευσης, το οποίο να αντιστοιχεί σε άθροισμα καθαρών αναγκών κοντά στην τιμή της υπολογιζόμενης πρακτικής δόσης άρδευσης, έτσι ώστε η υγρασία του εδάφους στη ζώνη του ριζοστρώματος να βρίσκεται κοντά στην υδατοϊκανότητα και πάνω από το σημείο μόνιμης μάρανσης σε όλη τη διάρκεια της αρδευτικής περιόδου και,

β) Επιφανειακή Στάγδην Άρδευση (EKT 100%ET) με εύρος άρδευσης ανάλογο με αυτό που εφαρμόζεται στην πρακτική καλλιεργητική τεχνική. Η συχνότητα δηλαδή των αρδεύσεων ήταν ανάλογη με τη συχνότητα αρδεύσεων, γειτονικών στην περιοχή του πειράματος, εμπορικών τευτλοαγρών που εφαρμοζόταν το ίδιο σύστημα άρδευσης.

Και στις δύο μεταχειρίσεις η εφαρμοζόμενη ποσότητα ύδατος ήταν ίση με το 100% των αναγκών της καλλιέργειας, που υπολογίζονταν με την βοήθεια του εξατμισμέτρου τύπου A.

Οι αγωγοί μεταφοράς νερού των δικτύων ήταν από πολυαιθυλένιο διατομής 20 mm. Οι σταλακτήρες ήταν αυτορυθμιζόμενοι και αυτοκαθαριζόμενοι, με ισαποχή 0,6 m επί των σταλακτηφόρων αγωγών και παροχή 3,6 l/h σε πίεση λειτουργίας από 0,5 έως 4,0 atm. Τοποθετήθηκε μία ηλεκτροβάνα για κάθε μεταχείριση, ώστε να αυτοματοποιηθεί η έναρξη και διακοπή της άρδευσης και υδρομετρητές σε κάθε πειραματικό τεμάχιο. Οι ηλεκτροβάνες συνδέθηκαν με ειδικό προγραμματιστή άρδευσης (miracle DC) της εταιρείας Netafim. Το νερό για την άρδευση προερχόταν από παρακείμενη γεώτρηση (αντλία μέσης παροχής 60 – 80 m³/h με άξονα και σωλήνα 4"). Επίσης τοποθετήθηκε αντλία προώθησης του νερού στα αρδευτικά δίκτυα, φίλτρα, πιεζόμετρο κ.ά

Η εκτίμηση του Δείκτη Φυλλικής Επιφάνειας πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του αυτόματου οργάνου εμβοδομέτρησης LI – COR.

Η καταγραφή των μετεωρολογικών δεδομένων (ημερήσια διακύμανση της θερμοκρασίας του αέρα και άθροισμα ημερήσιας βροχόπτωσης) γινόταν σε ωριαία βάση καθ' όλη τη διάρκεια του 24ώρου. Η συλλογή τους έγινε με τη βοήθεια data logger και η επεξεργασία τους με το πρόγραμμα Excel της Microsoft.

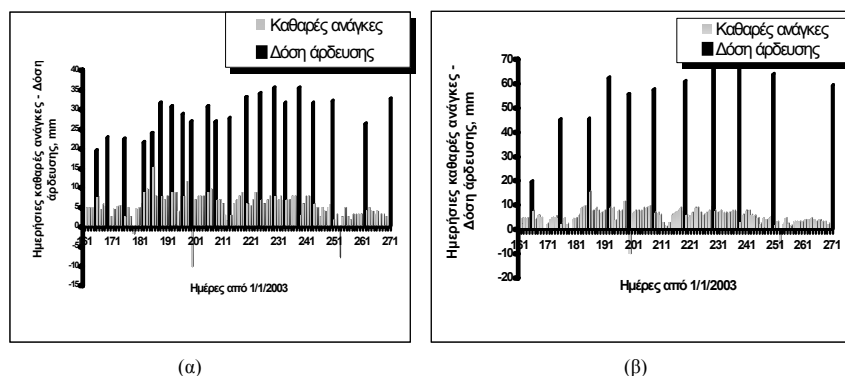
Η συγκομιδή πραγματοποιήθηκε στις 13 Οκτωβρίου (180 ημέρες από την σπορά). Σε κάθε πειραματικό τεμάχιο, συγκομίζονταν και αποκορυφώνονταν, με το χέρι, δύο γειτονικές γραμμές μήκους 3m (επιφάνεια 3m²). Η επιλογή των γραμμών γινόταν από το μέσο του πειραματικού τεμαχίου και έτσι ώστε, η μία να γειτνιάζει με σταλακτηφόρο αγωγό, ενώ η άλλη όχι. Μετρήθηκε ο αριθμός ριζών κάθε τεμαχίου και ζυγίστηκαν τα νωπά βάρη του υπέργειου (φύλλα και κορυφές) και υπογείου τμήματος (ριζών). Από κάθε πειραματικό τεμάχιο, ένα δείγμα ριζών, βάρους ~15kg, στάλθηκε στο Χημείο του Εργοστασίου Λάρισας της Ελληνικής Βιομηχανίας Ζάχαρης Α.Ε., όπου προσδιορίστηκαν ο ζαχαρικός τίτλος (Pol, ζαχαρόζη % του νωπού βάρους) και η συγκέντρωση των μελασογόνων ουσιών (K, Na, α-N) με τη χρήση ζυγού Venema (Venema automation b.v., Groningen, Holland) και συστήματος ανάλυσης BETALYSER® (Dr Wolfgang Kernchen GmbH, Seelze, Germany). Ο υπολογισμός της χρηματικής αξίας της παραγωγής έγινε με βάση τον Πίνακα Τιμών Ζαχαροτεύτων έτους 2003 της Ελληνικής Βιομηχανίας Ζάχαρης Α.Ε.

Έγινε σύγκριση των παραλλακτικότητων των τιμών των δύο μεταχειρίσεων χρησιμοποιώντας την F-κατανομή και εκτιμήθηκε η διαφορά των μέσων όρων με την βοήθεια του t-test σε επίπεδο σημαντικότητας 0,05. Επίσης προσδιορίστηκαν οι τυπικές

αποκλίσεις των τιμών των δύο μεταχειρίσεων, καθώς και η τυπική απόκλιση της διαφοράς των δύο μέσων όρων. Χρησιμοποιήθηκε το στατιστικό πακέτο M-STAT (MSTAT-C, version 1.41, Crop and Soil Sciences Department, Michigan State University).

Ο προγραμματισμός της δόσης άρδευσης έγινε τηρουμένων των προδιαγραφών (παροχή σταλακτήρων, ωριαίο ύψος βροχής, διαστάσεις γραμμών άρδευσης και ισαποχή σταλακτήρων επί των γραμμών) για την κάθε μεταχείριση χωριστά, με βάση τους μετρούμενους ρυθμούς ημερήσιας εξάτμισης.

Πραγματοποιήθηκαν 21 αρδεύσεις στη μεταχείριση E 100%ET και 11 αρδεύσεις στη μεταχείριση EKT 100%ET (Σχ. 2.1α, β).



Σχήμα 2.1 Δόσεις άρδευσης των μεταχειρίσεων E 100%ET (α) και EKT 100%ET (β) αντίστοιχα, σε σχέση με τις καθαρές ανάγκες σε νερό της καλλιέργειας.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ

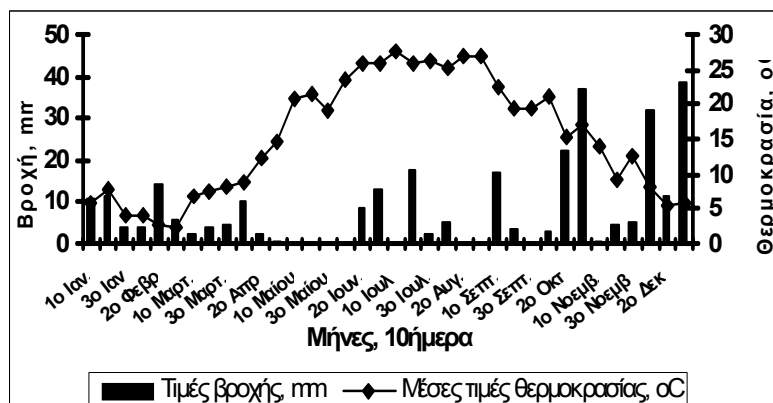
3.1 Κλιματικά δεδομένα

Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζονται, ανά 10ήμερο, οι τιμές της βροχόπτωσης και της μέσης θερμοκρασίας του 24ώρου κατά την διάρκεια του έτους 2003 στην περιοχή του Βελεστίνου Μαγνησίας, όπου διεξήχθη το πείραμα.

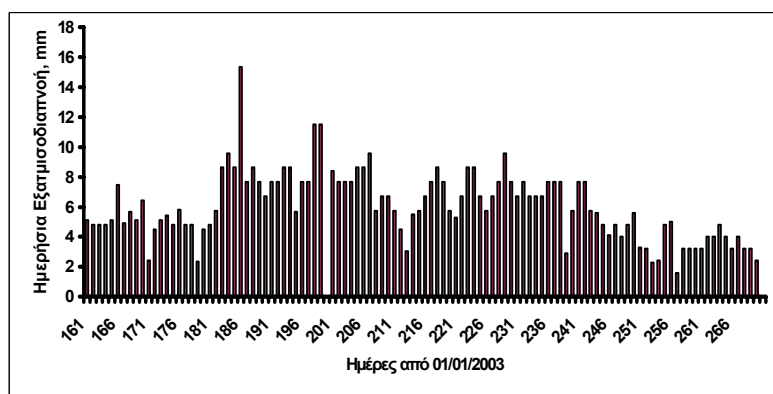
Οι ελαφρές βροχοπτώσεις στο 2^ο και 3^ο 10ήμερο Απριλίου (Σχήμα 3.1), αν και δεν ήταν μεγάλου ύψους, εν τούτοις αξιοποιήθηκαν από την καλλιέργεια στο στάδιο του φυτρώματος. Κατά την διάρκεια της κύριας αρδευτικής περιόδου (Ιούνιος – Αύγουστος), συνέβησαν έντεκα επεισόδια βροχόπτωσης και σε κανένα το ύψος βροχής δεν ξεπέρασε τα 16 mm. Από την ημερομηνία έναρξης της στάγδην άρδευσης (14/06/2003) μέχρι και την λήξη των αρδεύσεων (28/09/2003) η βροχόπτωση ήταν συνολικά 74,29 mm. Το γεγονός των μειωμένων βροχοπτώσεων συντελεί στην πιο ξεκάθαρη αξιολόγηση των μεθοδολογιών άρδευσης που χρησιμοποιήθηκαν σε σχέση με τα παραγωγικά χαρακτηριστικά της καλλιέργειας ζαχαροτεύτλων, μιας και οι αναγκαίες για την καλλιέργεια ποσότητες νερού χορηγήθηκαν κυρίως μέσω της άρδευσης.

Η θερμοκρασία κατά το διάστημα αυτό κυμάνθηκε σε υψηλά επίπεδα (μέσες θερμοκρασίες 24ώρου μεγαλύτερες των 25°C). Οι συνθήκες αυτές προκάλεσαν έντονη εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2. Η μεγαλύτερη τιμή εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας (15,36 mm) σημειώθηκαν στις 5/7 (186 ημέρες από

1/1/2003). Την ημέρα εκείνη σημειώθηκε και η μεγαλύτερη μέση θερμοκρασία 24ώρου (Σχ. 3.1).



Σχήμα 3.1 Τιμές βροχόπτωσης και μέσης θερμοκρασίας 24ώρου ανά 10ήμερο έτους 2003.

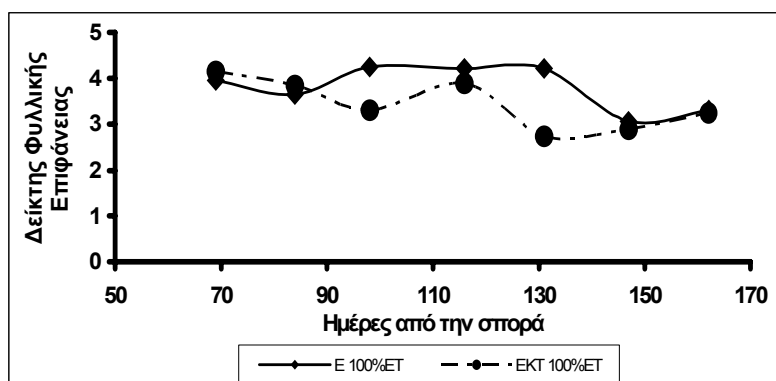


Σχήμα 3.2 Ημερήσια εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας

3.2 Δείκτης Φυλλικής Επιφάνειας

Ο κύριος στόχος σε μια καλλιέργεια ζαχαρότευτλων για την αύξηση της παραγωγικότητας είναι να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή δέσμευση της ηλιακής ακτινοβολίας, η οποία συνδέεται άμεσα με τον Δείκτη Φυλλικής Επιφάνειας (Δ.Φ.Ε.). Το 85-95% του προσπίπτοντος φωτός δεσμεύεται με Δ.Φ.Ε. μόνο 3 ή 4 [13], τιμή που επιτεύχθηκε και στις δύο μεταχειρίσεις. Πραγματοποιήθηκαν 7 μετρήσεις ανά 15ήμερο, από τις 25 Ιουνίου έως τις 26 Σεπτεμβρίου.

Στο Σχ. 3.3 παρουσιάζεται η εξέλιξη του ΔΦΕ στις δύο μεταχειρίσεις, όπου φαίνεται χαρακτηριστικά η επίδραση του μεγαλύτερου εύρους άρδευσης, προκαλώντας την συνεχή αυξομείωση της τιμής του ΔΦΕ κατά τους κύριους αρδευτικούς μήνες Ιούλιο και Αύγουστο.



Σχήμα 3.3 Εξέλιξη του Δείκτη Φυλλικής Επιφάνειας

3.3 Υδατοκατανάλωση

Η συνολική ποσότητα ύδατος, που χορηγήθηκε μέσω άρδευσης, ήταν 606,88mm. Ένα επιπλέον ποσό ύδατος 66,39mm δέχθηκε η καλλιέργεια από βροχόπτωση κατά την διάρκεια της αρδευτικής περιόδου (2^ο 15ήμερο Ιουνίου – τέλη Σεπτεμβρίου), το ωφέλιμο ύψος της οποίας ήταν 53,112mm. Τα αποτελέσματα αυτά συμφωνούν με τις εκτιμήσεις που δίνει η Ελληνική Βιομηχανία Ζάχαρης, με βάση την μελέτη πειραματικών αποτελεσμάτων, για τις συνολικές ανάγκες των ζαχαρότευτλων σε νερό κατά την διάρκεια μιας καλλιεργητικής περιόδου, με στόχο την οικονομικότερη απόδοση, οι οποίες ανέρχονται από 540 m³/στρ. στην περιοχή της Θράκης έως 610 m³/στρ. στην πεδιάδα της Θεσσαλίας. Οι διακυμάνσεις προς τα πάνω ή προς τα κάτω, που οφείλονται στις μεταβολές του καιρού από χρόνο σε χρόνο, είναι περιορισμένες σε ποσοστό περίπου ±10% [3]. Επίσης, ο Analogides [1], καθώς και ο Morillo-Velarde [8], αναφέρουν ότι στην λεκάνη της Μεσογείου, κατά τους θερινούς μήνες, απαιτείται εφαρμογή ύδατος στην καλλιέργεια ζαχαροτεύτλων μέχρι και 800 mm για να αντισταθμιστούν οι απώλειες που οφείλονται στην εξατμισοδιαπνοή.

3.4 Παραγωγικά αποτελέσματα

3.4.1 Αριθμός ριζών: Ο αριθμός ριζών/στρ δεν παρουσίασε σημαντικές διαφορές ανάμεσα στις μεταχειρίσεις (Πιν. 3.1, 3.2). Αυτό άλλωστε ήταν αναμενόμενο, αφού υπήρχε καλή ομοιομορφία φυτρώματος στον αγρό. Για τις δεδομένες αποστάσεις σποράς (50 cm μεταξύ των γραμμών και 15 cm επί της γραμμής) υπολογίζεται η φυτρωτική ικανότητα σε ποσοστό περίπου 80% [4].

3.4.2 Βάρος Φύλλων και Κορυφών: Μεγαλύτερο βάρος Φύλλων και Κορυφών εμφανίζεται στην μεταχείριση με το μικρότερο εύρος άρδευσης χωρίς να προκύπτει στατιστικά σημαντική διαφορά (Πιν. 3.1, 3.2). Το αποτέλεσμα αυτό έρχεται σε συμφωνία και με τον μέσο όρο των τιμών από όλες τις μετρήσεις του ΔΦΕ, όπου στη μεταχείριση E 100%ET τιμή είναι μεγαλύτερη.

3.4.3 Βάρος ριζών: Το εύρος άρδευσης φαίνεται να έπαιξε σημαντικό ρόλο. Οι πιο συχνές αρδεύσεις είχαν ως αποτέλεσμα μεγαλύτερο βάρος ριζών με τιμή του t-κριτηρίου πολύ κοντά στο να προκύψει στατιστικά σημαντική διαφορά (Πιν. 3.1, 3.2).

3.4.4 Ζαχαρικός τίτλος: Η διαφορά στο Ζαχαρικό τίτλο μεταξύ των μεταχειρίσεων δεν είναι στατιστικά σημαντική, αν και εμφανίζεται μια μικρή υπεροχή στην μεταχείριση

ΕΚΤ 100%ΕΤ (Πιν. 3.1, 3,2). Επίσης, φαίνεται να υπάρχει αρνητική συσχέτιση μεταξύ βάρους ριζών και ζαχαρικού τίτλου. Ανάλογα αποτελέσματα αναφέρει και ο Wolf [18].

3.4.5 Στρεμματοζάχαρο – Αξία αγοράς τεύτλων: Συνέπεια του αρκετά μεγαλύτερου βάρους ριζών της μεταχείρισης Ε 100%ΕΤ έναντι της ΕΚΤ 100%ΕΤ και ταυτόχρονα της μη σημαντικής διαφοράς στο ζαχαρικό τίτλο μεταξύ των δύο μεταχειρίσεων, είναι η επίτευξη μεγαλύτερου στρεμματοζαχάρου και αξία αγοράς τεύτλων, για την μεταχείριση με το μικρότερο εύρος άρδευσης, δίνοντας μάλιστα και στατιστικά σημαντική διαφορά (Πιν. 3.1, 3.2).

3.4.6 Μελασογόνα συστατικά: Η περιεκτικότητα των στοιχείων Κ, Να και α-αμινο Ν στις ρίζες των ζαχαρότευτλων χρησιμοποιείται στην προσπάθεια περιγραφής της χημικής ποιότητας των ριζών και ως εκ τούτου, στην ανάκτησης μεγαλύτερου ποσοστού ζάχαρης από τον χυμό κατά την διαδικασία της κρυστάλλωσης [5]. Μεταξύ των μεταχειρίσεων δεν σημειώθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές, όσον αφορά τα μελασογόνα συστατικά (Πιν. 3.1, 3.2).

Σύμφωνα με τον Milford et al. [7], οι εμπορικά αποδεκτές συγκεντρώσεις Κ στη ρίζα του ζαχαρότευτλου είναι 700 – 1000 mgr Κ / 100 g ζάχαρης. Οι συγκεντρώσεις πάνω από τα όρια αυτά μειώνουν το ποσό της ζάχαρης που κρυσταλλώνεται από το χυμό. Σχετικά με το Να, ο Barbanti [2] καθόρισε τα όρια της συγκέντρωσής του στις ρίζες των τεύτλων στη Βόρεια Ιταλία σε 140 mgr / 100 g ζάχαρης. Τέλος, σύμφωνα με τους Palmer et al. [10], τα αποδεκτά όρια του α-αμινο Ν στις ρίζες των τεύτλων στα ανόργανα εδάφη είναι 150 mgr / 100 g ζάχαρης και στα οργανικά εδάφη 200 mgr / 100 g ζάχαρης.

Κάτω από ελληνικές συνθήκες οι Tsialtas et al. [17], αναφέρουν συγκεντρώσεις Κ, Να και α-αμινο Ν στις ρίζες των τεύτλων σε πολύ υψηλότερα επίπεδα από τα αποδεκτά όρια που αναφέρθηκαν. Ανάλογα είναι και τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας.

Πίνακας 3.1 Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία και F-test.

Παραγωγικά Χαρακτηριστικά	Μ.Ο. Ε 100%ΕΤ	Τυπική απόκλιση Ε 100%ΕΤ	Μ.Ο. ΕΚΤ 100%ΕΤ	Τυπική απόκλιση ΕΚΤ 100%ΕΤ	F	P _{0,05}
Αρ. Ριζών	10833,3	430,3	10916,5	419,5	1,0522	0,9676
Βάρος Φ+Κ	3589,3	539,2	2737,5	355,4	2,3014	0,5114
Βάρος ριζών	9285,8	833,3	7729,8	500,3	2,7742	0,4243
Ζαχαρικός τίτλος	15,150	0,716	15,763	0,842	1,3811	0,7971
Στρεμματοζάχαρο	1404	97,5	1218	90,8	1,1542	0,9089
Αξία παραγωγής	451,625	32,366	401,290	38,119	1,3871	0,7944
Κάλιο	1189,230	230,855	1233,225	240,596	1,0862	0,9474
Νάτριο	383,420	36,094	367,355	72,625	4,0486	0,2802
α – amino Ν	443,245	27,841	470,243	62,209	4,9929	0,2195

Πίνακας 3.2 Σύγκριση των μέσων όρων με το t-test.

Παραγωγικά Χαρακτηριστικά	t	Τυπική απόκλιση Διαφοράς μέσων όρων	BE	P _{0,05}
Αρ. Ριζών	-0,1998	416,65	3	0,8544
Βάρος Φ+Κ	2,1111	403,4715	3	0,1252
Βάρος ριζών	3,0156	515,9840	3	0,0570
Ζαχαρικός τίτλος	-1,1942	0,5129	3	0,3182
Στρεμματοζάχαρο	4,6148	40,3051	3	0,0191
Αξία παραγωγής	5,6750	8,8696	3	0,0108
Κάλιο	-0,3411	128,9872	3	0,7555
Νάτριο	0,3049	52,6815	3	0,7803
α – amino N	-1,1973	22,5495	3	0,3172

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Μελετήθηκε η επίδραση του εύρους της στάγδην άρδευσης στα παραγωγικά χαρακτηριστικά καλλιέργειας ζαχαροτεύτλων, σε έδαφος καλά στραγγιζόμενο, ασβεστούχο, ύλο-αργιλοπηλώδες. Προέκυψαν στατιστικά σημαντικές διαφορές ($p=0,05$) στην παραγωγή στρεμματοζαχάρου, με αποτέλεσμα την επίσης σημαντικά μεγαλύτερη χρηματική αξία της παραγωγής υπέρ της μεταχείρισης, όπου το εύρος άρδευσης αντιστοιχούσε σε άθροισμα καθαρών αναγκών της καλλιέργειας σε νερό κοντά στην τιμή της υπολογιζόμενης δόσης άρδευσης.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. **Analogides, D. A.**, (1993). *Estimating sugar beet irrigation requirements on the basis of climatic parameters in Greece: results and conclusions from a 6-year experimental study (1980—85)*. In: Anonymous (eds), *Proceedings of the 56th IIRB Congress, Brussels*, pp. 259—269. International Institute for Beet Research, Brussels.
2. **Barbanti, L.** (1994). *New methods of recommending N-fertilizer use to sugar beet in the Mediterranean area*. In Anonymous, eds. *Proceedings of the 57th IIRB Congress, Brussels*, pp. 281-294. International Institute for Beet Research, Brussels, Belgium.
3. **EBZ AE** (1997). *Το πότισμα των ζαχαροτεύτλων*, σελ. 24.
4. **EBZ AE** (2001). *Ανοιξιάτικη προετοιμασία χωραφιού και σπορά τεύτλων*, σελ. 8.
5. **Harvey, W. C.** and **Dutton, V. J.** (1993). *Root quality and processing*. In *The Sugar Beet Crop*. pp. 571-617. D. A. Cooke and R. K. Scott (Eds.). Chapman & Hall, London, UK.
6. **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.

7. Milford, G. F. J., Armstrong, J. M., Jarvis, J. P., Houghton, J. B., Bellett-Travers, M. D., Jones, J. and Leigh, A. R. (2000). *Effect of potassium fertilizer on the yield, quality and potassium offtake of sugar beet crops grown on soils of different potassium status*. The Journal of Agricultural Science. **135**, pp 1-10.
8. Morillo-Velarde, R., (2001). *Les besoins hydriques de la betterave sucriere dans les regions mediterraneennes*. In: R. Morillo-Velarde, L. Cavazza, M. Cariolle, and R. Beckers (eds), IIRB Advances in Sugar Beet Research, Irrigation de la betterave sucriere en zone mediterraneenne, pp. 7-14. International Institute for Beet Research, Brussels.
9. Ντιούδης, Π., Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, Μ., Τερζίδης, Γ., Μασλάρης, Ν. και Νούσιος, Γ. (2003). *Διαφορετικές διατάξεις άρδευσης με σταγόνες σε καλλιέργεια ζαχαροτεύτων*. Πρακτικά 9^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου της Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης (ΕΥΕ), 2-5 Απριλίου, Θεσσαλονίκη, σελ. 159-166.
10. Palmer, M. and Casburn, C. (1985). *Amino nitrogen analyses – factory experiences*. British Sugar Beet Review **53**, pp 73-76.
11. Sakellariou-Makrantonaki, M., Kalfountzos, D., Vyrlas, P. (2002). *Water saving and yield increase of sugar beet with subsurface drip irrigation*. Global NEST: The International Journal **4** (2-3): 85-91.
12. Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, Μ., Μασλάρης, Ν., Καλφούντζος, Δ. και Γούλας, Χ. (1998). *Μελέτη διατάξεων άρδευσης με σταγόνες στην καλλιέργεια ζαχαροτεύτων*. Πρακτικά 1^{ου} Εθνικού Συνεδρίου της Εταιρείας Γεωργικών Μηχανικών Ελλάδος (ΕΓΜΕ), Αθήνα, σελ. 271-280.
13. Scott, K. R. and Jaggard, W. K. (1993). *Crop physiology and agronomy*. In The Sugar Beet Crop. pp. 179-237. D. A. Cooke and R. K. Scott (Eds.). Chapman & Hall, London, UK.
14. Sharmasarkar, C. F., Sharmasarkar, S., Held, J. L., Miller, D. S., Vance, F. G. and Zhang, R. (2001). *Agroeconomic Analyses of Drip Irrigation for Sugarbeet Production*. Agronomy Journal. **93**, pp 517-523.
15. Sharmasarkar C. F., Sharmasarkar, S., Miller, D. S., Vance, F. G. and Zhang, R. (2001). *Assessment of drip and flood irrigation on water and fertilizer use efficiencies for sugarbeets*. Agricultural Water Management. **46** (3), pp 241-251.
16. Tognetti, R., Palladino, M., Minnocci, A., Delfino, S. and Alvino, A. (2003). *The response of sugar beet to drip and low – pressure sprinkler irrigation in southern Italy*. Agricultural Water Management. **60** (2), pp 135 – 155.
17. Tsialtas, T. J. and Maslaris, N. (2004). *Effect of N Fertilization Rate on Sugar Yield and Non-Sugar Impurities of Sugar Beets (Beta vulgaris) Grown Under Mediterranean Conditions*. J. Agronomy & Crop Science. **190** (1-10). Άρθρο υπό εκτύπωση.
18. Wolf, I., (1995). *Sorte und Sortenwahl bei Zuckerrüben und deren Wechselwirkung zu Umwelt und Qualitätsbezahlung*. Dissertation, Universität Göttingen, Cuvillier, Göttingen.

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΥΣΤΕΡΗΣΗΣ ΣΤΗΝ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΩΝ ΚΑΤΑΤΟΜΩΝ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΚΛΥΣΗ ΕΛΔΑΦΩΝ

Γ. Κάργας, Ι. Αργυροκαστρίτης, Π. Κερκίδης

Γ.Π.Α. - Τμήμα Α.Φ.Π.&Γ.Μ., Τομέας Διαχείρισης Υδατικών Πόρων
Ιερά Οδός 75 - 11855, Αθήνα – e-mail: lhyd4kag@aua.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία επιλύεται αριθμητικά η διαφορική εξίσωση Richards που διέπει το φαινόμενο της κατακόρυφης διήθησης του νερού στο έδαφος για οριακές συνθήκες κατάκλυσης. Οι αναλυτικές εκφράσεις που αφορούν στη χαρακτηριστική καμπύλη υγρασίας με πλήρη βρόχο υστέρησης έχουν προκύψει από την προσαρμογή πειραματικών δεδομένων στη σχέση van Genuchten, ενώ οι υστερητικές εκφράσεις της $K(H)$, προέκυψαν από την εφαρμογή του θεωρητικού μοντέλου Mualem καθώς και από τον έμμεσο υπολογισμό της σχέσης $K(H)$ από πειραματικά δεδομένα οριζόντιας διήθησης (για την διαβροχή) και από πειράματα εκροής νερού με την εφαρμογή οριακής συνθήκης βήματος πίεσης, (one step outflow) (για τη στράγγιση). Για την προσαρμογή των πειραματικών δεδομένων της $K(H)$ από την οριζόντια διήθηση και την εκροή ενός βήματος χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση Brutsaert. Οι κατατομές υγρασίας αναφέρονται σε δύο πορώδη μέσα και σε διαφορετικούς χρόνους διήθησης. Και στις δύο περιπτώσεις πορωδών μέσων είναι φανερή η επίδραση της υστέρησης στη διαμόρφωση των προφίλ υγρασίας αλλά και στην αθροιστική διήθηση.

EFFECT OF HYSTERESIS ON SOIL WATER PROFILE DEVELOPMENT IN FLOOD IRRIGATED SOILS

G. Kargas, I. Argyrokastritis, P. Kerkides

Agricultural University of Athens, Dept. of Natural Resources Development and Agricultural Engineering, Sect. of Water Resources Management
75, Iera Odos str. – 11855 Athens, Greece e-mail: lhyd4kag@aua.gr

ABSTRACT

In this paper Richards' equation is solved numerically. Analytical expressions for soil moisture characteristics having a complete hysteretic loop, have been obtained by curve fitting of experimental data to the van Genuchten model. Analytical expressions for $K(H)$ relationships were obtained either by applying Mualem's model, or indirectly, through the execution of an infiltration experiment in a horizontal column containing an initially dry porous body (wetting branch), or through an one-step outflow experiment (drying branch) and fitting the data to Brutsaert's equation. Moisture profiles of vertical flooding infiltration for various times, as well as cumulative infiltration versus time relationships obtained numerically, are compared for two porous bodies. Hysteresis effects on moisture profile development and cumulative infiltration are found for both porous bodies examined.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Είναι γνωστό ότι η κατάκλυση αποτελεί τον παραδοσιακό τρόπο άρδευσης. Είναι επίσης διαπιστωμένο ότι τα τελευταία χρόνια έχει αυξηθεί η χρήση μεθόδων προσομοίωσης για την περιγραφή και την πρόβλεψη φαινομένων μεταφοράς μάζας στην ακόρεστη ζώνη. Μεταξύ των φαινομένων αυτών συγκαταλέγονται τα φαινόμενα κίνησης διαλυτών ουσιών στο έδαφος καθώς και το φαινόμενο της διήθησης του νερού κατά την εφαρμογή της άρδευσης. Απαραίτητη προϋπόθεση για την εφαρμογή τέτοιων μεθόδων είναι η γνώση των υδραυλικών ιδιοτήτων του εδάφους και συγκεκριμένα η σχέση της περιεκτικότητας σε νερό με την αρνητική πίεση $\Theta(H)$ (χαρακτηριστική καμπύλη υγρασίας) και η σχέση της υδραυλικής αγωγιμότητας με την περιεκτικότητα σε νερό $K(\Theta)$ ή την αρνητική πίεση $K(H)$. Όλες οι σχέσεις αυτές χαρακτηρίζονται από υστέρηση και για να μπορεί κανείς να την λάβει υπόψη του, θα πρέπει να έχει στη διάθεσή του πειραματικά δεδομένα τα οποία και πολλά είναι στον αριθμό τους και επίπονες προσπάθειες πρέπει να καταβάλλει για την απόκτησή τους. Συνέπεια αυτού του γεγονότος είναι να καταλήγει κανείς συχνά στο να αγνοήσει την ύπαρξη της υστέρησης με αποτέλεσμα να οδηγείται σε σημαντικά σφάλματα (Nielsen et al., 1986, Russo et al., 1989, Si and Kachanoski, 2000). Από την άλλη μεριά, πολλές είναι οι μέθοδοι που έχουν επινοηθεί για τον προσδιορισμό αυτών των ιδιοτήτων και μάλιστα αυτές ποικίλουν από πλευράς λεπτομέρειας και πολυπλοκότητας στη διαδικασία της μέτρησης αλλά και ακρίβειας ως προς το αποτέλεσμα (Stolte et al., 1994). Ο εργαστηριακός προσδιορισμός της χαρακτηριστικής καμπύλης υγρασίας σε διαταραγμένα ή αδιατάρακτα εδαφικά δείγματα, αν και χρονοβόρος, ιδιαίτερα όταν κάποιος ενδιαφέρεται για την υστερητική συμπεριφορά του εδάφους, φαντάζει ως σχετικά εύκολη υπόθεση για έναν ερευνητή. Εν τούτοις ο άμεσος προσδιορισμός της σχέσης $K(H)$ ή της σχέσης της διαχυτικότητας με την περιεκτικότητα σε νερό $D(\Theta)$, είναι μια σχετικά χρονοβόρος διαδικασία και απαιτεί ιδιαίτερο και ακριβό εξοπλισμό. Για το λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί διάφορα υπολογιστικά σχήματα (Childs and Collis-George, 1950, Burdine, 1953, Marshall, 1958, Jackson 1972, Mualem, 1976, van Genuchten, 1980) με τα οποία μπορεί κανείς να προβλέψει τις ιδιότητες αυτές από άλλες πιο εύκολα μετρήσιμες, όπως είναι η σχέση $\Theta(H)$ και η υδραυλική αγωγιμότητα στον κορεσμό K_s . Επίσης έχουν προταθεί κατά καιρούς έμμεσες ή εμπειρικές μέθοδοι με τις οποίες οι σχέσεις $\Theta(H)$ και $K(H)$ μπορούν να υπολογιστούν με τη βοήθεια των λεγόμενων συναρτήσεων απεικόνισης πεδίου (Αντωνόπουλος, 1999) (pedotransfer functions) μέσω εύκολα μετρούμενων εδαφικών ιδιοτήτων όπως η μηχανική σύσταση, η φαινομενική πυκνότητα, το ποσοστό της οργανικής ουσίας κ.ά. Φυσικά δεν υπάρχει καμία αμφιβολία ότι οι πλέον αξιόπιστες είναι οι άμεσες μέθοδοι και μάλιστα αν είναι δυνατό, όλοι οι προσδιορισμοί να γίνονται σε ένα και το αυτό εδαφικό δείγμα (van Genuchten and Leij, 1992). Στην παρούσα εργασία η σχέση $\Theta(H)$ κατά την αποστράγγιση και διαβροχή συνδυάζεται με τις αντίστοιχες σχέσεις $K(H)$ που προκύπτουν με τρεις διαφορετικούς τρόπους και αποτελούν δεδομένα εισόδου για την αριθμητική επίλυση της εξίσωσης του Richards στην περίπτωση της κατακόρυφης διήθησης με κατάκλυση, με σκοπό τη διερεύνηση της επίδρασης της υστέρησης σε προβλήματα άρδευσης (Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, 1986). Ο πρώτος τρόπος αφορά στην πρόβλεψη της σχέσης $K(H)$ για τους οριακούς κλάδους στράγγισης και διαβροχής με την εφαρμογή του μοντέλου Mualem (1976) στη σχέση $\Theta(H)$ του van Genuchten (1980). Ο δεύτερος τρόπος αφορά στη σχέση $K(H)$ που δύναται να προκύψει σε συνδυασμό με τη σχέση $D(\Theta)$ από ένα πείραμα εκροής ενός βήματος (για τον κλάδο στράγγισης). Ο τρίτος τρόπος αφορά στη σχέση $K(H)$ που δύναται να προκύψει σε

συνδυασμό με τη σχέση $D(\Theta)$ από πείραμα οριζόντιας διήθησης (για τον κλάδο διαβροχής) (Ευαγγελίδης, 2003).

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν δύο πορώδη μέσα. Ένα έδαφος με κατανομή μεγέθους κόκκων 50% άμμο, 43% άργιλο και 7% ιλύ (Αμμώδης αργιλος) και ένα μείγμα άμμου και τύρφης που περιείχε τρία κλάσματα άμμου (0,1-0,15mm, 0,15-0,25mm και 0,25-1mm σε ποσοστά 5%, 12% και 70% αντίστοιχα) 5% άργιλο και ιλύ και 8% τύρφη (Άμμος). Οι υδραυλικές ιδιότητες των μέσων αυτών, δηλ. οι σχέσεις $\Theta(H)$ και $K(H)$, η γνώση των οποίων είναι απαραίτητη για την αριθμητική επίλυση της εξίσωσης του Richards, προσδιορίστηκαν με μία μεθοδολογία που έχει εφαρμοστεί επιτυχώς στο παρελθόν (Kargas et al., 2004). Αρχικά προσδιορίστηκε ο βρόχος υστέρησης της σχέσης $\Theta(H)$ στο μεν έδαφος με τη βοήθεια κύτταρου πίεσης, το οποίο στηρίζεται στην ίδια αρχή με τη συσκευή Richards, στο δε μείγμα άμμου και τύρφης με συσκευή Haines.

Από τα δεδομένα των δύο οριακών κλάδων του βρόχου υστέρησης με τη βοήθεια του προγράμματος RETC (van Genuchten et al., 1988) υπολογίστηκαν οι συντελεστές a , n και m της εξίσωσης van Genuchten (1980) και για τα δύο πορώδη μέσα και για τον κάθε κλάδο ξεχωριστά.

$$\Theta(H) = \frac{\Theta_s - \Theta_r}{\left(1 + (a \times H)^n\right)^m} + \Theta_r \quad (1)$$

όπου : Θ η υγρασία (cm^3/cm^3), Θ_s η υγρασία στον κορεσμό (cm^3/cm^3), Θ_r η υπολειμματική υγρασία (cm^3/cm^3) και H το φορτίο πίεσης (cm) (Πίνακας 1).

Από την αναλυτική έκφραση $\Theta(H)$ προέκυψε η αναλυτική έκφραση της κλίσης

$$\frac{d\Theta}{dH} = (\Theta_s - \Theta_r) \times a \times m \times n \times (a \times H)^{n-1} \times \left(1 + (a \times H)^n\right)^{-m-1} \quad (2)$$

Ο προσδιορισμός της υδραυλικής αγωγιμότητας στον κορεσμό K_s , έγινε με περατόμετρο σταθερού φορτίου σε ξεχωριστό εδαφικό δείγμα, αλλά με την ίδια περίπτωση φαινομενική πυκνότητα με αυτή του δείγματος στο κύτταρο πίεσης. Ελήφθη ο μέσος όρος τριών επαναλήψεων για την απόκτηση της τιμής της K_s . Κατόπιν ακολούθησε η πρόβλεψη της σχέσης $K(H)$ για τις οριακές καμπύλες αποστράγγισης και διαβροχής, μέσω της εξίσωσης (3) που προκύπτει από την εφαρμογή της εξίσωσης (1) στο μοντέλο υπολογισμού της $K(H)$ του Mualem (1976) (van Genuchten, 1980).

$$K(H) = \frac{K_s \times \left\{1 - (a \times |H|)^{n-1} \times \left[1 + (a \times |H|)^n\right]^{-m}\right\}^2}{\left\{1 + (a \times |H|)^n\right\}^{m/2}} \quad (3)$$

Μετά το τέλος της διαδικασίας διαβροχής, πραγματοποιήθηκε το πείραμα εκροής ενός βήματος και στα δύο πορώδη μέσα. Στην περίπτωση του εδάφους εφαρμόστηκε βήμα πίεσης 320 cm, ενώ στην περίπτωση του μίγματος άμμου και τύρφης 90 cm. Κατά τη διαδικασία εκροής ενός βήματος έγινε καταγραφή των όγκων εκροής V_i και

των αντίστοιχων χρόνων t_i με την βοήθεια ειδικής ζυγαριάς και κατόπιν προσδιορίστηκε η σχέση $D(\bar{\Theta})$ με τη σχέση του Gardner (1962):

$$D(\bar{\Theta}) = -\frac{4L^2}{\pi^2} \cdot \frac{\frac{d\bar{\Theta}}{dt}}{(\bar{\Theta} - \Theta_f)} \quad (4)$$

όπου D ο συντελεστής διάχυσης, L το ύψος του δείγματος, $\bar{\Theta}$ η μέση υγρασία, $\frac{d\bar{\Theta}}{dt}$ η

κλίση της καμπύλης $\bar{\Theta}(t)$ και Θ_f η τελική υγρασία του δείγματος στην ισορροπία.

Από τη σχέση $D(\bar{\Theta})$ και με χρήση της εξίσωσης (2) για την καμπύλη αποστράγγισης, καθώς και του ορισμού του συντελεστή διάχυσης D , όπως αυτός ορίστηκε από τους

Childs and Collis-George (1950), $D(\Theta) = K \times \frac{dH}{d\Theta}$ προσδιορίστηκε η σχέση $K(H)$

κατά την αποστράγγιση και για τα δύο πορώδη μέσα που εξετάστηκαν. Κατόπιν ακολούθησε πείραμα οριζόντιας διήθησης και στα δύο πορώδη μέσα που εξετάστηκαν και προσδιορίστηκε η σχέση $D(\Theta)$ για καθένα από αυτά με εφαρμογή της μεθόδου που έχει προταθεί κατά το παρελθόν από τους Bruce and Klute (1956) και Matano (1930). Από τη σχέση $D(\Theta)$ και με χρήση της εξίσωσης (2) για την καμπύλη διαβροχής, καθώς και του ορισμού του συντελεστή διάχυσης D , όπως αυτός ορίστηκε από τους Childs and Collis-George (1950), προσδιορίστηκε η σχέση $K(H)$ κατά τη διαβροχή και για τα δύο πορώδη μέσα. Τόσο στην περίπτωση της σχέσης $K(H)$ κατά την αποστράγγιση, που προέκυψε έμμεσα από πείραμα εκροής ενός βήματος, όσο και στην περίπτωση της σχέσης $K(H)$ κατά τη διαβροχή, που προέκυψε έμμεσα από πείραμα οριζόντιας διήθησης, έγινε προσαρμογή των πειραματικών δεδομένων στην εξίσωση (5) (Gardner, 1960, Brutsaert, 1967) και για τα δύο πορώδη μέσα και προσδιορίστηκαν οι παράμετροι A και B .

$$\boxed{\hspace{10em}} \quad (5)$$

Ακολούθησε η αριθμητική επίλυση της εξίσωσης του Richards με

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial H}{\partial z} + K \right) \quad (6)$$

με αρχική συνθήκη

$$t = 0, z \leq 0, \Theta = \Theta_\alpha, (H = H_\alpha) \quad (7)$$

και οριακές συνθήκες

$$z = 0, t > 0, \Theta = \Theta_s, (H = H_0 = 0) \quad (8)$$

$$z \rightarrow -\infty, t > 0, \Theta = \Theta_a \quad (9)$$

Η αριθμητική επίλυση επιτεύχθηκε με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών, η οποία χρησιμοποιεί ένα πεπλεγμένο σχήμα με ρητή γραμμικοποίηση, όπως αυτή έχει παρουσιαστεί από τους Haverkamp et al. (1977) (σχήμα Laasonen). Τα βήματα χρόνου και διαστήματος που χρησιμοποιήθηκαν εξασφάλισαν τοπικά ισοζύγια όγκου νερού της τάξης του 0.99 σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν. Η αριθμητική επίλυση της εξίσωσης του Richards, ανάλογα με τις εξισώσεις που περιγράφουν τις σχέσεις $\Theta(H)$ και $K(H)$ για τα δύο πορώδη μέσα που εξετάστηκαν, έγινε για τις εξής περιπτώσεις:

1. Χρήση της $\Theta(H)$ με τον οριακό κλάδο στράγγισης από την εξίσωση (1) και χρήση της σχέσης $K(H)$ με την εξίσωση (3) (λύση Α).
2. Χρήση της $\Theta(H)$ με τον οριακό κλάδο διαβροχής από την εξίσωση (1) και χρήση της σχέσης $K(H)$ με την εξίσωση (3) (λύση Β).
3. Χρήση της $\Theta(H)$ με τον οριακό κλάδο στράγγισης από την εξίσωση (1) και χρήση της σχέσης $K(H)$ που προέκυψε έμμεσα από αντίστοιχο πείραμα εκροής ενός βήματος, με την εξίσωση (5) (λύση Γ).
4. Χρήση της $\Theta(H)$ με τον οριακό κλάδο διαβροχής από την εξίσωση (1) και της σχέσης $K(H)$ που προέκυψε έμμεσα από αντίστοιχο πείραμα οριζόντιας διήθησης, με την εξίσωση (5) (λύση Δ).

Στην περίπτωση του μίγματος άμμου και τύρφης, λύσεις της εξίσωσης του Richards επιτεύχθηκαν και για τις 4 προαναφερθείσες περιπτώσεις περιγραφής των υδραυλικών ιδιοτήτων. Στην περίπτωση του εδάφους, (Αμμώδους αργίλου) αντίστοιχες λύσεις επιτεύχθηκαν μόνο για τις περιπτώσεις 1, 2 και 3.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων των εξισώσεων που χρησιμοποιήθηκαν για την περιγραφή των σχέσεων $\Theta(H)$ και $K(H)$ για τα δύο πορώδη μέσα που χρησιμοποιήθηκαν και για τις λύσεις της εξίσωσης του Richards που επιτεύχθηκαν.

Πίνακας 1. Τιμές των παραμέτρων των εξισώσεων που χρησιμοποιήθηκαν για την περιγραφή των σχέσεων $\Theta(H)$ και $K(H)$ στις αριθμητικές λύσεις

Μείγμα άμμου και τύρφης (Άμμος)				
	Στράγγιση	Διαβροχή	Στρ. -εκρ.1 βήμ.	Διαβρ.-οριζ.διήθ.
Λύση	A	B	Γ	Δ
Θ_s (cm ³ .cm ⁻³)	0,585	0,585	0,585	0,585
Θ_r (cm ³ .cm ⁻³)	0,251	0,251	0,251	0,251
K_s (cm/h)	58,8	58,8	58,8	58,8
a (h ⁻¹)	0,03017	0,10201	0,03017	0,10201
n	6,9205	2,32083	6,9205	2,32083
m	0,8555	0,56911	0,8555	0,56911
A	-	-	1,553E+08	2,2115E+04
B	-	-	6,488	4,973026

Έδαφος (Αμμώδης άργιλος)				
Θ_s ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	0,612	0,612	0,612	-
Θ_r ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	0,2295	0,236	0,2295	-
K_s (cm/h)	14,88	14,88	14,88	-
a (h^{-1})	0,0963	0,3377	0,0963	-
n	1,7334	1,637	1,7334	-
m	0,4231	0,38917	0,4231	-
A	-	-	12,88027	-
B	-	-	2,44538	-

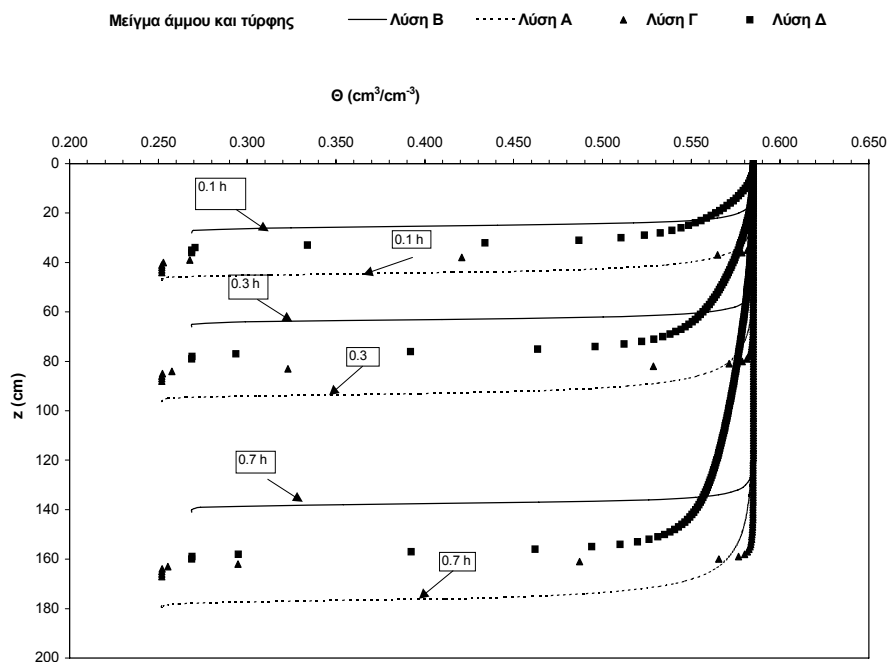
Σε όλες τις περιπτώσεις προσαρμογής των πειραματικών σημείων ή των σημείων που προέκυψαν έμμεσα από πείραμα εκροής ενός βήματος ή από πείραμα οριζόντιας διήθησης, στις εξισώσεις που περιγράφουν τις υδραυλικές ιδιότητες των εξετασθέντων πορωδών μέσων, ο συντελεστής συσχέτισης ήταν της τάξης του 99%.

Στο σχήμα 1 παρουσιάζονται για χρόνους διήθησης 0,1ώρες 0,3 ώρες και 0,7 ώρες αντίστοιχα, οι κατατομές υγρασίας που προέκυψαν από την αριθμητική επίλυση της εξίσωσης του Richards για το μείγμα άμμου και τύρφης, συγκριτικά και για τις τέσσερις περιπτώσεις λύσεων που επετεύχθησαν.

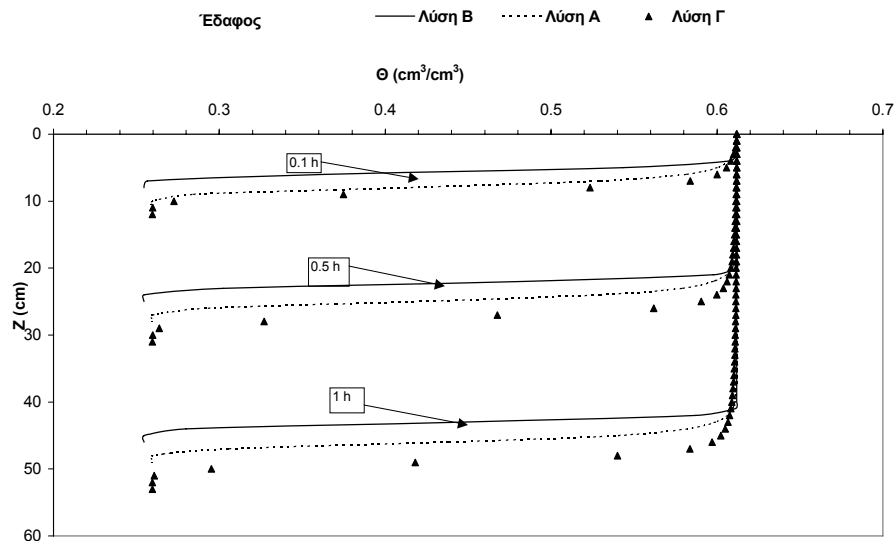
Στο σχήμα 2 παρουσιάζονται για χρόνους διήθησης 0,1ώρες 0,5 ώρες και 1,0 ώρα αντίστοιχα, οι κατατομές υγρασίας που προέκυψαν από την αριθμητική επίλυση της εξίσωσης του Richards για το έδαφος, συγκριτικά για τις τρεις περιπτώσεις λύσεων που επετεύχθησαν.

Στο σχήμα 3 παρουσιάζονται συγκριτικά οι σχέσεις αθροιστικής διήθησης – χρόνου $I(t)$ που αντιστοιχούν στις τέσσερις περιπτώσεις αριθμητικών λύσεων που επετεύχθησαν για το μείγμα άμμου και τύρφης (άμμος).

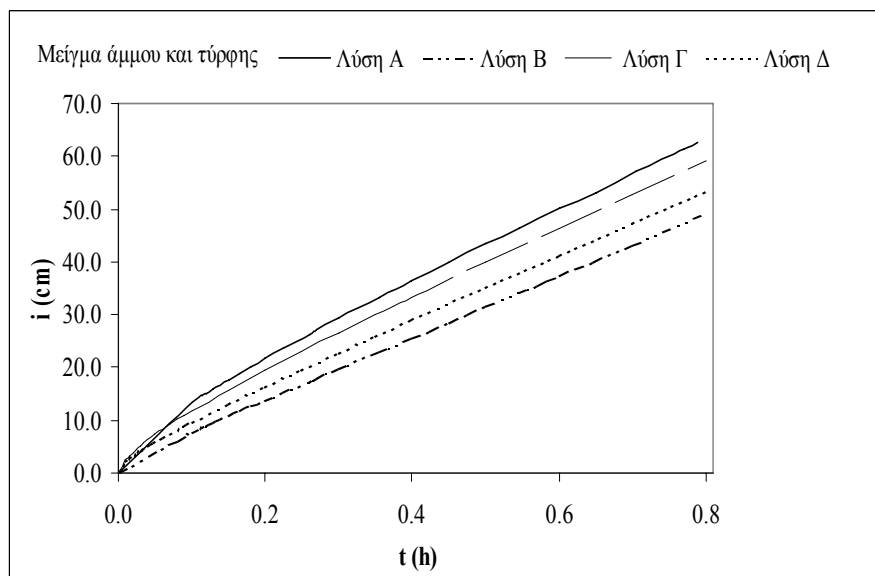
Στο σχήμα 4 παρουσιάζονται συγκριτικά οι σχέσεις αθροιστικής διήθησης – χρόνου $I(t)$ που αντιστοιχούν στις τρεις περιπτώσεις αριθμητικών λύσεων που επετεύχθησαν για το έδαφος (.



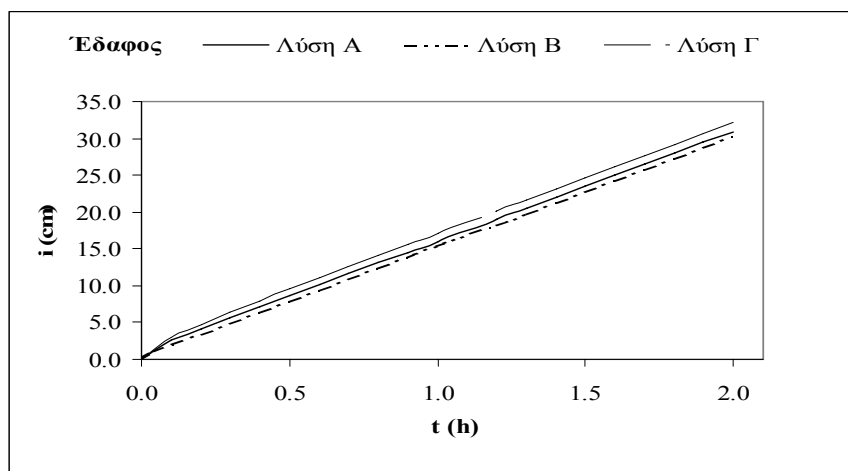
Σχήμα 1. Κατατομές υγρασίας για το μείγμα άμμου και τύρφης, συγκριτικά για όλες τις περιπτώσεις λύσεων που επετεύχθησαν και για διάφορους χρόνους διήθησης



Σχήμα 2. Κατατομές υγρασίας για το έδαφος, συγκριτικά για όλες τις περιπτώσεις λύσεων που επετεύχθησαν και για διάφορους χρόνους διήθησης



Σχήμα 3. Σύγκριση των σχέσεων αθροιστικής διήθησης – χρόνου που αντιστοιχούν στις τέσσερις περιπτώσεις αριθμητικών λύσεων που επετεύχθησαν για το μείγμα άμμου και τύρφης (Αμμος).



Σχήμα 4. Σύγκριση των σχέσεων αθροιστικής διήθησης – χρόνου που αντιστοιχούν στις τρεις περιπτώσεις αριθμητικών λύσεων που επετεύχθησαν για το έδαφος (Αμμώδης άργιλος).

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τα παραπάνω σχήματα προκύπτουν τα ακόλουθα:

Η αγνόηση του φαινομένου της υστέρησης στην κατακόρυφη διήθηση υπό συνθήκες κατάκλυσης, στην οποία μπορεί να καταλήξει κανείς επικαλούμενος δυσκολίες πειραματισμού, οπότε να χρησιμοποιήσει στους υπολογισμούς του καμπύλες στράγγισης που είναι και πιο εύκολα προσδιορίσιμες, αντιπροσωπεύεται από τις λύσεις Α και Γ. Στις λύσεις αυτές χρησιμοποιείται ο κλάδος στράγγισης για την περιγραφή των σχέσεων $\Theta(H)$ και $K(H)$, με τη δεύτερη σχέση είτε να προβλέπεται με το μοντέλο Mualem (1976) (λύση Α) είτε να προσδιορίζεται έμμεσα με πείραμα εκροής ενός βήματος (λύση Γ). Μια τέτοια επιλογή φαίνεται ότι οδηγεί σε υπερεκτίμηση της ποσότητας του νερού που διηθείται. Αυτό είναι φανερό τόσο στην περίπτωση του εδάφους όσο και στην περίπτωση του μείγματος άμμου και τύρφης, αφού οι σχέσεις $I(t)$ στις περιπτώσεις λύσεων Α και Γ ευρίσκονται πάνω από τις αντίστοιχες σχέσεις $I(t)$ των λύσεων Β και Δ, στις οποίες χρησιμοποιείται ο κλάδος της διαβροχής. Μεγαλύτερη και πιο αισθητή διαφορά στις κατατομές υπάρχει στην περίπτωση του μείγματος άμμου και τύρφης, όπου η συμμετοχή της άμμου στο πορώδες μέσο κάνει πιο αισθητή την ύπαρξη της υστέρησης. Αντίστοιχα μεγάλη και αισθητή διαφορά εμφανίζεται και στις καμπύλες αθροιστικής διήθησης – χρόνου στο μείγμα άμμου και τύρφης. Η μεγαλύτερη υπερεκτίμηση στην αθροιστική διήθηση γίνεται στην περίπτωση της λύσης Α, όπου χρησιμοποιήθηκε ο κλάδος στράγγισης για την περιγραφή της σχέσης $\Theta(H)$ με το μοντέλο του van Genuchten (1980) και η σχέση $K(H)$ προβλέφθηκε από το συνδυασμό του μοντέλου του Mualem (1976) με τη σχέση $\Theta(H)$ του μοντέλου του Van

Genuchthen. Οι παραπάνω διαφορές στις κατατομές επιβεβαιώνονται από τις διαφορές που έχουν αναφερθεί και από άλλους ερευνητές (Gupta et al., 1974, Kerkides et al. 2005, κ. ά) ότι προκύπτουν στον υπολογισμό της υδραυλικής αγωγιμότητας

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Αντωνόπουλος Β., 1999. *Υδρολογία της ακόρεστης ζώνης του εδάφους*, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Υπηρεσία Δημοσιευμάτων, σ.264
2. R.R Bruce and A. Klute 1956: The measurement of soil moisture diffusivity. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 20:458-462.
3. Burdine N.T. 1953: Relative permeability calculations from pore-size distribution data. *Petr. Trans. Am. Inst. Mining Metall. Eng.* 198: 71-77.
4. Brutsaert W., 1967. Some methods of calculating unsaturated permeability. *Trans.ASAE* 10: 400-404
5. Childs, E.C and N. Collis-George, 1950. The permeability of porous materials, *Proc. Roy. Soc. Ser. A*, 201: 392-405.
6. Gardner W.R. 1960: Dynamic aspects of water availability to plants. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 26: 63-73.
7. Gardner, W.R., 1962. Note on the separation and solution of diffusion type equations. *Soil Sci.Soc.Am.Proc.*, 38:710-716.
8. Gupta, S.C., D.A. Farrel, and W.E.Larson, 1974. Determining effective soil water diffusivities from one-step outflow experiments, *Soil Sci.Soc.Am.Proc.*, 38: 701-716.
9. Ευαγγελίδης Χ., 2001. Ανάλυση του φαινομένου ροής-συγκέντρωσης σε ακόρεστη κατάσταση με πειραματικές και θεωρητικές διαδικασίες. Περίπτωση οριζόντιας ροής. Διδακτορική διατριβή, Α.Π.Θ, Τμήμα Α.Τ.Μ, Θεσσαλονίκη.
10. Haverkamp R., Vauclin M., Touma J., Wierenga P.J. and Vachaud G., 1977. A comparison of Numerical Simulation Models for One-Dimensional infiltration. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 41:285-296.
11. Jackson R.A. 1972: On the calculation of hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 36: 380-383.
12. Kargas G. P., Patsialou and P. Kerkides., 2004. Comparative Evaluation of Methodologies used in the Determination of the Hydraulic Properties of Porous Media, EWRA Proceedings on «Water Resources Management: Risk and challenges for the 21 of Century», September 2-4, 2004 Izmir, Turkey, pp. 891-901.
13. Kerkides P., G. Kargas, I. Argyrokastritis, 2005. Comparative Evaluation of Methodologies used in the Determination of the Hydraulic Properties of Porous Media. *Irrigation and Drainage* (Submitted)
14. Marshall T.J. 1958: A relation between permeability and size distribution pores. *J. Soil Sci.* 9:1-8
15. Matano C., 1932. On the relation between the diffusion coefficient and concentrations of solid metals. *Jap. J. Phys.* 8: 109-133.
16. Mualem, Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, *Water Resour. Res.*, 12:513-522.
17. Nielsen, D.R et al., 1986. Water flow and solute transport processes in the unsaturated zone, *Water. Res.Research*, 22: 89-108.

18. Russo, D. W et al. 1989. Numerical analysis of solute transport during transient irrigation: 1. Effect of hysteresis and profile heterogeneity, *Water. Res. Research.*, 25:2109-2118.
19. Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη Μ., 1986. Επίδραση των υδροδυναμικών παραμέτρων διήθησης-στράγγισης σε προβλήματα αρδεύσεων. Διδακτορική διατριβή, Α.Π.Θ. Τμήμα Α.Τ.Μ, Θεσσαλονίκη.
20. Si, B. C. and Kachanoski R.G., 2000. Unified solution for infiltration and drainage with hysteresis: Theory and field test. *SSSAJ* 64: 30-36.
21. Stolte J. et. al. 1994 : Comparison of six methods to determine unsaturated soil hydraulic conductivity, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58:1596-1603.
22. van Genuchten, M. Th., 1980. A closed form equation for the predicting the hydraulic conductivities of unsaturated soils, *SSSAJ* 44:892-898.
23. van Genuchten and Leij, 1992. On estimating the hydraulic properties of Unsaturated Soils. *Proc. of International Workshop on Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils*, p.1-14.

**ΟΡΘΟΛΟΓΙΚΗ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΥΔΑΤΩΝ
ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΛΙΒΑΔΙΟΥ Ν. ΛΑΡΙΣΑΣ
ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΡΔΕΥΣΗ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ**

**Δ. Καλφούντζος¹, Γ. Ζαβάκος¹, Ι. Αλεξίου¹,
Σ. Κωτσόπουλος¹, Κ. Δραγοΐδου¹, Ι. Καλαβρουζιώτης², Κ. Γκούμας³**

¹ΕΘΙΑΓΕ-Ινστιτούτο Συστημάτων Ψηφιακής Τεχνολογίας και Αγροτικής Πληροφορικής, Θεοφράστου 1, Λάρισα 413 35, E-mail: kalfountzos@nagref.gr

²Τμήμα Περιβάλλοντος και Διαχείρισης Φυσικών Πόρων του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων, Γ. Σεφέρη 2, Αγρίνιο 30100, E-mail: ikalavru@cc.uoi.gr

³ Νομαρχιακή Αυτοδιοίκηση Λάρισας, Δ/ση Εγγείων Βελτιώσεων, 413 35 Λάρισα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η πρόσβαση σε αρδευτικό νερό μπορεί να παίζει σημαντικό ρόλο και να συμβάλει στην καταπολέμηση της φτώχειας και στην βελτίωση της ποιότητας ζωής των κατοίκων της υπό μελέτη αγροτικής περιοχής. Η κατασκευή φράγματος στο Λιβάδι Ελασσόνας χωρητικότητας $1.8 \cdot 10^6$ m³ νερού θα επιλύσει το πρόβλημα της άρδευσης 5000 στρεμμάτων σε μία περιοχή που επικρατούσαν μη αρδευόμενες καλλιέργειες. Τα εδάφη της υπό άρδευση περιοχής είναι πεδινά με μέση προς βαριά σύσταση και καλή υδρομορφία. Η ορθολογική διαχείριση του διαθέσιμου νερού αποβλέπει στην εξοικονόμησή του και στην αύξηση της παραγωγικότητάς του.

**RATIONAL WATER USE OF THE LIVADI DAM IN
LARISSA PREFECTURE FOR CROP IRRIGATION**

**D. Kalfountzos¹, G. Zvakos¹, I. Alexiou¹,
S. Kotsopoulos¹, K. Dragoidou¹, I. Kalavrouziotis², K. Goumas³**

¹NAGREF-Institute of Digital Technology Systems and Agricultural Informatics
1, Theophrastos Str., 413 35, Larissa, E-mail: kalfountzos@nagref.gr

²Department of Environment and Water Resources Management, University of
Ioannina, 2, G. Seferis str., 301 00, Agrinio, E-mail: ikalavru@cc.uoi.gr

³ Prefecture of Larissa, Land Reclamation Service, 1, Farsala str., 413 35 Larissa

ABSTRACT

The access to irrigation water can play important role and contribute in the fighting of poverty and the improvement of quality of life of residents of rural regions. The construction of a dam at Livadi with capacity $1.8 \cdot 10^6$ m³ of water will solve the problem of irrigation of 500 hectares in a region where non-irrigated agriculture is prevailed. The land of the studying region is flat with medium to heavy soil texture and good hydromorphy. The rational management of available water aims to its saving and the increase of its productivity.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το νερό αποτελεί τον περιοριστικό παράγοντα για την οικονομική ανάπτυξη και βελτίωση του οικονομικού επιπέδου μιας περιοχής η οποία είναι καθαρά γεωργική. Αυτό δεν οφείλεται πάντα στην έλλειψη υδατικών πόρων. Οι πολύ μεγάλες διακυμάνσεις της διαθεσιμότητας και της ζήτησης του νερού είναι ο κύριος λόγος της έλλειψης. Ο Δήμος Λιβαδίου Ελασσόνας δεν διαθέτει σήμερα έργα αξιοποίησης του υδατικού δυναμικού του με σκοπό να καλύψουν τις σημερινές ανάγκες, ούτε πολύ περισσότερο τις μελλοντικές. Για τον λόγο αυτό προέβη στην κατασκευή φράγματος στην περιοχή όπως δείχνει το Σχήμα 1. Το φράγμα Λιβαδίου έχει ήδη κατασκευαστεί και υπολείπονται η κατασκευή και λειτουργία του βιολογικού καθαρισμού του Δ.Δ. Λιβαδίου το οποίο βρίσκεται στα ανάντη της λεκάνης κατάκλυσης του φράγματος και στα κατάντη ο κύριος αγωγός μεταφοράς 1900 m με το αρδευτικό δίκτυο που βρίσκεται υπό δημοπράτηση. Το φράγμα έγινε χωμάτινο με αργιλικό πυρήνα και ύψος αναχώματος 45 m, με μήκος στέψης 245 m, πλάτος στέψης 8 m, επιφάνεια ταμιευτήρα 180.000 m² και δίνει εκμεταλλεύσιμη χωρητικότητα 1.800.000 m³. Από την κατασκευή του φράγματος αυτού, ο ωφέλιμος όγκος νερού θα χρησιμοποιηθεί για την άρδευση περιοχών πλησίον του Δ.Δ. Δολίχης 5.000 στρ. σε μια περιοχή που σήμερα αν και είναι η πιο παραγωγική από πλευράς γονιμότητας, λόγω της μη ύπαρξης υδροφόρων στρωμάτων καλλιεργείται με μη αρδευόμενες καλλιέργειες. Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η εκτίμηση των συνολικών αναγκών σε νερό των περιοχών αυτών, η καταγραφή του υπάρχοντος υδατικού δυναμικού, το έλλειμμα νερού υπό την παρούσα κατάσταση και η μελλοντική αξιοποίηση του νερού μετά την έναρξη λειτουργίας του φράγματος.

2. ΠΑΡΟΥΣΑ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

2.1 Κατανομή πληθυσμού

Ο Δήμος Λιβαδίου εκτείνεται βορειοδυτικά του Νομού Λάρισας. Η έκταση του Δήμου είναι 158,3 Km² και αντιπροσωπεύει το 2,86% της συνολικής έκτασης του Νομού. Το μεγαλύτερο μέρος του Δήμου χαρακτηρίζεται μορφολογικά ως ορεινό ενώ σ' ένα πολύ μικρό ποσοστό υπάρχουν πεδινές εκτάσεις, περιλαμβάνει δύο δημοτικά διαμερίσματα (Δ.Δ.), του Λιβαδίου και της Δολίχης. Το Λιβάδι είναι χτισμένο στις πλαγιές του Όρους Τίταρος σε υψόμετρο 1160 μ. με θέα που νότια και δυτικά εκτείνεται μέχρι την Πίνδο. Λόγω του υψομέτρου και του ξηρού κλίματος κατά τους θερινούς μήνες έχει αναγνωριστεί από το 1967 ως τουριστικός τόπος και δέχεται πάνω από 2.000 παραθεριστές. Λίγα χιλιόμετρα νοτιότερα και σε υψόμετρο 595 μ. βρίσκεται το Δ.Δ. Δολίχης. Σύμφωνα με τα στοιχεία της Ε.Σ.Υ.Ε. ο πληθυσμός του Δήμου Λιβαδίου φαίνεται στον Πίνακα 1. Ο μόνιμος πληθυσμός του Δ. Λιβαδίου μειώθηκε την τελευταία δεκαετία κατά 5,83% και κατά 14,19% την τελευταία εικοσαετία.

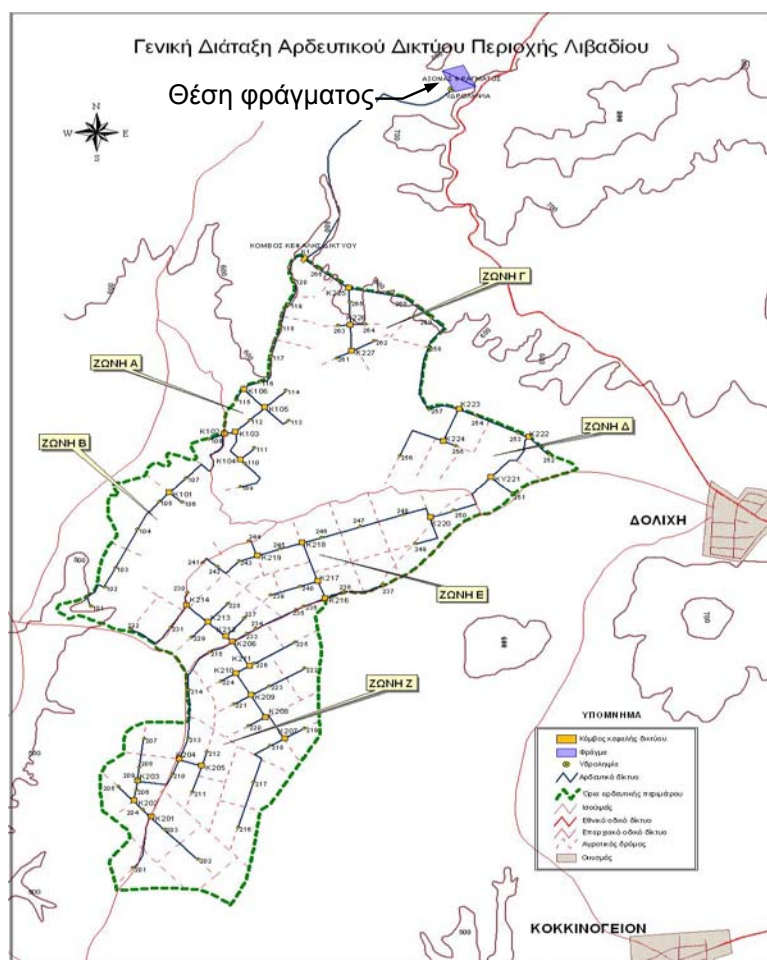
Πίνακας 1. Μεταβολή πληθυσμού Δ.Δ. Δήμου Λιβαδίου

Δημοτικά Διαμ/τα	Μόνιμος πληθυσμός			Μείωση (%) πληθυσμού 10ετίας	Μείωση (%) πληθυσμού 20ετίας
	1981	1991	2001		
Λιβάδι	3.160	2.882	2.714	-5,83	-14,11
Δολίχη	546	496	466	-6,05	-14,65
Σύνολο	3.706	3.378	3.180	-5,86	-14,19

Η μείωση αυτή οφείλεται καθαρά στην αδυναμία του ενεργού πληθυσμού να απασχοληθεί στις υπάρχουσες προβληματικές γεωργικές και κτηνοτροφικές εκμεταλλεύσεις, αφού η περιοχή είναι καθαρά αγροτική.

2.2. Εδαφολογικά στοιχεία.

Από την λεπτομερή προοδευτική χαρτογράφηση με τις παρατηρήσεις υπαίθρου χωρίς την μελέτη των εδαφοτομών στην φυσική τους κατάσταση (in vivo), προέκυψε μια πρώτη ταξινόμηση των εδαφών και η κατάταξή τους στις χαρτογραφικές μονάδες του εδαφολογικού χάρτη (Σχήμα 2), σύμφωνα με την SOIL TAXONOMY (Soil Survey Staff, 2003) [1]. Η τελειοποίηση του εδαφολογικού χάρτη θα πραγματοποιηθεί με την οριστικοποίηση και επιβεβαίωση των παρατηρήσεων υπαίθρου, με βάση τα δεδομένα που θα προκύψουν από τις εργαστηριακές αναλύσεις και προσδιορισμούς των δειγμάτων των εδαφοτομών.



Σχήμα 1. Αρδευτικό δίκτυο φράγματος Λιβαδίου

Τα εδάφη της περιοχής του Λιβαδίου, αναπτύχθηκαν σε αλλουβιακές και κολλουβιακές αποθέσεις και όπως φαίνεται στον εδαφολογικό χάρτη της περιοχής μελέτης το μεγαλύτερο μέρος αυτών ανήκει στην εδαφική τάξη των Entisols [2]. Η εδαφοτομή τους συνίσταται από μετρίως λεπτόκοκκο έως χονδρόκοκκο υλικό στον εδαφικό τύπο και χαλικώδη έως κροκαλώδη στο υπέδαφος και στο υπόστρωμα. Έχουν κλίσεις από ελαφρώς κεκλιμένη (2-6%) και σε πολλές περιπτώσεις στις λοφώδεις περιοχές με μεγαλύτερη κλίση από μετρίως έως ισχυρώς κεκλιμένη (6-18%). Από πλευράς γονιμότητας τα εδάφη χαρακτηρίζονται από μετρίως έως καλής γονιμότητας χωρίς να παρουσιάζεται ιδιαίτερο πρόβλημα στις καλλιέργειες.

Άλλο ένα μέρος ανήκει στην τάξη των Inceptisols, εδάφη μέτρια εξελιγμένα με μητρικό υλικό αλλουβιακής και κολλουβιακής προέλευσης. Η εδαφοτομή είναι διαφόρου κοκκομετρικής σύστασης με συχνότερες την πηλώδη και την αργιλοπηλώδη. Είναι γενικά πολύ γόνιμα εδάφη ιδιαίτερα στα επιφανειακά τους στρώματα και οποιαδήποτε καλλιέργεια προσαρμόζεται σε αυτά. Τέλος παρατηρήθηκε και η εδαφική τάξη των Alfisols. Τα εδάφη αυτά είναι τοποθετημένα σε παλαιά αλλουβιακή τράπεζα, λεπτότερης υφής. Είναι παραγωγικά εδάφη κάτω από ορισμένες συνθήκες.

2.3. Κλιματολογικά στοιχεία

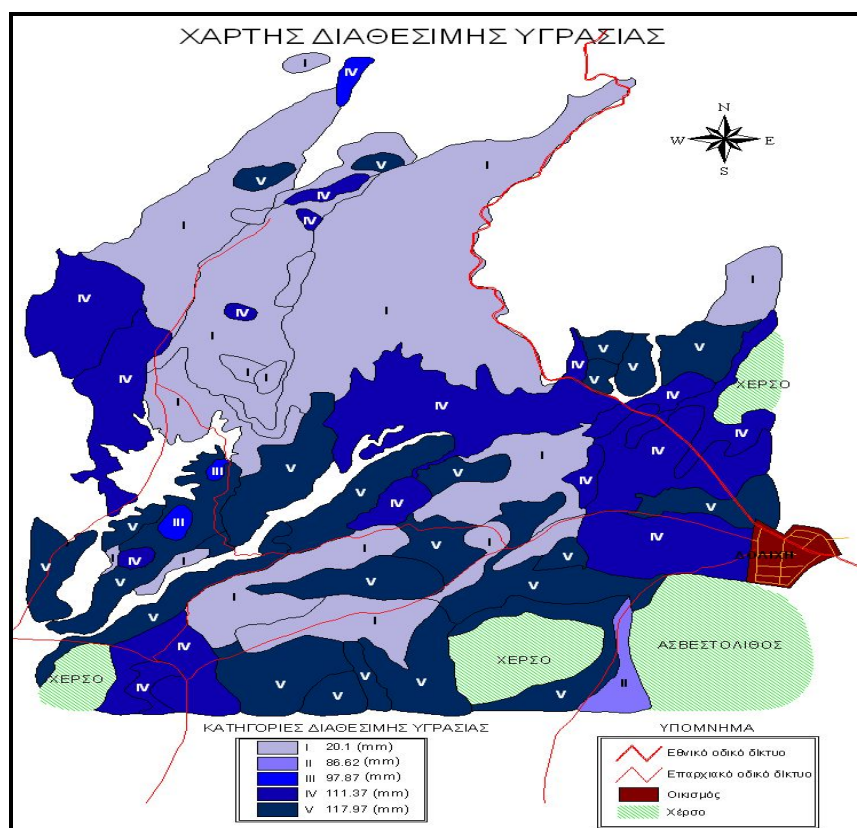
Η μέση θερμοκρασία της τελευταίας 20-ετίας των θερινών μηνών της περιοχής μελέτης από στοιχεία του μετεωρολογικού σταθμού Λιβαδίου, είναι 19,37 °C, ενώ των χειμερινών 2,99 °C. Ψυχρότερος μήνας είναι ο Ιανουάριος (2,42 °C) και θερμότερος ο Ιούλιος (20,86 °C). Η μέση ετήσια θερμοκρασία είναι 11,8 °C και το θερμομετρικό εύρος 18,5 °C. Οι βροχοπτώσεις παρουσιάζονται ομοιόμορφα κατανεμημένες σε σύγκριση με άλλες περιοχές της Ελλάδας. Η ετήσια βροχόπτωση ανέρχεται σε 468,03 mm και κατανέμεται κατά 25,54% την περίοδο Σεπτεμβρίου-Νοεμβρίου, 21,31% την περίοδο Δεκεμβρίου-Φεβρουαρίου, 47,76% την περίοδο Μαρτίου-Μαΐου και 35,15% την περίοδο Ιουνίου-Αυγούστου. Η ξηρή περίοδος του έτους αρχίζει ουσιαστικά από τον Απρίλιο και τελειώνει τον Οκτώβριο. Κατά την περίοδο Ιουνίου-Αυγούστου, που χαρακτηρίζεται ως υπέρξηρη, κρίνεται απαραίτητη η εφαρμογή αρδεύσεων για την ανάπτυξη των εαρινοφθινοπωρινών καλλιεργειών και μόνιμων φυτειών.

2.4. Κατανομή καλλιεργειών

Το μέσο ποσοστό των αρδευόμενων καλλιεργειών του Δ.Δ. Λιβαδίου, ανέρχεται σε 22,23% όπως φαίνεται στον Πίνακα 2. Το αντίστοιχο ποσοστό στο Δ.Δ Δολίχης ανέρχεται σε 33,63% και τούτο οφείλεται στην καλύτερη υδροφορία του ανατολικού τμήματος της περιοχής. Αυτός είναι καθαρά ο λόγος που η έλλειψη εγγειοβελτιωτικών έργων συνετέλεσε στην εγκατάλειψη της περιοχής από νέους ανθρώπους. Χαρακτηριστικό της περιοχής είναι η αναπτυσσόμενη κτηνοτροφία με σύγχρονες σταβλικές εγκαταστάσεις ηλεκτροδοτούμενες και συνδεδεμένες με το δίκτυο ύδρευσης. Το Δ.Δ. Λιβαδίου έχει 42.000 αιγοπρόβατα και 300 βοοειδή ελεύθερης βοσκής, αντίστοιχα η Δολίχη έχει 4.590 και 106 οικόσιτα βοοειδή.

Πίνακας 2: Ποσοστό αρδευόμενων καλλιεργειών σε στρέμματα κατά το έτος 2003.

Δημοτικά Διαμερίσματα	Σύνολο αρδευόμενων	Σύνολο μη αρδευόμενων	Σύνολο καλλιεργειών	Ποσοστό % αρδευόμενων
Λιβάδι	6.627	23.180	29.807	22,23
Δολίχη	2.075	4.075	6.170	33,63



Σχήμα 3. Χάρτης διαθέσιμης υγρασίας της περιοχής μελέτης

3. ΑΝΑΓΚΕΣ ΣΕ ΝΕΡΟ ΤΩΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ

Για τον ακριβή υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής των καλλιεργειών, χρησιμοποιούνται συνήθως πολύπλοκες εξισώσεις που απαιτούν τη χρήση πολλών κλιματικών παραμέτρων, όπως η μέθοδος FAO-56 Penman-Monteith [3]. Στις περισσότερες όμως περιπτώσεις, υπάρχει έλλειψη κλιματικών στοιχείων που υπαγορεύει τη χρήση απλούστερων μεθόδων, όπως η μέθοδος Blaney-Criddle με τους αντίστοιχους φυτικούς συντελεστές [4, 5, 6, 7, 8]. Επειδή στην περιοχή μελέτης δεν υπάρχουν διαθέσιμα μετεωρολογικά στοιχεία, πλην της μέσης θερμοκρασίας του αέρα και της βροχόπτωσης, οι ανάγκες των καλλιεργειών σε νερό υπολογίστηκαν με την μέθοδο Blaney-Criddle:

$$ET_o = p \cdot (0.457 \cdot T_{av} + 8.128)$$

(1)

όπου ET_o η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας αναφοράς σε mm ανά μήνα, T_{av} η μέση μηνιαία θερμοκρασία του αέρα σε ύψος 2m ($^{\circ}C$) και p το μέσο μηνιαίο ποσοστό ωρών ημέρας του έτους ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου.

Η εξατμισοδιαπνοή της κάθε καλλιέργειας (ET_c) υπολογίστηκε ως το γινόμενο της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας αναφοράς (ET_o) και του φυτικού συντελεστή (k_c). Ως φυτικοί συντελεστές χρησιμοποιήθηκαν οι φυτικοί συντελεστές της μεθόδου FAO-

56 Penman-Monteith [3], αφού προσαρμόστηκαν στη μέθοδο Blaney-Criddle για τις συνθήκες της περιοχής μελέτης και τα διάφορα στάδια ανάπτυξης των καλλιεργειών [8].

Από τη μηνιαία εξατμισοδιαπνοή των καλλιεργειών που προέκυπτε με την παραπάνω διαδικασία αφαιρούνταν η ωφέλιμη μηνιαία βροχόπτωση (P_e). Η ωφέλιμη βροχόπτωση του μήνα υπολογίζονταν με τη σχέση της Soil Conservation Service (1970):

$$P_e = f(D) / [1,25 P_i^{0,824} - 2,93] / 10^{0,000955 E T_c}$$

(2)

όπου P_e η ωφέλιμη βροχόπτωση του μήνα (mm), P_i η μέση μηνιαία ολική βροχόπτωση (mm), $E T_c$ η μέση μηνιαία εξατμισοδιαπνοή των καλλιεργειών (mm), $f(D)$ είναι ένας παράγοντας προσαρμογής που εκφράζει το επιτρεπόμενο ποσοστό υποβιβασμού της εδαφικής υγρασίας ισούται και υπολογίζεται με τη σχέση:

$$f(D) = 0,53 + 0,011D - 8,94 \times 10^{-5} D^2 + 2,32 \times 10^{-7} D^3$$

(3)

όπου D το βάθος του ριζοστρώματος των καλλιεργειών (mm).

Για τον υπολογισμό των αναγκών σε νερό των καλλιεργειών που δίνονται στον Πίνακα 3, χρησιμοποιήθηκαν τα μέσα μηνιαία κλιματικά δεδομένα μέσης θερμοκρασίας και βροχόπτωσης για το έτος 2003 του σταθμού Λιβαδίου.

Πίνακας 3. Ανάγκες σε νερό των καλλιεργειών της περιοχής μελέτης $\times 10^3 \text{ m}^3$

Δημοτικά Διαμ/ματα	Καπνός	Τεύτλα	Καλαμπόκι	Πατάτα	Μηδική	Δέντρα-Αμπέλια	Σύνολο
Λιβάδι	3,831	36,743	2.034,836	281,820	85,334	888,155	3.330,722
Δολίχη	223,945	166,061	229,997	0,561	256,003	234,173	1.110,743
Σύνολο	227,777	202,805	2.264,834	282,381	341,337	1.122,329	4.441,465

4. ΥΔΑΤΙΚΟΙ ΠΟΡΟΙ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Οι συνολικά διαθέσιμοι υδατικοί πόροι στο Δήμο Λιβαδίου υπολογίζονται σε $4,5 \times 10^6 \text{ m}^3$, ενώ η πραγματική κατανάλωση ανέρχεται σε $4,7 \times 10^6 \text{ m}^3$ ανά έτος όπως δείχνει ο Πίνακας 4. Η συμμετοχή του επιφανειακού νερού στο συνολικά καταναλισκόμενο νερό είναι πολύ μικρή. Αυτό σημαίνει ότι σχεδόν όλο το χρησιμοποιούμενο νερό, προέρχεται από τους υπόγειους υδροφορείς. Στην περιοχή μελέτης η υδροφορία είναι σχεδόν ανύπαρκτη και για τον λόγο αυτό οι υπάρχουσες γεωτρήσεις κατέστησαν ανενεργές. Στην περιοχή μελέτης, σε έκταση 5.000 στρεμμάτων (Σχήμα 1), οι επικρατούσες καλλιέργειες είναι μη αρδευόμενες. Από την καταγραφή των γεωτρήσεων και των δεδομένων (παροχές, βάθος άντλησης, αρδευόμενες καλλιέργειες κ.λπ.) που έγινε στην ευρύτερη περιοχή, έδειξε ότι, στο Δ.Δ. Λιβαδίου καταγράφηκαν 48 γεωτρήσεις, από τις οποίες οι 17 δίδουν παροχή $40 \text{ m}^3/\text{h}$ και οι υπόλοιπες κάτω των $30 \text{ m}^3/\text{h}$. Ενώ στο Δ.Δ. Δολίχης καταγράφηκαν 45 γεωτρήσεις, από τις οποίες οι 27 να δίδουν παροχή $40 \text{ m}^3/\text{h}$ και οι υπόλοιπες κάτω των $30 \text{ m}^3/\text{h}$, γεγονός που δείχνει την υπεροχή της υδροφορίας του Δ.Δ. Δολίχης έναντι του Δ.Δ. Λιβαδίου.

5. ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

Από το Υδατικό ισοζύγιο που έγινε στο Δήμο Λιβαδίου (Πίνακας 4), φαίνεται καθαρά ότι υπάρχει έλλειμμα νερού της τάξης του 12,81% στο Λιβάδι, ενώ η Δολίχη καλύπτει τις ανάγκες σε νερό των αρδευόμενων καλλιεργειών. Με την λειτουργία του φράγματος ανάλογα με το είδος των καλλιεργειών που θα επιλέξουν οι παραγωγοί

(Πίνακας 5) και το αρδευτικό σύστημα [9, 10, 11 12], θα αυξηθούν οι αρδευόμενες εκτάσεις κατά 4.000 στρέμματα συνολικά. Με την αύξηση των εκτάσεων των αρδευόμενων καλλιεργειών, θα καλυφθεί ταυτόχρονα το υπάρχον έλλειμμα σε ζωοτροφές, μια που η περιοχή είναι και κτηνοτροφική.

Πίνακας 4. Υδατικό ισοζύγιο του Δήμου Λιβαδίου για όλες τις χρήσεις $\times 10^3 \text{ m}^3$

Δ.Δ	Άρδευση	Υδρευση	Κτηνοτροφία	Σύνολο	
Λιβάδι	1.929,6	269,17	312,44	2.511,20	
Δόλιχη	2.102,4	38,27	53,02	2.193,69	
Σύνολο	4.032,0	307,47	365,46	4.704,90	
Διαθέσιμοι υδατικοί πόροι					
Δ.Δ	Γεωτρήσεις	Επιφανειακά. νερά	Σύνολο	Έλλειμμα %	
Λιβάδι	1.929,6	260,0	2.189,6	12,81	
Δόλιχη	2.313,6	-	2.313,6	0	
Σύνολο	4.243,2	260,0	4.503,2	4,3	

Από τα δεδομένα του εδαφολογικού χάρτη και από τους θεματικούς χάρτες (υδρομορφίας, κλίσεων, διάβρωσης, ανθρακικών κ.λ.π) που εξήχθησαν και λόγω χώρου δεν παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία, τα αποτελέσματα έδειξαν, ότι η λειτουργία του φράγματος θα συντελέσει στην μείωση του κόστους παραγωγής των παραγόμενων προϊόντων, αφού οι ήδη ανεπαρκώς αρδευόμενες εκτάσεις θα αυξήσουν την απόδοσή τους και οι επιπλέον αρδευόμενες εκτάσεις θα αυξήσουν το εισόδημα των γεωργών της περιοχής.

Πίνακας 5. Σενάρια δυνατότητας αρδευόμενων καλλιεργειών σε στρέμματα

Δημοτικά Διαμ/τα	Καπνός	Τεύτλα	Καλαμπόκι	Πατάτα	Μηδική	Δένδρα Αμπέλια	Κηπευτικά	Αμειγιστορά-Σιτηρά	Σύνολο
Α ΣΕΝΑ ΡΙΟ									
Λιβάδι	-	200	1700	170	300	200	70	860	
Δόλιχη	100	200	400	20	300	100	50	330	
Σύνολο	100	400	2100	190	600	300	120	1190	5000
$\times 10^3 \text{ m}^3$	42575,2	190675,3	960246	93295,7	300846	196784,8	58923,6	1807058	
Β ΣΕΝΑ ΡΙΟ									
Λιβάδι		100	2000	50	150	50	100	1050	
Δόλιχη		200	500	20	180	20	50	530	
Σύνολο		300	2500	70	330	70	150	1580	5000
$\times 10^3 \text{ m}^3$	0	143156,5	1143150	241110,5	165465,3	37402,4	73654,5	1803939	
Γ ΣΕΝΑ ΡΙΟ									
Λιβάδι		0	2500	50	300	0	0	1250	
Δόλιχη		0	800	0	300	0	0	965	
Σύνολο		0	3300	0	600	0	0	2215	5000

$\times 10^3 \text{ m}^3$	0	0	1508958	0	300846	0	0	1809804	
---------------------------	---	---	---------	---	--------	---	---	---------	--

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι μέσες ανάγκες σε νερό, εκτιμήθηκαν με τη βοήθεια των φυτικών συντελεστών των καλλιεργειών για τις ελληνικές συνθήκες και της ωφέλιμης βροχόπτωσης με την μέθοδο Blaney Griddle για το έτος 2003.

Έγινε καταγραφή των πηγών νερού (γεωτρήσεις και επιφανειακά νερά) και στα δύο Δ.Δ. του Δήμου Λιβαδίου. Με βάση τα στοιχεία της υφιστάμενης κατάστασης των υδατικών πόρων έγινε το υδατικό ισοζύγιο. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το υπάρχων έλλειμμα νερού είναι της τάξης του 12,81% στο Λιβιάδι, ενώ η Δολίχη καλύπτει τις ανάγκες σε νερό των αρδευόμενων καλλιεργειών.

Η λειτουργία του φράγματος θα αυξήσει κατά 8,77% τις αρδευόμενες εκτάσεις στο Λιβιάδι και κατά 18,64% στη Δολίχη. Από το χάρτη διαθέσιμης υγρασίας θα έχουν την δυνατότητα οι παραγωγοί να υπολογίσουν τη δόση, το εύρος και την διάρκεια άρδευσης ανάλογα με το αρδευτικό σύστημα που θα χρησιμοποιούν.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Keys to Soil Taxonomy by Soil Survey Staff . (1987), Third Printing, Cornell University.
2. ΙΧΤΕΛ, (2000). Εδαφολογική μελέτη Επαρχίας Ελασσόνας Ν. Λάρισας, Λάρισα.
3. 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.
4. Blaney, H. F. and Criddle, W. D., (1950). Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data. USDA, SCS, SCS-TP96, 48pp.
5. Αλεξίου, Ι., Κοτσόπουλος, Σ. Ι., Καρφούντζος, Δ. και Βύρλας, Π., (2000), Εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής μέσω συναρτήσεων διαθεσιμότητας της εδαφικής υγρασίας. Πρακτικά 8^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου ΕΥΕ, Αθήνα, 493 - 500.
6. Αλεξίου, Ι., Κοτσόπουλος, Σ. Ι., Καρφούντζος, Δ. και Βύρλας, Π., (2000), Σύγκριση υπολογισμένων τιμών δυναμικής εξατμισοδιαπνοής καλλιεργειών με τις εξισώσεις Penman και Penman-Monteith. Πρακτικά 2^{ου} Εθν. Συν. Γεωργικής Μηχανικής, Βόλος, 113 - 140.
7. Κοτσόπουλος, Σ. Ι., Αλεξίου, Ι., Καρφούντζος, Δ. και Βύρλας, Π., (1999), Σχέσεις νερού και παραγωγής βαμβακιού σε περιοχές της Θεσσαλίας. Πρακτικά 4^{ου} Εθνικού Συνεδρίου ΕΕΔΥΠ: Διαχείριση Υδατικών Πόρων στις Ευαίσθητες Περιοχές του Ελλαδικού Χώρου', Βόλος, 177-182.
8. Πανώρας, Α. Παπαζαφειρίου, Ε. και Πουλτσίδου, Θ., (2001). Υπολογισμός φυτικών συντελεστών για έξι μεθόδους εξατμισοδιαπνοής στο νότιο τμήμα της πεδιάδας Θεσσαλονίκης, Αγροτική Έρευνα, 24 (1): 37-45.
9. Kalfountzos D., Alexiou I., Magalios S.S. and Vyrlas P. (1998). Integrated water resources management using GIS: A Case study in TOEB Pinios. Proceeding of an International Conference. Protection and Restoration of the Environment IV Halkidiki, Macedonia Greece, Volume I, pp. 83-90.
10. Καρφούντζος Δ., Αλεξίου Ι., Μαγαλιός Σ., Βύρλας Π., και Τσιτσιπά Γ. (1999) "Εμπειρο σύστημα ολοκληρωμένης διαχείρισης Αρδευτικού νερού: Εδική εφαρμογή στον ΤΟΕΒ Πηγείου. 4ο Εθνικό Συνέδριο ΕΕΔΥΠ Βόλος, Πρακτικά Τεύχος Α' σελ. 20-27.

11. Ντιούδης Π., Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη Μ., Μασλάρης Ν., Νούσιος Γ., (2000). Διατάξεις άρδευσης με σταγόνες σε καλλιέργεια ζαχαροτεύλων. Πρακτικά 2^{ου} Εθνικού Συνεδρίου Γεωργικής Μηχανικής, Βόλος, 113 - 140.
12. Καλφούντζος, Δ., Αλεξίου, Ι., Κωτσόπουλος, Σ., Σούλιος Γ., Γκούμας Κ., Βύρας, Π., (2005), Διαχείριση υδατικών πόρων υδρολογικής λεκάνης του άνω ρού του ποταμού Ενιπέα Φαρσάλων. Πρακτικά 5^{ου} Εθνικού Συνεδρίου ΕΕΔΥΠ: 'Ολοκληρωμένη διαχείριση Υδατικών Πόρων με βάση τη λεκάνη απορροής', Ξάνθη, 97-103.

**ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΒΑΘΟΥΣ ΤΟΥ ΜΕΤΩΠΟΥ
ΔΙΑΒΡΟΧΗΣ ΥΠΟ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΠΗΓΗ
ΣΤΑΓΔΗΝ ΑΡΔΕΥΣΗΣ, ΛΑΜΒΑΝΟΝΤΑΣ ΥΠΟΨΗ ΤΗΝ
ΕΞΑΤΜΙΣΗ ΚΑΙ ΤΗ ΔΙΑΠΝΟΗ**

Νικόλαος Μαλάμος*, Σταμάτης Ελμαλόγλου*

* Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών - Εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής
Ιερά Οδός 75 - 11855, Αθήνα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η χρήση ενός μοντέλου επίπεδης συμμετρίας που λαμβάνει υπόψη την εξάτμιση και την μύζηση νερού από τις ρίζες των φυτών, στην ανάλυση της τοπικής διήθησης από επιφανειακή γραμμική πηγή στάγδην άρδευσης. Τα αριθμητικά αποτελέσματα αποτέλεσαν τη βάση για την ανάπτυξη και εφαρμογή μιας εμπειρικής μεθόδου προσδιορισμού του βάθους του μετώπου διαβροχής. Στην εφαρμογή του μαθηματικού μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν δύο από τις δώδεκα εδαφικές κλάσεις του USDA [15], με τέσσερις παροχές για κάθε μία. Η εμπειρική μέθοδος διαχωρίζει το φαινόμενο σε δύο φάσεις, το μήκος της κάθε μίας εξαρτάται από τη διάρκεια άρδευσης. Η εφαρμογή δύο απλών εξισώσεων, μιας συνάρτησης δύναμης και μιας πολυωνμικής με εξαρτημένη μεταβλητή το χρόνο, είχε πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα. Επίσης, υπολογίστηκαν και οι τιμές των συντελεστών των εξισώσεων, ανά κλάση, με βάση τα αντίστοιχα διαστήματα εμπιστοσύνης. Η συμφωνία μεταξύ των αριθμητικών και των εμπειρικών αποτελεσμάτων, δείχνει ότι ο συνδυασμός μιας συνάρτησης δύναμης και μιας πολυωνμικής εξίσωσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της κατακόρυφης κίνησης του μετώπου διαβροχής, με στόχο την αποφυγή απωλειών λόγω βαθείας κατείσδυσης.

**ESTIMATION OF THE WETTED SOIL VOLUME DEPTH,
UNDER A SURFACE TRICKLE LINE SOURCE,
CONSIDERING EVAPORATION AND WATER
EXTRACTION BY ROOTS**

Nikolaos Malamos*, Stamatīs Elmaloglou*

* Agricultural University of Athens - Laboratory of Agricultural Hydraulics
Iera Odos 75 - 11855, Athens

ABSTRACT

The use of a plane flow model that takes into account evaporation and water extraction by roots, in order to analyze local infiltration from a surface line source of trickle irrigation is presented. The numerical results were the base for the development and testing of an empirical method to determine the depth of the wetted soil volume. The implementation of the mathematical model took place against two of the twelve USDA soil classes [15] using four water application rates for each one. The empirical methodology separates the irrigation process in two phases; the length of each one depends on the duration of the irrigation. The application of two simple, time dependent empirical relationships, a power law for the stage of the infiltration and a polynomial for the stage after the end of the irrigation, had very satisfying results. Average class values of the empirical coefficients were introduced based on the corresponding confidence intervals. The agreement between the numerical results and the values calculated by the empirical relationships, show that the combined use of a power law and a polynomial empirical relationship could be used to calculate the vertical movement of the wetting front through the soil profile, in order to reduce the deep percolation losses.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων τριών δεκαετιών, πολυάριθμα μαθηματικά μοντέλα αναπτύχθηκαν για την ανάλυση της πολυδιάστατης μη μόνιμης διήθησης από πηγή στάγδην άρδευσης, χωρίς να λαμβάνουν υπόψη την πρόσληψη νερού από το ριζικό σύστημα των φυτών. Η εξίσωση ροής του νερού που περιγράφει το φυσικό μοντέλο είναι μη γραμμική και η επίλυσή της έχει επιτευχθεί μόνο με αριθμητικές μεθόδους [3], [1], [13], [18], [10], [4]. Για την αντίστοιχη γραμμικοποιημένη μορφή της εξίσωσης ροής έχουν αναπτυχθεί διάφορες αναλυτικές λύσεις [20], [11], [21], [2]. Όμως η εφαρμογή τους είναι περιορισμένη λόγω των διαφόρων υποθέσεων, όπως η ομοιόμορφη αρχική υγρασία, οι απλουστευμένες οριακές συνθήκες, το μηδενικό πάχος της κορεσμένης ζώνης διήθησης, η εκθετική σχέση μεταξύ του φορτίου πίεσης και της υδραυλικής αγωγιμότητας και τέλος η παραδοχή $dK/d\theta = k$, όπου k είναι μία σταθερά.

Σε αντίθεση με το σχετικά μεγάλο αριθμό των ανωτέρω μοντέλων, λίγες ερευνητικές προσπάθειες εστίασαν στην προσομοίωση της στάγδην άρδευσης, λαμβάνοντας υπόψη την πρόσληψη νερού από το ριζικό σύστημα των φυτών [22], [12], [6], [5].

Οι Schwartzman and Zur [17], πρότειναν μία μέθοδο προσδιορισμού της ισαποχής των σταλακτιών και της γεωμετρίας του διαβρεχόμενου εδαφικού όγκου κάτω από ένα σταλακτήρα. Οι Healy and Warrick [8], ανέπτυξαν μία τεχνική υπολογισμού των χρονικά μεταβαλλόμενων ορίων του μετώπου διαβροχής από σημειακή επιφανειακή πηγή στάγδην άρδευσης. Οι Zazueta et al. [23], πρότειναν μία εναλλακτική μέθοδο προσδιορισμού της κινητικής του εδαφικού νερού, η οποία βασιζόταν σε μία απλή εξίσωση.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται μία εμπειρική μέθοδος υπολογισμού της κατακόρυφης συνιστώσας του μετώπου διαβροχής κάτω από επιφανειακή γραμμική πηγή στάγδην άρδευσης. Η επαλήθευση της εμπειρικής μεθόδου βασίστηκε στην αριθμητική επίλυση ενός μαθηματικού μοντέλου ροής επίπεδης συμμετρίας, που λαμβάνει υπόψη την μύζηση των ριζών και την εξάτμιση από την επιφάνεια του εδάφους. Η εφαρμογή της μεθόδου έγινε σε δύο από τις δώδεκα εδαφικές κλάσεις του USDA [15], με τέσσερις παροχές για κάθε μία.

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Υδροδυναμικά χαρακτηριστικά των εδαφών

Με στόχο την όσο το δυνατόν πιο γενική αντιμετώπιση επιλέξαμε δύο από τις δώδεκα εδαφικές κοκκομετρικές κλάσεις του United States Department of Agriculture (USDA) και χρησιμοποιήσαμε τις αντίστοιχες τιμές των παραμέτρων υπολογισμού της χαρακτηριστικής καμπύλης υγρασίας (Εξ. 1) και της μεταβολής της υδραυλικής αγωγιμότητας (Εξ. 2) [19]:

$$\theta(H) = \theta_r + \mathbf{Error!}, m = 1 - 1/n \quad (1)$$

$$K(Se) = K_s Se^{0.5} (1 - [1 - Se^{n/(n-1)}]^m)^2, Se = \mathbf{Error!}, m = 1 - 1/n \quad (2)$$

όπου: K_s είναι η υδραυλική αγωγιμότητα στον κορεσμό, a είναι παράμετρος προσαρμογής (cm^{-1}) και n είναι επίσης μία παράμετρος προσαρμογής (αδιάστατη).

Οι κοκκομετρικές κλάσεις επιλέχθηκαν με κριτήρια την ποικιλία των υδροδυναμικών χαρακτηριστικών τους και την γεωργική τους χρησιμότητα, και από την πιο χονδρόκοκη προς την πιο λεπτόκοκη ήταν:

- Πηλοαμμώδες έδαφος (Loamy Sand)
- Ιλυώδες έδαφος (Silt)

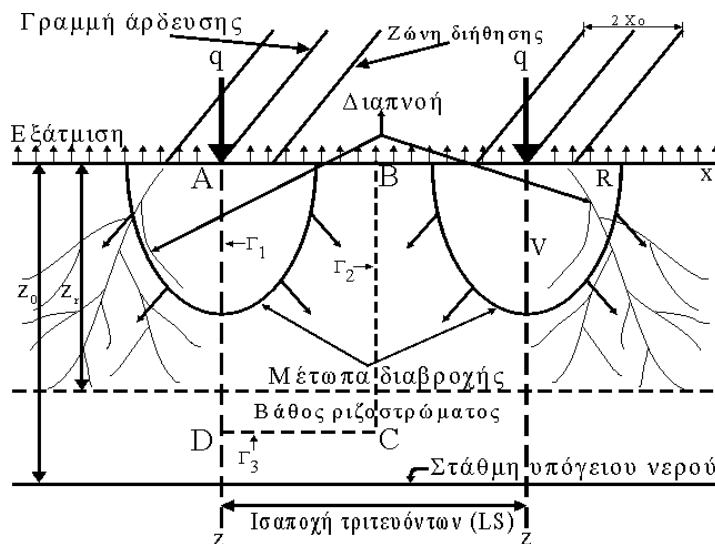
Οι τιμές των παραμέτρων που περιέχονται στις αναλυτικές εκφράσεις των σχέσεων $\Theta(H)$ και $K(S_e)$ (Εξ. 1 και 2) και συνοψίζονται στον Πίνακα 4, έχουν παρουσιαστεί σε αρκετές ερευνητικές εργασίες [15], [16], διασφαλίζοντάς μας για την ακρίβειά τους.

Πίνακας 4: Τιμές των παραμέτρων των Εξ. (1) και (2)

Έδαφος	α (cm^{-1})	n	Θ_s ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	Θ_r ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	K_s (cm h^{-1})
Πηλοαμμώδες (Loamy Sand)	0.03475	1.74582	0.390	0.049	4.3832
Ιλυώδες (Silt)	0.00658	1.67880	0.489	0.050	1.8230

Το φυσικό μοντέλο

Στο Σχήμα 9 παρουσιάζεται σε τρεις διαστάσεις το φυσικό πρόβλημα, στην περίπτωση φυτοκαλυμμένου εδάφους.



Σχήμα 9: Σχηματική παράσταση της περιοχής στην οποία εξετάζουμε την τρισδιάστατη διήθηση με επίπεδη συμμετρία, στην περίπτωση φυτοκαλυμμένου εδάφους.

Πρόκειται για ένα ομοιογενές έδαφος, το οποίο υπέρκειται μιας οριζόντιας αδιαπέρατης στρώσης, η οποία βρίσκεται σε μεγάλο βάθος. Στην επιφάνεια του εδάφους εφαρμόζεται διήθηση με σταθερή παροχή από σταλακτήρες στη σειρά σε οριζόντια λωρίδα πλάτους $2 \cdot x_0$. Η επίπεδη συμμετρία της ροής μας επιτρέπει να εξετάσουμε το φυσικό πρόβλημα πάνω σε ένα από τα άπειρα κατακόρυφα επίπεδα,

(κάθετα προς το μήκος της λωρίδας εδάφους) και που ορίζονται από τους άξονες x και z αντίστοιχα.

Σκοπός μας είναι ο προσδιορισμός σε κάθε χρονική στιγμή t των κατατομών της εδαφικής υγρασίας $\Theta(x, z, t)$.

Το μαθηματικό μοντέλο

Το φυσικό πρόβλημα περιγράφεται από την εξίσωση ροής:

$$F(U) \text{ Error!} = \text{Error!} + \text{Error!} - G(U) \text{ Error!} - S(H, z) \quad (3)$$

όπου οι συντελεστές $F(U)$ και $G(U)$ είναι ίσοι με :

$$F(U) = \text{Error!}, \quad G(U) = \text{Error!} \quad (4)$$

με:

$$U(H) = \text{Error!} \quad (5)$$

όπου: x, z είναι οι καρτεσιανές συντεταγμένες (L), H είναι το φορτίο πίεσης (L), K είναι η υδραυλική αγωγιμότητα ($L T^{-1}$), Θ είναι η κατ' όγκο εδαφική υγρασία ($L^3 L^{-3}$), t είναι ο χρόνος από την αρχή της διήθησης (T), S είναι ένας κατανεμημένος όρος «πηγάδι», ο οποίος αντιπροσωπεύει την μύζηση νερού από τις ρίζες των φυτών ($L^3 L^{-3} T^{-1}$), με τον άξονα των z να θεωρείται θετικός προς τα κάτω.

Αρχικές και οριακές συνθήκες

Η στάθμη του υπόγειου νερού βρίσκεται σε μεγάλο βάθος z_0 , τέτοιο που στην περιοχή ABCD να έχουμε μια ομοιόμορφη υγρασία που εξασφαλίζεται με μια σταθερή ταχύτητα βροχόπτωσης:

$$q_i = K(H_i) \quad (6)$$

Η αρχική συνθήκη είναι:

$$U(x, z, t = 0) = U_i \quad (7)$$

η οποία αντιστοιχεί σε ομοιόμορφη αρχική τιμή εδαφικής υγρασίας, Θ_i , δηλαδή:

$$\Theta(x, z, t = 0) = \Theta_i, \quad H(x, z, t = 0) = H_i \quad (8)$$

Η συνθήκη στο κάτω και στο δεξιό όριο της περιοχής ροής ορίζεται με τέτοιο τρόπο ώστε η περιοχή διακριτοποίησης να περιορίζεται σε εκείνη μόνο την περιοχή του εδάφους που η μεταβλητή U μεταβάλλεται σε σχέση με τον χρόνο. Η περιοχή διακριτοποίησης αυξάνεται βαθμηδόν με τον χρόνο όσο το μέτωπο διαβροχής προχωράει έτσι ώστε αυτή να περικλείεται πάντα μέσα στο ABCD (Σχήμα 9).

Η οριακή συνθήκη στο κινητό όριο της περιοχής ροής Γ_3 (Σχήμα 9), είναι:

$$\text{Για } t > 0, \quad z_r \leq z = z(t) < z_0, \quad 0 < x < \text{Error!}, \quad U = U_i \quad (9)$$

όπου: $x(t), z(t)$ είναι οι συντεταγμένες των κινητών ορίων και LS είναι η ισαποχή των τριτευόντων.

Οι οριακές συνθήκες στα σταθερά γεωμετρικά όρια της περιοχής ροής, θα είναι:

a. Στο επίπεδο συμμετρίας Γ_2 ($x = LS/2$), έχουμε συνθήκη μηδενικής ροής, δηλαδή:

$$\text{Για } t > 0, \quad q_x = -\text{Error!} = 0, \quad 0 \leq z \leq z(t) \quad (10)$$

b. Στο επίπεδο συμμετρίας Γ_1 ($x = 0$), επίσης έχουμε συνθήκη μηδενικής ροής, δηλαδή:

$$\text{Για } t > 0, \quad q_x = - \text{Error!} = 0, 0 \leq z \leq z(t) \quad (11)$$

c. Στην επιφάνεια του εδάφους ($z = 0$) η τοπική διήθηση, όπως την έχουμε ορίσει, χαρακτηρίζεται κυρίως από το μικρό μέγεθος της αρχικής ζώνης διήθησης. Για την πλειονότητα των πρακτικών εφαρμογών, είναι ρεαλιστικό να υποθέσουμε ότι η κατανομή της ειδικής παροχής (ταχύτητας του Darcy) διαμέσου αυτής της ζώνης διήθησης είναι ομοιόμορφη. Θέτουμε λοιπόν εκ των προτέρων:

$$q_0 = \text{Error!} - E_a \text{ για } t > 0, z = 0 \text{ και } 0 < x < x_0 \quad (12)$$

όπου: q είναι η παροχή του σταλακτήρα, E_a είναι ο ρυθμός πραγματικής εξάτμισης (LT^{-1}) και $S_0 = 2 \cdot x_0$.

Ο ρυθμός πραγματικής εξάτμισης, E_a , ορίζεται από μία εκθετική σχέση της μορφής:

$$E_a = E_p e^{\delta H} \quad (13)$$

όπου: E_p είναι ο ρυθμός δυναμικής εξάτμισης (LT^{-1}), H είναι το φορτίο πίεσης (L) και δ είναι ένας συντελεστής αναλογικότητας (L^{-1}). Η Εξ. (13) υποδηλώνει ότι η μείωση του φορτίου πίεσης στην επιφάνεια του εδάφους, ακολουθείται από εκθετική μείωση του ρυθμού πραγματικής εξάτμισης.

Γενικά, η αρχική ειδική παροχή q_0 είναι πολύ μεγαλύτερη από την K_s , όπου K_s είναι η υδραυλική αγωγιμότητα στον κορεσμό (LT^{-1}). Κατά συνέπεια, έχουμε γρήγορο κορεσμό της ζώνης διήθησης. Έτσι, δημιουργείται μια λεπτή στρώση νερού που επεκτείνεται συμμετρικά, γύρω από τον άξονα της ζώνης διήθησης, εφόσον η επιφάνεια του εδάφους είναι οριζόντια.

Σύμφωνα με την ανάλυση που προηγήθηκε, θεωρούμε δυο φάσεις. Κατά την πρώτη, στην οποία ισχύει $t < t_1$, όπου t_1 είναι ο χρόνος κατά τον οποίο η αρχική ζώνη διήθησης γίνεται κορεσμένη, απουσία βροχόπτωσης ή εξάτμισης, η συνθήκη είναι:

$$q_z = - \text{Error!} - E_a \text{ για } 0 \leq x \leq x_0 \quad (14)$$

$$q_z = - \text{Error!} - E_a \text{ για } x_0 < x \leq LS/2 \quad (15)$$

Κατά τη δεύτερη, στην οποία ισχύει $t \geq t_1$, η ζώνη διήθησης είναι κορεσμένη. Υποθέτοντας ότι το πάχος της στρώσης του νερού είναι αμελητέο, η οριακή συνθήκη γράφεται:

$$H = 0 \text{ για } 0 \leq x \leq x_s(t) \quad (16)$$

$$q_z = - E_a \text{ για } x > x_s(t) \quad (17)$$

όπου: $x_s(t)$ ορίζεται ως το ήμισυ της ζώνης διήθησης.

Στην πρώτη φάση ($t < t_1$), η διατήρηση του ισοζυγίου της μάζας διαμέσου της επιφάνειας του εδάφους εξασφαλίζεται με τις συνθήκες του Neuman (Εξ. 14, 15).

Μετά τον κορεσμό της ζώνης διήθησης ($t \geq t_1$), η συνθήκη του Dirichlet (Εξ. 16) δεν επιτρέπει να εξασφαλίσουμε την διατήρηση του ισοζυγίου της μάζας, και είναι αναγκαίο να επιβάλλουμε μια νέα συνθήκη η οποία δίνει έμμεσα το μέγεθος της ζώνης διήθησης $x_s(t)$ σε όλες τις στιγμές:

$$q = 2 \text{ Error!} \quad (18)$$

Εφαρμογή του αριθμητικού μοντέλου

Για την αριθμητική επίλυση της εξίσωσης ροής, χρησιμοποιήσαμε την πεπλεγμένη μέθοδο εναλλασσομένων διευθύνσεων (Alternating Direction Implicit Method - A.D.I.). Η μέθοδος αυτή απαιτεί τη συμπλήρωση δυο βημάτων χρόνου για ένα πλήρη κύκλο εφαρμογής [4], [14].

Η μύζηση του εδαφικού νερού από τις ρίζες των φυτών εκφράζεται από έναν καταναεμημένο όρο «πηγάδι», S , ο οποίος εξαρτάται μόνο από το φορτίο πίεσης, H , και τον μέγιστο ρυθμό μύζησης, S_{\max} , ως εξής [9]:

$$S = \alpha(H) \cdot S_{\max}(z) \quad (19)$$

Το S_{\max} μεταβάλλεται με το βάθος και κατά τη διάρκεια της ημέρας, ως εξής:

$$S_{\max}(z) = \gamma(a - b|z|) \text{ για } z \leq z_r \quad (20)$$

όπου: $a = 0.018 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3} \text{ d}^{-1}$ και $b = 0.0002 \text{ cm}^{-3} \text{ d}^{-1}$ και z_r σε cm, είναι το βάθος του ριζοστρώματος, ίσο με 80 cm. Ο συντελεστής γ τέθηκε ίσος με 1.00 κατά την διάρκεια της ημέρας, ενώ κατά την διάρκεια της νύκτας τέθηκε ίσος με 0.20.

Οι τιμές των χαρακτηριστικών φορτίων πίεσης που υπεισέρχονται στον υπολογισμό του συντελεστή μείωσης, α , ήταν $H_1 = -10$ cm, $H_2 = -25$ cm, $H_3 = -300$ cm και $H_4 = -2000$ cm και για τα δύο εδάφη.

Συνήθως το φορτίο πίεσης, H_4 , λαμβάνεται ίσο με το σημείο μάρανσης, αλλά επιλέχθηκαν οι συγκεκριμένες τιμές, επειδή σε μικρότερες τιμές από αυτές, η υδραυλική αγωγιμότητα σχεδόν μηδενίζεται.

Εμπειρικές σχέσεις προσδιορισμού της κίνησης του μετώπου διαβροχής

Μετά από προσεκτική ανάλυση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι η κατακόρυφη κίνηση του νερού στο εδαφικό προφίλ μπορεί να εκφραστεί από τη συνάρτηση δύναμης:

$$V = d_v t^{c_v} \quad (21)$$

στην οποία c_v και d_v είναι εμπειρικές παράμετροι εξαρτώμενοι από τα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά του εδάφους και τον ρυθμό εφαρμογής του νερού, ενώ t είναι ο χρόνος από την έναρξη της άρδευσης, σε ώρες.

Η διάρκεια της άρδευσης, t_i , σε ώρες, είναι ο χρόνος που απαιτείται για να εφαρμοστεί η επιθυμητή ποσότητα νερού. Η κατακόρυφη κίνηση του νερού στον χρόνο t_i , είναι V_i , οπότε:

$$V_i = d_v t_i^{c_v} \quad (22)$$

Επίσης, λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι η φυσική του φαινομένου δεν επιτρέπει την συνεχή επέκταση του μετώπου διαβροχής με τον ίδιο ρυθμό και μετά το τέλος της άρδευσης, εισάγουμε μια πολωνυμική σχέση που περιγράφει την κατακόρυφη προώθηση του μετώπου διαβροχής κάτω από τους σταλακτήρες, για χρόνους μεγαλύτερους από t_i :

$$V - V_i = A (t - t_i)^{1/2} + B (t - t_i) + C (t - t_i)^{3/2} \quad (23)$$

όπου: A , B και C είναι εμπειρικοί συντελεστές, επίσης εξαρτώμενοι από τα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά του εδάφους και από τον ρυθμό εφαρμογής του νερού.

Οι τιμές των παραμέτρων των Εξ. (22) και (23) προσδιορίζονται αριθμητικά, με χρήση γραμμικής παλινδρόμησης, με βάση τα αποτελέσματα του αριθμητικού μοντέλου.

Κριτήρια αξιολόγησης των εμπειρικών σχέσεων προσδιορισμού της κίνησης του μετώπου διαβροχής

Η αξιολόγηση των τιμών που προέκυψαν από την εφαρμογή των Εξ. (22) και (23) έγινε με τη χρήση του συντελεστή προσδιορισμού R^2 .

Επιπλέον, η αβεβαιότητα των τιμών των συντελεστών είναι ένα πολύ χρήσιμο μέτρο εκτίμησης της ποιότητας των αποτελεσμάτων της εμπειρικής μεθόδου. Ένας τρόπος να επιτευχθεί αυτό, είναι να υπολογιστούν τα διαστήματα εμπιστοσύνης για τον καθένα, με στατιστική μεθοδολογία, η οποία βασίζεται σε τεχνικές παλινδρόμησης [7]. Αυτή η μεθοδολογία αποτελείται από ένα t -τεστ για διάστημα εμπιστοσύνης 96% με $n-2$ βαθμούς ελευθερίας για την Εξ. (22) και $n-3$ βαθμούς ελευθερίας για την Εξ. (23).

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ

Η προσομοίωση έγινε για κάθε ένα από τα δύο εδάφη, για περίοδο 24 ωρών και συνολική ποσότητα νερού 30 L m^{-1} . Η κλίμακα των παροχών που χρησιμοποιήθηκαν ήταν $q = 1.5, 2.0, 3.0, 4.0 \text{ L m}^{-1} \text{ h}^{-1}$ και προφανώς η διάρκεια της άρδευσης για κάθε έδαφος ήταν $t_i = 20.0, 15.0, 10.0$ και 7.5 ώρες, αντίστοιχα.

Σε κάθε περίπτωση, η σταθερότητα και η σύγκλιση της αριθμητικής λύσης ήταν πολύ ικανοποιητική, εξασφαλίζοντας με αυτό τον τρόπο την ποιότητα των αριθμητικών αποτελεσμάτων [4].

Στον Πίνακα 5, παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων της Εξ. (22), αριθμητικά προσδιορισμένες, με χρήση γραμμικής παλινδρόμησης, μαζί με τα διαστήματα εμπιστοσύνης. Επίσης, παρουσιάζονται και οι συντελεστές προσδιορισμού R^2 , που προέκυψαν από τη χρήση των μέσων τιμών των παραμέτρων c_v .

Πίνακας 5: Τιμές των παραμέτρων c_v , d_v , με τα διαστήματα εμπιστοσύνης και τις αντίστοιχες μέσες τιμές για τα c_v , και αντίστοιχοι συντελεστές προσδιορισμού R^2

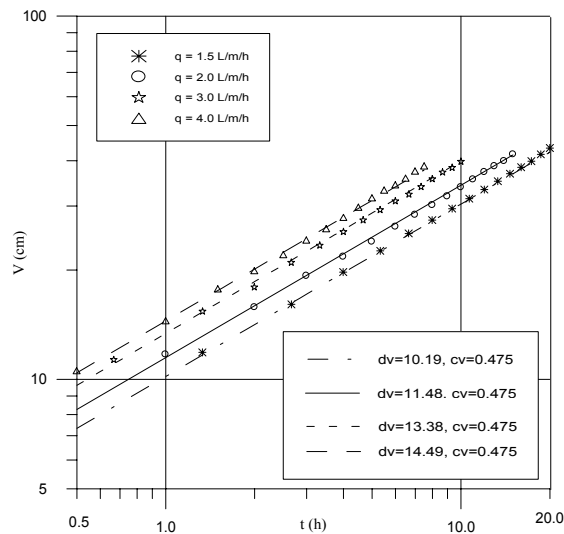
Έδαφος	Παροχή ($L m^{-1} h^{-1}$)	$V = d_v t^{c_v}$					R^2
		c_v	c_v	t_{cv}	d_v	t_{dv}	
Πηλοαμμώδες (Loamy Sand)	1.5	0.475	0.479	0.006	10.19	1.01	0.998
	2		0.470	0.009	11.48	1.02	0.998
	3		0.468	0.010	13.38	1.02	0.998
	4		0.481	0.010	14.49	1.01	0.996
Ιλύδες (Silt)	1.5	0.465	0.467	0.006	11.52	1.01	0.999
	2		0.465	0.003	12.57	1.01	1.000
	3		0.467	0.005	14.09	1.01	0.999
	4		0.459	0.006	15.56	1.01	0.999

Σκοπός μας είναι, εκτός από τον υπολογισμό των παραμέτρων της Εξ. (22) για κάθε μία από τις τέσσερις παροχές, για τα δύο εδάφη, να υπολογιστούν τιμές των παραμέτρων, οι οποίες να χαρακτηρίζουν τις αντίστοιχες εδαφικές κλάσεις. Για να το πετύχουμε αυτό χρησιμοποιήσαμε τις μέσες τιμές των παραμέτρων c_v (Πίνακας 5). Από τις τιμές των διαστημάτων εμπιστοσύνης t , για την κάθε παροχή, είναι προφανές ότι η χρήση των μέσων τιμών για την παράμετρο c_v , είναι στατιστικώς αποδεκτή. Οι τιμές του συντελεστή προσδιορισμού R^2 , κυμαίνονται από 0.996 έως 1.000, υποδηλώνοντας ότι η Εξ. (22) προσεγγίζει την κατακόρυφη συνιστώσα του μετώπου διαβροχής με μεγάλη ακρίβεια.

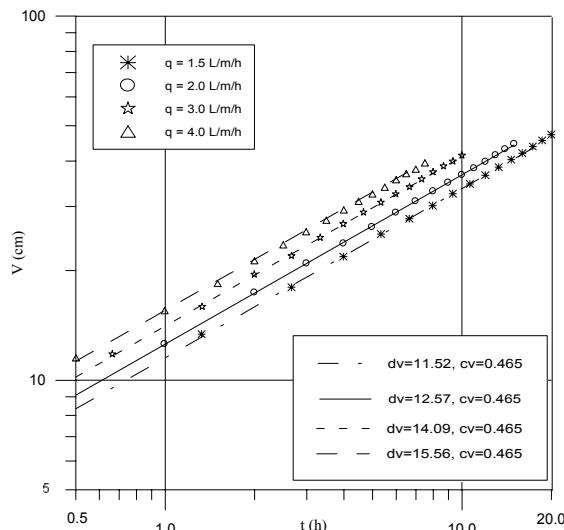
Στα Σχήματα 10, 11 παρουσιάζεται η κατακόρυφη προώθηση του μετώπου διαβροχής, V , στον άξονα $x = 0$, με τον χρόνο και για τα δύο εδάφη, κάτω από διάφορους ρυθμούς εφαρμογής του νερού, πριν το τέλος της άρδευσης και η προσέγγισή της (Εξ. 22) με χρήση των μέσων τιμών της παραμέτρου c_v .

Συγκρίνοντας τις τιμές της παραμέτρου c_v με τις τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας στον κορεσμό, K_s , για το καθένα από τα υπό μελέτη εδάφη, διαπιστώνουμε ότι υπάρχει μία σαφής συσχέτιση μεταξύ τους, διότι η μείωση της K_s από το ηλοαμμώδες έδαφος (Loamy Sand) προς το ιλύδες (Silt), ακολουθείται από αντίστοιχη μείωση της παραμέτρου c_v .

Επιπροσθέτως, η παράμετρος d_v , μεταβάλλεται ανάλογα με την παροχή, q , μιας και αύξηση της παροχής από $1.5 L m^{-1} h^{-1}$ σε $4.0 L m^{-1} h^{-1}$ και στα δύο εδάφη, ακολουθείται από ανάλογη αύξηση της τιμής της.



Σχήμα 10: Κατακόρυφη προώθηση του νερού με το χρόνο, πριν το τέλος της άρδευσης, για πηλοαμμώδες έδαφος (Loamy Sand)



Σχήμα 11: Κατακόρυφη προώθηση του νερού με το χρόνο, πριν το τέλος της άρδευσης, για ιλύδες έδαφος (Silt)

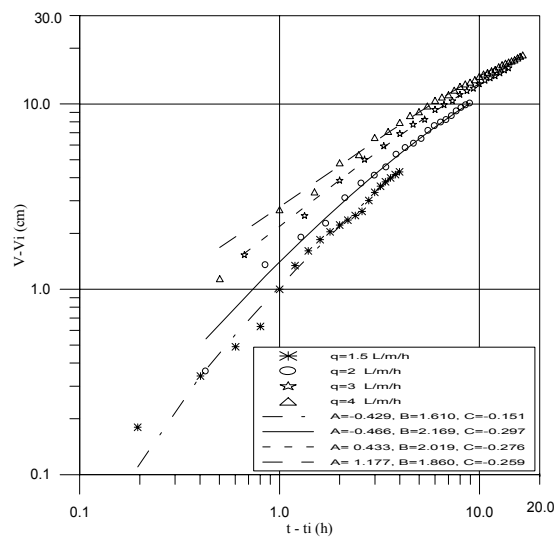
Για την περιγραφή της κατακόρυφης επέκτασης του μετώπου διαβροχής κατά την διάρκεια της δεύτερης φάσης, η οποία αρχίζει με το τέλος της άρδευσης (Σχήματα 12, 13), χρησιμοποιούμε την πολυωνμική Εξ. (23), όπως αυτή παρουσιάστηκε προηγουμένως. Στον Πίνακα 6, παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων της Εξ. (23), αριθμητικά προσδιορισμένες, με χρήση γραμμικής παλινδρόμησης, μαζί με τους αντίστοιχους συντελεστές προσδιορισμού R^2 . Από τις τιμές του R^2 , οι οποίες

κυμαίνονται από 0.995 έως 1.000 προκύπτει ότι η κατακόρυφη συνιστώσα του μετώπου διαβροχής, μετά το τέλος της άρδευσης, μπορεί να προσεγγιστεί σε μεγάλο βαθμό από ένα πολυώνυμο αυτής της μορφής.

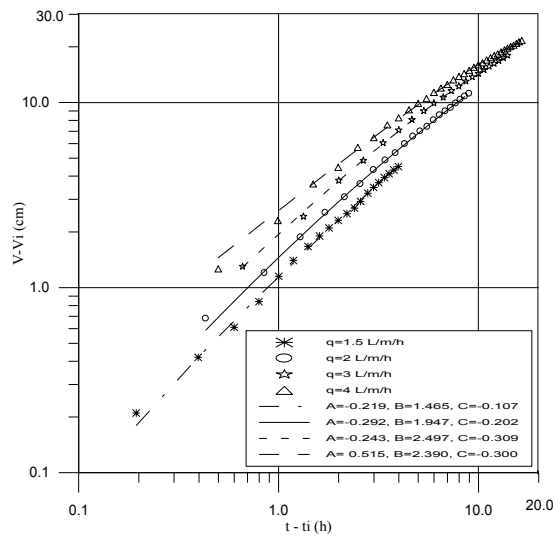
Πίνακας 6: Τιμές των παραμέτρων A , B και C με τα αντίστοιχα διαστήματα εμπιστοσύνης και τους αντίστοιχους συντελεστές R^2

Έδαφος	Παροχή ($L\ m^{-1}h^{-1}$)	$V - V_i = A(t - t_i)^{1/2} + B(t - t_i) + C(t - t_i)^{3/2}$						R^2
		A	t_A	B	t_B	C	t_C	
Πηλοαμμώδες (Loamy Sand)	1.5	-0.429	0.529	1.610	0.747	-0.151	0.255	0.995
	2	-0.466	0.389	2.169	0.366	-0.297	0.084	0.999
	3	0.443	0.358	2.019	0.270	-0.276	0.049	0.999
	4	1.177	0.378	1.860	0.264	-0.259	0.045	0.998
Ιλυώδες (Silt)	1.5	-0.219	0.224	1.465	0.317	-0.107	0.109	0.999
	2	-0.292	0.179	1.947	0.169	-0.202	0.038	1.000
	3	-0.243	0.180	2.497	0.136	-0.309	0.025	1.000
	4	0.515	0.237	2.390	0.166	-0.300	0.028	0.999

Στα Σχήματα 12, 13 παρουσιάζεται η κατακόρυφη προώθηση του μετώπου διαβροχής, V , στον άξονα $x = 0$, με τον χρόνο και για τα δύο εδάφη, για τους ίδιους ρυθμούς εφαρμογής του νερού, μετά το τέλος της άρδευσης και η προσέγγισή της (Εξ. 23).



Σχήμα 12: Κατακόρυφη προώθηση του νερού με το χρόνο, μετά το τέλος της άρδευσης, για ηλοαμμώδες έδαφος (Loamy Sand)



Σχήμα 13: Κατακόρυφη προώθηση του νερού με το χρόνο, μετά το τέλος της άρδευσης, για ιλυώδες έδαφος (Silt)

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο σχεδιασμός των συστημάτων άρδευσης με σταγόνες έχει ως σκοπό τη συντηρητική χρήση του υδατικών αποθεμάτων ελαχιστοποιώντας τις απώλειες λόγω εξάτμισης και κατείδυσης. Για να μειωθεί η απώλεια νερού κάτω από το ριζόστρωμα, πρέπει να επιλέξουμε το βέλτιστο ρυθμό εφαρμογής του νερού, συναρτήσει της κατάλληλης διάρκειας άρδευσης, του βάθους ριζοστρώματος και του υδατικού ισοζυγίου.

Ο στόχος της παρούσης εργασίας ήταν η όσον το δυνατόν πληρέστερη διαδιάστατη προσομοίωση του συστήματος έδαφος - φυτό - ατμόσφαιρα και η χρήση των αριθμητικών αποτελεσμάτων για την ανάπτυξη μιας εμπειρικής μεθοδολογίας ακριβούς προσδιορισμού της κατακόρυφης συνιστώσας του μετώπου διαβροχής. Η ανάπτυξη μιας τέτοιας μεθοδολογίας έχει πρακτικό ενδιαφέρον, διότι η εκτίμηση της κατακόρυφης κίνησης του μετώπου διαβροχής κάτω από γραμμική πηγή, λαμβάνοντας υπόψη την εξάτμιση από την εδαφική επιφάνεια και την μύζηση του νερού από τις ρίζες των φυτών, απαιτεί σύνθετα προσδιοριστικά - ντετερμινιστικά μοντέλα προσομοίωσης, που απαιτούν μεγάλο όγκο δεδομένων και υψηλή επιστημονική στάθμη των χρηστών για την εφαρμογή τους.

Τα αριθμητικά αποτελέσματα σχεδόν συνέπεσαν με αυτά της προτεινόμενης μεθόδου, αποδεικνύοντας ότι η εμπειρική μέθοδος μπορεί να αποτελέσει ένα χρήσιμο εργαλείο στην πρόβλεψη του βάθους του μετώπου διαβροχής, συμβάλλοντας στη μείωση των απωλειών νερού κάτω από το ριζόστρωμα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Ababou R. 1981. Modélisation des transferts hydriques dans un sol en infiltration localisée. *Thèse de Docteur Ingénieur*, Université de Grenoble.

2. Ben-Asher J., Lomen D.O. and Warrick A.W., 1978. Linear and nonlinear models of infiltration from a point source. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42: 3-6.
3. Brandt A., Bresler E., Diner N., Ben-Asher J., Heller J. and Goldberg D. 1971. Infiltration from a trickle source, I. Mathematical models. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 35: 675-682.
4. Elmaloglou S. and Grigorakis G. 1997. Linear and nonlinear models of infiltration from surface line source of trickle irrigation. *ICID Journal* 46 (2): 81-92.
5. Elmaloglou S. and Malamos N. 2003. A method to estimate soil-water movement under a trickle surface line source, with water extraction by roots. *Irrig. and Drain.* 52: 273-284.
6. Ghali G.S. and Svehlik Z.J. 1988. Soil-water dynamics and optimum operating regime in trickle-irrigation fields. *Agric. Water Manage.* 13: 127-143.
7. Chapra C.S. and Canale P.R. 2002. Numerical methods for engineers: with software and programming applications, 4th ed. New York: McGraw-Hill.
8. Healy R.W. and Warrick A.W. 1988. A generalized solution to infiltration from a surface point source. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52: 1245-1251.
9. Hoogland J.C., Feddes R.A., Belmans C. 1981. Root water uptake model depending on a soil water pressure head and maximum extraction rate. *Acta Horti.* 119: 123-136.
10. Lafolie F., Guennelon R. and van Genuchten M.Th. 1989. Analysis of water flow under trickle irrigation: I. Theory and numerical solution. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53: 1310-1318.
11. Lomen D.O. and Warrick A.W. 1974. Time-Dependent linearized infiltration (II: line Source). *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 38: 568-572.
12. Oron G. 1981. Simulation of water flow in the soil under sub-surface trickle irrigation with water uptake by roots. *Agric. Water Manage.* 3: 179-193.
13. Ragab R., Feyen J. and Hillel D. 1984. Simulating infiltration in sand from a trickle line source using the matrix flux potential concept. *Soil Sci.* 137: 120-127.
14. Remson I., Hornberger G.M. and Molz F.D. 1971. Numerical Methods in Subsurface Hydrology. New York: John Wiley.
15. Schaap M.G. and Leij L.J. 1998. Database-related accuracy and uncertainty of pedotransfer functions. *Soil Sci.* 163: 765-779.
16. Schaap M.G., Leij L.J. and Van Genuchten M.Th. 1998. Neural network analysis for hierarchical prediction of soil hydraulic properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62: 847-855.
17. Schwartzman M. and Zur B. 1986. Emitter spacing and geometry of the wetted soil volume. *J.Irrig.and Drain. Engrg. ASCE* 112(3): 242-253.
18. Taghavi S.A., Marino M.A. and Rolston D.E. 1984. Infiltration from a trickle irrigation source. *J.Irrig. and Drain. Engrg. ASCE* 110 (2): 331-341.
19. Van Genuchten M.Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Am. J.* 44: 892-898.

20. Warrick A.W. 1974. Time-Dependent linearized infiltration (I: Point Sources). *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 38: 383-387.
21. Warrick A.W. and Lomen D.O. 1976. Time-Dependent linearized infiltration, (III: Strip and disc sources). *Soil Sci. Soc. Am. J.* 40: 639-643.
22. Warrick A.W., Amoozegard-Fard A. and Lomen D.O. 1979. Linearized moisture flow from line source with water extraction. *Trans. ASAE* 22 (3): 549-553.
23. Zazueta F.S., Clark G.A. , Smajstrla A.G. and Carrilo M.1995. A simple equation to estimate soil-water movement from a drip irrigation source. Proceedings of the fifth International Microirrigation Congress April 2-6, Florida p.p.851-856.

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ ΕΠΑΡΚΕΙΑΣ
ΣΥΛΛΟΓΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΥΠΟ ΠΙΕΣΗ –
ΠΙΛΟΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΔΙΚΤΥΟ
ΤΟΥ ΠΗΝΕΙΟΥ ΗΛΕΙΑΣ**

Αικ.Γκαγκάκη, Ν.Δέρκας, Γ.Καραντούνιας

Εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής
Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στα πλαίσια αυτής της εργασίας παρουσιάζεται συνοπτικά η μεθοδολογία ανάλυσης της υδραυλικής επάρκειας των αρδευτικών δικτύων υπό πίεση, η οποία επιτρέπει τη συνολική εκτίμηση της ανταπόκρισης των δικτύων στη ζήτηση, καθώς και τον εντοπισμό των υποδιαστασιολογημένων αγωγών και των υδροστομίων που παρουσιάζουν ανεπαρκή πίεση. Κατόπιν, γίνεται πιλοτική εφαρμογή της προαναφερθείσης μεθοδολογίας στο συλλογικό αρδευτικό δίκτυο Α2 του Πηνειού Ηλείας και προτείνονται μέτρα, προκειμένου να ανταποκριθεί το δίκτυο σε ικανοποιητικό βαθμό στη ζήτηση.

**HYDRAULIC PERFORMANCE ANALYSIS OF
COLLECTIVE PRESSURE IRRIGATION NETWORKS
– PILOT CASE STUDY IN PINIOS-ILIA NETWORK**

Aik.Gagaki, N.Dercas, G.Karantounias

Laboratory of Agricultural Hydraulics
Agricultural University of Athens, 75 Iera Odos, 11855 Athens

ABSTRACT

In this article the methodology of collective irrigation networks performance analysis is briefly presented. This methodology allows to evaluate the behavior of the networks as well as to locate the hydrants with restricted pressure head and the pipeline with increased friction losses during the peak period. In addition a case study is presented concerning the hydraulic analysis and performance evaluation of A2 Savalia pressure collective network of Pinios Iliia. Finally proposals are made concerning the measures that will allow to obtain a better satisfaction of the water demand.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα ελληνικά εγγειοβελτιωτικά δίκτυα παρουσιάζουν σημαντικά προβλήματα που οφείλονται τόσο σε λάθη στην μελέτη και στη κατασκευή όσο και σε κακή διαχείριση. Τα αίτια αυτά οδηγούν σε σημαντική υποβάθμισή τους και σε μια συνεχή φθίνουσα πορεία τους, με αποτέλεσμα προϊόντος του χρόνου να αδυνατούν να εξυπηρετήσουν τους χρήστες. Εάν δεν ληφθούν μέτρα, αναμένεται με βεβαιότητα η καταστροφή τους με ό,τι αυτό συνεπάγεται για την ελληνική οικονομία και κοινωνία. Τα περισσότερα δίκτυα είναι πεπαλαιωμένα και χρήζουν ανάταξης και εκσυγχρονισμού. Η δυσοίωνα αυτή κατάσταση έδωσε το ερέθισμα για την προσπάθεια διερεύνησης-ανάλυσης του εγγειοβελτιωτικού έργου του Πηνειού του Ν.Ηλείας και ιδιαίτερα του συλλογικού αρδευτικού δικτύου Α2 Σαββαλίων, στο οποίο έχει ήδη γίνει προσπάθεια ανάταξης-εκσυγχρονισμού (*SCP-Υδροσύστημα, 1997*).

Προκειμένου να εντοπιστούν τα προβλήματα και να υπάρξει σφαιρική εκτίμηση της κατάστασης, απαιτείται κατ'αρχάς να γίνει απογραφή των καλλιεργειών που απαντώνται στην περίμετρο του δικτύου, καθώς και της συνολικής έκτασης που καταλαμβάνουν, με στόχο την εκτίμηση των αναγκών άρδευσης (Doorenbos and Pruiitt 1977, Smith 1989). Η χαρτογράφηση των διαφόρων χρήσεων γης που υπάρχουν στην περιοχή μελέτης είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί με χρήση είτε αεροφωτογραφιών είτε δορυφορικών εικόνων. Η επιβλεπόμενη ταξινόμηση δορυφορικών εικόνων αποτελεί μία από τις ευρύτερα διαδεδομένες εφαρμογές της τηλεπισκόπησης με αξιόπιστα αποτελέσματα. Οι διάφορες καλλιέργειες αναγνωρίζονται βάσει του ιδιαίτερου τρόπου με τον οποίο απορροφούν και ανακλούν την ακτινοβολία. Επιπρόσθετα, για την ανάλυση των δικτύων είναι αναγκαίο να καταγραφούν τα υδροστόμια που λειτουργούν και τα αγροτεμάχια που αρδεύονται, με σκοπό να ελεγχθεί η υδραυλική επάρκειά τους μέσω της χρήσης ομοιωμάτων.

Στην παρούσα μελέτη παρουσιάζεται η μεθοδολογία προσομοίωσης της υδραυλικής συμπεριφοράς αρδευτικού δικτύου υπό πίεση με ελεύθερη ζήτηση (*Lamaddalena 1997, Lamaddalena and Sagardoy 2000, Δέρκας 2001, Δέρκας και Καραντούνιας 2003*) που εφαρμόζεται για πρώτη φορά στην Ελλάδα. Έγινε πιλοτική εφαρμογή μαθηματικής προσομοίωσης και ανάλυσης σε ένα από τα αρδευτικά δίκτυα του Πηνειού Ηλείας (Α2 Σαββαλίων). Με επιτόπιες επισκέψεις συνελέγησαν συμπληρωματικά στοιχεία για τις καλλιέργειες, πέραν αυτών που καταγράφηκαν με την επιβλεπόμενη ταξινόμηση δορυφορικών εικόνων, τα αρδευτικά συστήματα που χρησιμοποιούνται, την κατάσταση των υδροστομίων και του αντλιοστασίου.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΥΠΟ ΠΙΕΣΗ

Με τον όρο ανάλυση ενός αρδευτικού δικτύου που βρίσκεται σε λειτουργία, εννοούμε τη διαδικασία εύρεσης των δυνατοτήτων του μέσω ενός μοντέλου προσομοίωσης, προκειμένου να μελετηθούν τα προβλήματα που παρουσιάζει (π.χ ποιά υδροστόμια παρουσιάζουν ανεπάρκειες πίεσης/παροχής, ποιό αγωγοί είναι υποδιαστασιολογημένοι) και να προβλεφθούν οι κατάλληλες ενισχύσεις (CTGREF 1979, Béthery et al 1981, CEMAGREF 1990, 1991, Δέρκας, 2001, Δέρκας και Καραντούνιας 2003).

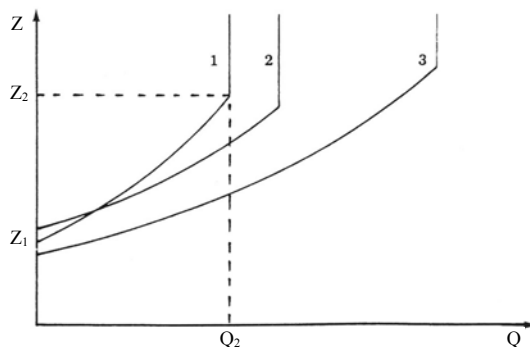
Ο προσδιορισμός των κρίσιμων τμημάτων ενός δικτύου είναι πολύ σημαντικός, καθώς επιτρέπει να εντοπιστούν τα προβλήματα και να εκτιμηθεί το μέγεθός τους.

2.1 Προσδιορισμός των Πραγματικών Χαρακτηριστικών Καμπύλων

Για να αναλυθεί ένα δίκτυο θα πρέπει να προσδιοριστούν οι Χαρακτηριστικές Καμπύλες του, $Z=f(Q)$, προκειμένου να είναι δυνατόν άμεσα να προσδιορίζεται το φορτίο που πρέπει να είναι διαθέσιμο στην κεφαλή, ώστε να ικανοποιηθεί μια ζήτηση Q_0 που θα παρουσιαστεί στην κεφαλή (Δέρκας, 2001, Δέρκας και Καραντούνιας 2003).

Η Χαρακτηριστική Καμπύλη (Χ.Κ) ενός αγωγού μεταφοράς (αναγκαίο φορτίο στην κεφαλή συναρτήσει της παροχής, $Z=f(Q)$) είναι εύκολο να προσδιοριστεί. Αντίθετα ο προσδιορισμός των πραγματικών χαρακτηριστικών καμπύλων ενός δικτύου είναι πολύπλοκη διαδικασία, καθώς εξαρτάται από τα υδροστόμια που έχουν ανοίξει (τον αριθμό τους, την ονομαστική παροχή τους και τη θέση τους).

Ας υποθέσουμε ότι σε ένα δίκτυο ανοίγει ένας αριθμός υδροστομίων. Για να αρχίσει να υπάρχει παροχέτευση νερού, θα πρέπει το φορτίο στην κεφαλή του δικτύου να είναι μεγαλύτερο από το γεωμετρικό ύψος του χαμηλότερου υδροστομίου Z_1 προσαυξημένο κατά τις απώλειες φορτίου μέχρι το συγκεκριμένο υδροστόμιο. Το μέγεθος Z_1 λοιπόν είναι καθορισμένο και είναι το αρχικό σημείο της χαρακτηριστικής καμπύλης $Z=f(Q)$ του δικτύου για το συγκεκριμένο συνδυασμό ανοικτών υδροστομίων (Καμπύλη 1, Σχήμα 1).



Σχήμα 14. Χαρακτηριστικές καμπύλες δικτύου για διάφορους συνδυασμούς ανοικτών υδροστομίων

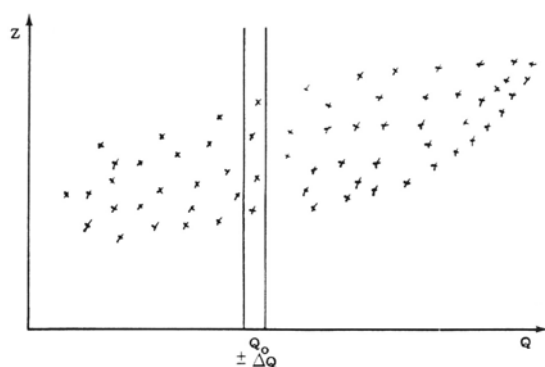
Αυξάνοντας το φορτίο στην κεφαλή, η παροχή του προαναφερθέντος υδροστομίου θα αρχίσει να αυξάνει και θα αρχίσουν να παροχετεύουν νερό και άλλα υδροστόμια. Με την αύξηση του φορτίου στην κεφαλή, η παροχή των υδροστομίων θα αρχίσει να αυξάνει μέχρι του σημείου όπου θα επιτευχθεί στο ένα μετά το άλλο υδροστόμιο η ονομαστική παροχή και θα επέμβουν οι περιοριστές παροχής. Η μεγαλύτερη λοιπόν παροχή (για συγκεκριμένο συνδυασμό ανοικτών υδροστομίων) είναι Q_2 (Σχήμα 1) όπου όλα τα ανοικτά υδροστόμια λειτουργούν με την ονομαστική παροχή τους. Το αντίστοιχο πιεζομετρικό φορτίο στην κεφαλή του δικτύου είναι Z_2 , ίσο με το γεωμετρικό ύψος του πιο δυσμενώς υδραυλικά υδροστομίου, προσαυξημένου κατά την απαραίτητη πίεση λειτουργίας και τις απώλειες φορτίου.

Εάν το φορτίο στην κεφαλή του δικτύου αυξηθεί πέραν του Z_2 , η παροχή θα παραμείνει Q_2 (μέσα στα πλαίσια ακρίβειας λειτουργίας των περιοριστών παροχής), διότι θα έχουν επέμβει σε όλα τα υδροστόμια οι περιοριστές παροχής και δεν θα επιτρέπουν να αυξηθεί η παροχή πέραν της ονομαστικής τιμής της.

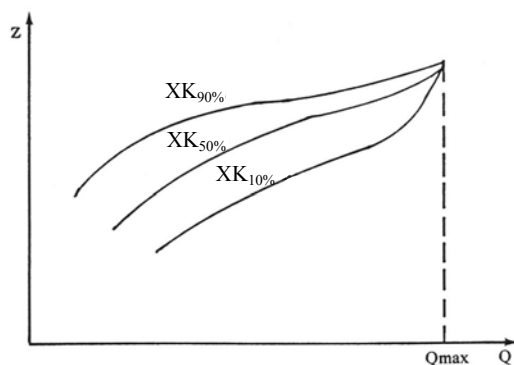
Η επιτευχθείσα καμπύλη (1) (Σχήμα 1) είναι η χαρακτηριστική καμπύλη του δικτύου για τον προαναφερθέντα συνδυασμό ανοικτών υδροστομίων. Εάν ο συνδυασμός των ανοικτών υδροστομίων είναι διαφορετικός, θα επιτευχθεί μια άλλη χαρακτηριστική καμπύλη (Καμπύλη 2 ή Καμπύλη 3, Σχήμα 1). Γίνεται φανερό ότι οι χαρακτηριστικές καμπύλες για το συγκεκριμένο δίκτυο θα είναι τόσες, όσες οι συνδυασμοί των ανοικτών υδροστομίων. Στο σύνολο αυτό των χαρακτηριστικών καμπύλων του δικτύου θα πρέπει να γίνει στατιστική επεξεργασία προκειμένου να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για το δίκτυο.

2.2 Χαρακτηριστικές Καμπύλες με δείκτες

Από τις προαναφερθείσες πραγματικές Χ.Κ. χρησιμοποιούνται μόνο τα τελικά σημεία (Z_2, Q_2) που παρουσιάζονται στο διάγραμμα $Z=f(Q)$ (Σχήμα 2) υπό μορφή ενός σμήνους σημείων, τα οποία μπορούν να αναλυθούν με τις μεθόδους της στατιστικής.



Σχήμα 2. Ακραία σημεία (Z_2, Q_2) των πραγματικών χαρακτηριστικών του δικτύου



Σχήμα 3. Χαρακτηριστικές καμπύλες με δείκτες ($ΧΚ_{i\%}$)

Είναι λοιπόν δυνατόν για μια δεδομένη παροχή Q_0 στην κεφαλή του δικτύου να υπολογιστούν τα φορτία που επιτρέπουν την ικανοποίηση του 75%, 90% κ.λ.π των συνδυασμών ανοικτών υδροστομίων που την προκαλούν.

Έτσι προκύπτουν οι χαρακτηριστικές με δείκτες σε ποσοστό (%) ικανοποίησης συνδυασμών ανοικτών υδροστομιών που θα ονομάζονταν απλώς “χαρακτηριστικές με δείκτες ΧΚ_ν%” (Σχήμα 3). Οι δείκτες εκφράζουν το ποσοστό (%) συνδυασμών ανοικτών υδροστομιών χωρίς προβλήματα λειτουργίας για κάθε παροχή στην κεφαλή του δικτύου. Το διάγραμμα με τις χαρακτηριστικές καμπύλες με δείκτες επιτρέπει να εκτιμάται σε ποιο βαθμό το έργο κεφαλής παρέχει ικανοποίηση της ζήτησης για διάφορες παροχές (από 0 → Q_{max}) στην κεφαλή. Πρόκειται για ένα πολύτιμο εργαλείο παρά το γεγονός ότι για την κατασκευή του χρησιμοποιήθηκαν μόνο τα ακραία σημεία (Z₂, Q₂) των πραγματικών χαρακτηριστικών του δικτύου. Επισημαίνεται ότι η προσέγγιση αυτή είναι πολύ συντηρητική-προσεκτική, διότι κάθε συνδυασμός ανοικτών υδροστομιών, όπου έστω και ένα υδροστόμιο παρουσιάζει μικρό πρόβλημα, θεωρείται ανεπιτυχής καθώς το φορτίο στην κεφαλή δεν είναι ικανό να εξασφαλίσει τη σωστή λειτουργία όλων των συγκεκριμένων υδροστομιών.

2.3 Εντοπισμός προβληματικών υδροστομιών και υποδιαστασιοποιημένων αγωγών

Για τον σκοπό αυτό πραγματοποιούνται προσομοιώσεις της λειτουργίας του δικτύου, στο οποίο προσδιορίζονται διάφορες καταστάσεις ανοικτών-κλειστών υδροστομιών και εκτιμάται η λειτουργική κατάσταση των υδροστομιών (επάρκεια φορτίου πίεσης), όπως επίσης και η λειτουργική επάρκεια των αγωγών (Béthery 1990, CEMAGREF 1991, Lamaddalena and Sagardoy 2000, Δέρκας 2001, Δέρκας και Καραντούνιας 2003). Μετά από ένα σημαντικό αριθμό προσομοιώσεων γίνεται αξιολόγηση των αποτελεσμάτων σε επίπεδο πλέον κάθε υδροστομίου και κάθε αγωγού. Όσον αφορά τα υδροστόμια, εκτιμάται το φορτίο πίεσης και συγκρίνεται με το ελάχιστο αναγκαίο φορτίο. Όσον αφορά τους αγωγούς, γίνεται εκτίμηση των γραμμικών απωλειών στις διάφορες προσομοιώσεις. Καθώς οι τιμές των απωλειών αυξάνονται, οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι ο αγωγός βρίσκεται σε φάση κορεσμού και απαιτείται να γίνει μελλοντική ενίσχυση. (CTGREF 1979, CEMAGREF 1990, Δέρκας 2001, Δέρκας και Καραντούνιας 2003).

Σε κάθε προσομοίωση που πραγματοποιείται (r), το υδροστόμιο (j) θεωρείται ικανοποιημένο, όταν ισχύει η ακόλουθη σχέση:

$$H_{j,r} \geq H_{\min}$$

όπου H_{j,r} [m] το φορτίο του υδροστομίου j στην r προσομοίωση και H_{min} το ελάχιστο απαιτούμενο φορτίο.

Η σχετική απόκλιση από το κανονικό φορτίο πίεσης κάθε υδροστομίου ισούται με:

$$\Delta H_{j,r} = \frac{H_{j,r} - H_{\min}}{H_{\min}}$$

3. ΠΙΛΟΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ

3.1 Παρουσίαση του δικτύου

Το δίκτυο που αναλύθηκε είναι το Α2 που διαχειρίζεται ο Τοπικός Οργανισμός Εγγείων Βελτιώσεων (ΤΟΕΒ Σαββαλίων, Ν.Ηλείας). Πρόκειται για ένα δίκτυο υπό πίεση που διαθέτει 291 υδροληψίες. Η εξοπλισμένη έκτασή του είναι περίπου 8.500 στρ. Η καταγραφή των καλλιεργειών αγροτεμάχιο προς αγροτεμάχιο, που έγινε από τους συγγραφείς του άρθρου, έδειξε ότι το ~90% είναι αρδευόμενη έκταση (52,7% επί της συνολικής έκτασης αραβόσιτος, 10,7% καρπούζια, 4,6% πατάτες, 4,9% κηπευτικά, κυρίως τομάτες και πιπεριές, 7,5% ελιές, 4,4% εσπεριδοειδή, 4,2% βοσκότοποι και

χορτολιβαδικά, 1,3% μηδική) και το υπόλοιπο 10% είναι μη αρδευόμενη έκταση (κυρίως σιτηρά) και μη καλλιεργούμενοι αγροί. Η ειδική συνεχής παροχή εκτιμήθηκε σε $q=0,075\text{L/sec/στρ.}$, λαμβάνοντας υπόψη 20% απώλειες εφαρμογής στον αγρό και 10% απώλειες μεταφοράς στο δίκτυο.

Το δίκτυο είχε κατασκευαστεί να λειτουργεί με ελεύθερη ζήτηση, με πίεση 4 bars και παροχή 6L/sec. Το αντλιοστάσιο έχει δύο βοηθητικές αντλίες με ονομαστική παροχή $100\text{m}^3/\text{h}$ και πέντε κύριες με $\sim 665\text{m}^3/\text{h}$ η κάθε μία.

Δεν υπάρχει ρύθμιση κατάντη της διώρυγας που τροφοδοτεί το αντλιοστάσιο, με αποτέλεσμα την περίοδο εκτός αιχμής, όταν στο δίκτυο η κατανάλωση είναι μικρή, για να μειωθούν οι απώλειες νερού προς την θάλασσα, να σταματά η τροφοδοσία της διώρυγας σε νερό κατά τις νυχτερινές ώρες και το αντλιοστάσιο να βγαίνει εκτός λειτουργίας. Κατά τη διάρκεια της νύκτας, το δίκτυο αδειάζει μερικώς (υπάρχουν συνήθως υδροστόμια που μένουν ανοικτά) και το επόμενο πρωί γίνεται εσπευσμένη πλήρωση του δικτύου, με αποτέλεσμα να συμβαίνουν υδραυλικά πλήγματα που καταπονούν το δίκτυο.

Επειδή το δίκτυο παρουσίαζε προβλήματα έγινε το 2003 ανάταξη και εκσυγχρονισμός του βάσει προηγηθείσας μελέτης (SCP-Υδροσύστημα, 1997): αλλαγή στροφείων και κινητήρων στις αντλίες προκειμένου να αυξηθεί η πίεση, αντικατάσταση των υδροληπιών, προσθήκη οργάνων λειτουργίας και ρύθμισης (βάννες, αντιπληγματικές βαλβίδες κ.τ.λ), διαφοροποίηση της εγκατεστημένης παροχής στα υδροστόμια ανάλογα με την αρδευόμενη έκταση. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονιστεί ότι κατά την εφαρμογή της μελέτης ανάταξης-εκσυγχρονισμού, καταργήθηκαν 28 υδροληπίες και τοποθετήθηκαν επιπρόσθετα 82 νέες υδροληπίες, πέραν αυτών που υπήρχαν στην μελέτη (SCP-Υδροσύστημα, 1997).

Το υπόγειο δίκτυο αποτελείται από αγωγούς των οποίων οι διάμετροι κυμαίνονται από $\Phi 100$ έως $\Phi 800$ mm. Ειδικότερα υπάρχουν πλαστικοί σωλήνες διαμέτρων $\Phi 90$, $\Phi 140$ και $\Phi 160$, σωλήνες αμιάντου διαμέτρων $\Phi 200$ και $\Phi 300$, και τέλος χαλυβδοσωλήνες έως $\Phi 800$. Κατά την ανάταξη-εκσυγχρονισμό δεν έγινε αντικατάσταση των αγωγών του δικτύου (τουλάχιστον στο βαθμό που ήταν αναγκαίο) με αποτέλεσμα πολλές υδροληπίες να τοποθετηθούν πάνω σε υπόγειους αγωγούς που είναι σε πολύ άσχημη κατάσταση και να παρατηρούνται συχνές θραύσεις και απώλειες νερού. Επίσης πολλές υδροληπίες ετέθησαν εκτός λειτουργίας μέσα στους πρώτους μήνες επαναλειτουργίας του δικτύου. Το γεγονός αυτό, σύμφωνα με τους υπεύθυνους διαχείρισης του δικτύου, οφείλεται σε προβλήματα ποιότητας υλικού όπως και σε ξένα υλικά (χαλίκια) που μπήκαν στο δίκτυο κατά τη φάση εγκατάστασης των νέων υδροληπιών και προκάλεσαν στη συνέχεια εμπλοκές στους μηχανισμούς τους.

Προκειμένου να υπάρξει καλύτερη ενημέρωση για την υφιστάμενη κατάσταση του δικτύου, πραγματοποιήθηκαν συναντήσεις με τους αρμόδιους στη Νομαρχία Ηλείας, στον Τ.Ο.Ε.Β (Τοπικό Οργανισμό Εγγείων Βελτιώσεων Σαββαλίων) και στον Γ.Ο.Ε.Β (Γενικό Οργανισμό Εγγείων Βελτιώσεων Αλφειού-Πηνειού, Ν.Ηλείας), καθώς και με αγρότες. Συμπληρωματικά στοιχεία συνελέγησαν με επιτόπιες επισκέψεις, στόχος των οποίων ήταν η ενημέρωση για την κατάσταση του αντλιοστασίου, η συλλογή δεδομένων για τις αντλίες, καθώς και για την παροχή και την πίεση στην έξοδο του αντλιοστασίου.

3.2 Ανάλυση του δικτύου

Το δίκτυο αναλύθηκε όπως αυτό τροποποιήθηκε κατά την ανάταξη-εκσυγχρονισμό που έγινε το 2003. Το όλο έργο βασίστηκε στη μελέτη της Γαλλοελληνικής Κοινοπραξίας SCP-Υδροσύστημα (SCP-Υδροσύστημα 1997), η οποία όμως, όπως προαναφέρθηκε,

τροποποιήθηκε κατά τη φάση υλοποίησης της ανακατασκευής του δικτύου με κατάργηση υπαρχουσών υδροληψιών και προσθήκη νέων. Στην πράξη επίσης οι παραγωγοί έχουν αφαιρέσει τους περιοριστές παροχής και ρυθμιστές πίεσης, προκειμένου να χρησιμοποιούν τη μέθοδο άρδευσης με βαρύτητα που συνηθίζεται στην περιοχή.

Το δίκτυο σχεδιάστηκε ως δίκτυο καταιονισμού μέσης πίεσης, γεγονός το οποίο απαγορεύει τη χρήση κανονιών και καρουλιών, συστήματα τα οποία είναι προσφιλή στους παραγωγούς, ιδιαίτερα σε εκείνους που έχουν μεγάλες καλλιέργειες (π.χ αραβόσιτο, ο οποίος είναι και η επικρατούσα καλλιέργεια της περιοχής). Οι παραγωγοί, μην μπορώντας να χρησιμοποιήσουν αυτά τα συστήματα, αφαιρούν τους περιοριστές παροχής και τους ρυθμιστές πίεσης, γεγονός το οποίο όμως οδηγεί σε κατάρρευση του συστήματος και σε αισθητή πτώση της πίεσης στην κεφαλή του δικτύου. Χαρακτηριστικό είναι ότι το αντλιοστάσιο λειτουργεί στραγγαλισμένο (πίεση ανάντη της δικλείδας στραγγαλισμού: 5,5 bars και πίεση μετά τη δικλείδα 1,5 bars) όταν η παροχή στην κεφαλή είναι 1000L/sec.

Γίνεται φανερό ότι το δίκτυο είναι τελείως εκτός των προδιαγραφών με τις οποίες έχει μελετηθεί και η κατάσταση είναι εκτός ελέγχου. Στόχος της ανάλυσης δεν ήταν να προσδιορισθεί πού υπάρχει πρόβλημα στο δίκτυο, καθώς αυτό βρίσκεται ήδη σε πλήρη αποδιοργάνωση. Έγινε προσπάθεια να διερευνηθεί η συμπεριφορά του τροποποιημένου ως προς τις υδροληψίες δικτύου στην περίπτωση που τηρηθούν οι προδιαγραφές παροχής – πίεσης της μελέτης ανάταξης-εκσυγχρονισμού. Η παροχή που εγκαταστάθηκε στα υδροστόμια κατά την εφαρμογή της προαναφερθείσας μελέτης είναι συνάρτηση της αρδευομένης έκτασης και καθορίστηκε βάσει των ακολούθων προδιαγραφών (Πίνακας 1) (SCP-Υδροσύστημα, 1997). Ο καθορισμός των παροχών των υδροστομίων σύμφωνα με τον Πίνακα 1 οδήγησε σε μία μέση εγκατεστημένη παροχή στο δίκτυο 0,93m³/h/στρ.

Πίνακας 1. Πρότυπες τιμές παροχής στα υδροστόμια

Επιφάνεια (στρέμματα)	<8	8-20	20-30	30-40	40-50	>50
Εγκ.παροχή (m ³ /h)	10	18	25	30	35	45

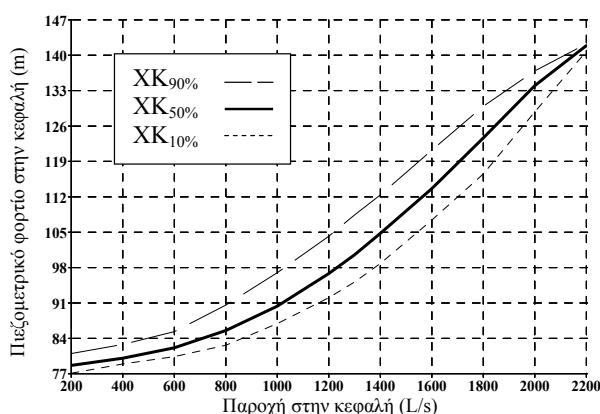
Η ανάλυση του δικτύου έγινε σε δύο επίπεδα: α) μια γενική εκτίμηση της κατάστασης του δικτύου μέσω της χάραξης των Χαρακτηριστικών Καμπύλων με δείκτες, προκειμένου να προσδιοριστεί ο συνολικός βαθμός ικανοποίησης που δίνει το δίκτυο με το υπάρχον αντλιοστάσιο για διάφορες παροχές στη κεφαλή και β) λεπτομερέστερη ανάλυση με σημαντικό αριθμό προσομοιώσεων για υψηλή παροχή στην κεφαλή, προκειμένου να εντοπιστούν τα προβληματικά υδροστόμια και να εκτιμηθεί ο βαθμός επάρκειας υδραυλικού φορτίου που προσφέρουν.

Για την ανάλυση χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό COPAM (*Lamaddalena and Sagardoy 2000*). Στο λογισμικό αυτό κάθε αγωγός μπορεί να έχει κατάντη το πολύ ένα υδροστόμιο. Έτσι λοιπόν εάν ένας αγωγός του δικτύου διαθέτει κατάντη υδροληψία με τρία, παραδείγματος χάριν, υδροστόμια, θα πρέπει κατά την αναπαράστασή του στο μαθηματικό ομοίωμα να παρουσιαστεί με ένα αγωγό ελάχιστα μικρότερου μήκους του πραγματικού που έχει κατάντη ένα υδροστόμιο, ο οποίος ακολουθείται από δύο αγωγούς (στοιχειώδους μήκους) που φέρουν από ένα υδροστόμιο έκαστος. Το συνολικό μήκος των τριών αυτών αγωγών ισούται με αυτό του δικτύου. Αυτό δεν δημιουργεί

πρακτικά κανένα πρόβλημα στην ανάλυση αλλά έχει σαν συνέπεια η όλη αρίθμηση του δικτύου να γίνεται με βάση τους κόμβους και τα υδροστομία (σε αντίθεση με την συνηθισμένη πρακτική που είναι η αρίθμηση σύμφωνα με τους κόμβους και τις υδροληψίες) και να δημιουργείται μία αυξημένη δυσκολία στην εισαγωγή των στοιχείων.

3.2.1 Εκτίμηση της συνολικής επάρκειας του δικτύου

Στο Σχήμα 4. παρουσιάζονται οι Χαρακτηριστικές Καμπύλες με δείκτες ($X.K_{i\%}$), οι οποίες προέκυψαν με 1000 προσομοιώσεις για διάφορες παροχές στην κεφαλή του δικτύου, από 200L/sec μέχρι 2200L/sec (αθροιστική παροχή του δικτύου). Με τη συνεχόμενη γραμμή απεικονίζεται η $X.K$ με δείκτη 50%, $XK_{50\%}$, (δηλαδή ο συνδυασμός παροχής και αναγκαίου φορτίου στη κεφαλή που επιτρέπει στο 50% των προσομοιωμένων καταστάσεων του δικτύου να έχουν πλήρως ικανοποιημένα όλα τα ανοικτά υδροστομία). Από τις χαρακτηριστικές καμπύλες του αντλιοστασίου προκύπτει ότι για παροχή 950L/sec (σύγχρονη λειτουργία των 5 κύριων αντλιών) το μανομετρικό είναι 60m. Επίσης όταν η παροχή στην κεφαλή φτάσει τα 1123L/sec (παροχή Clément), τότε το μανομετρικό μειώνεται στα 50m. Με αυτά τα δεδομένα και το διάγραμμα 4 συνάγεται ότι στην πρώτη περίπτωση ($Q=950L/s$ και πιεζομετρικό φορτίο στην κεφαλή $Z=96m=60m+36m$, όπου 36m το υψόμετρο του αντλιοστασίου) το ποσοστό ικανοποίησης που παρέχει το δίκτυο είναι 90%. Στη δεύτερη περίπτωση ($Q=1123L/s$ και πιεζομετρικό φορτίο στη κεφαλή $Z=86m=50m+36m$) το ποσοστό ικανοποίησης πέφτει κάτω του 10%.



Σχήμα 4. Χαρακτηριστικές καμπύλες με δείκτες 10%, 50%, 90%

3.2.2 Ανάλυση επάρκειας δικτύου σε επίπεδο υδροστομίου

Στη συνέχεια, έγινε η ανάλυση σε επίπεδο υδροστομίου για πιεζομετρικό φορτίο $Z=96m$ και παροχή $Q=950L/sec$, πραγματοποιώντας 600 προσομοιώσεις και εκτιμήθηκε το μέγεθος της σχετικής απόκλισης φορτίου από το ελάχιστο αναγκαίο

φορτίο πίεσης στα διάφορα υδροστομία ($\frac{H_{j,r} - H_{\min}}{H_{\min}}$). Στον Πίνακα 2 παρατίθενται

τα προβληματικά υδροστομία με το αντίστοιχο έλλειμμα φορτίου που παρουσιάζουν

για διάφορες εγκατεστημένες παροχές στα υδροστόμια. Από τον Πίνακα 2 γίνεται φανερό ότι για μέση εγκατεστημένη παροχή στο δίκτυο $d=0,93\text{m}^3/\text{h}/\sigma\tau\rho$, ένας αριθμός (10) υδροστομίων παρουσιάζουν έλλειμμα φορτίου που κυμαίνεται από 10% μέχρι 30% του ελάχιστου αναγκαίου φορτίου πίεσης ($H_{\min}=40\text{m}$). Τα υδροστόμια αυτά συγκεντρώνονται σε τρεις ζώνες του δικτύου.

Αν η ανάλυση αυτή γινόταν για την παροχή Clément στην κεφαλή του δικτύου ($Q=1123\text{L/s}$) τα προβληματικά υδροστόμια θα ήταν πολύ πιο πολλά και το έλλειμμα πίεσης πολύ πιο μεγάλο.

Πίνακας 2. Εκτίμηση του ελλείμματος φορτίου πίεσης (%) σε επίπεδο υδροστομίου σε σχέση με το ελάχιστο αναγκαίο φορτίο ($H_{\min}=40\text{m}$) για διάφορες εγκατεστημένες παροχές στα υδροστόμια.

Αρ. υδροστομίου	Έλλειμμα φορτίου πίεσης/Διαθέσιμο φορτίο στο υδροστόμιο		
	$d=0,93\text{m}^3/\text{h}/\sigma\tau\rho$	$d'=0,8d$	$d''=0,7d$
138	-22% (31,2m)	0%	0%
140	-24% (30,4m)	0%	0%
141	-30% (28,0m)	0%	0%
142	-29% (28,4m)	0%	0%
318	-12% (35,2m)	0%	0%
319	-15% (34,0m)	0%	0%
321	-14% (34,4m)	0%	0%
322	-15% (34,0m)	0%	0%
440	-10% (36,0m)	0%	0%
441	-12% (35,2m)	-11% (35,6m)	0%

όπου d : μέση εγκατεστημένη παροχή στο δίκτυο σύμφωνα με τη μελέτη
 d', d'' : μέση εγκατεστημένη παροχή στο δίκτυο μειωμένη κατά 20% και 30% αντίστοιχα.

3.3 Προτάσεις βελτίωσης του δικτύου

Ένας τρόπος αντιμετώπισης του προβλήματος χωρίς ενισχύσεις, οι οποίες θα επιβάρυναν το κόστος διαχείρισης του δικτύου, θα ήταν να γίνει περιορισμός των παροχών στα υδροστόμια. Εξετάστηκαν δύο περιπτώσεις, μειώνοντας τις παροχές στα υδροστόμια κατά 20% και 30% αντίστοιχα σε σχέση με το δίκτυο αναφοράς ($d'=0,8d$ και $d''=0,7d$, βλέπε Πίνακα 2). Στην πρώτη περίπτωση ($d'=0,8d$) κατά τις προσομοιώσεις με παροχή $Q=950\text{L/s}$ στη κεφαλή μόνο ένα υδροστόμιο παρουσίασε έλλειμμα φορτίου έως 11% σε σχέση με το αναγκαίο ελάχιστο φορτίο. Στη δεύτερη περίπτωση ($d''=0,7d$), δεν παρουσιάστηκε έλλειμμα φορτίου σε κανένα υδροστόμιο.

Η μείωση της παροχής στα υδροστόμια θα οδηγήσει στον περιορισμό των αρδευτικών συστημάτων που είναι δυνατό να χρησιμοποιούνται από τους παραγωγούς, όσο και στο βαθμό ελευθερίας χρήσης των υδροστομίων. Ως βαθμός ελευθερίας χρήσης ενός υδροστομίου ορίζεται ο λόγος της εγκατεστημένης σε αυτό παροχής προς την αντίστοιχη ειδική συνεχή παροχή. Αρχικά, ο μέσος βαθμός ελευθερίας χρήσης των υδροστομίων υπολογίστηκε σε 3,7. Μειώνοντας την εγκατεστημένη παροχή κατά 20% και 30%, ο μέσος βαθμός ελευθερίας γίνεται 3,0 και 2,6 αντίστοιχα. Γίνεται φανερό ότι ακόμη και σε αυτές τις περιπτώσεις υπάρχει ελευθερία για τους χρήστες, δεδομένου ότι μπορούν να πραγματοποιήσουν τις αρδεύσεις τους στο 33%-38% αντίστοιχα του χρόνου της περιόδου αιχμής.

3.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το δίκτυο, έχοντας περιοριστές παροχής και πίεσης, δηλαδή λειτουργώντας ως ένα συγκροτημένο υδραυλικό σύστημα, μπορεί να ανταποκριθεί μέχρι παροχής στη κεφαλή 950 L/sec χωρίς σοβαρά προβλήματα.

Στη λεπτομερέστερη ανάλυση, σε επίπεδο υδροστομίου, φαίνεται ότι υπάρχουν υδροστόμια με ιδιαίτερα προβληματική συμπεριφορά. Αντιμετώπιση του προβλήματος θα μπορούσε να γίνει με ενίσχυση του δικτύου (ενίσχυση του αντλιοστασίου ή και ενίσχυση αγωγών). Επειδή όμως οι αντλίες, ήδη κατά την προγενέστερη ανάταξη-εκσυγχρονισμό υπέστησαν ενίσχυση αλλάζοντας τα στροφεία, και τους κινητήρες, περαιτέρω ενίσχυση του αντλιοστασίου σημαίνει αλλαγή των αντλιών, επέμβαση η οποία συνεπάγεται σημαντικό κόστος. Μία λύση η οποία θα επέτρεπε βελτίωση της κατάστασης με πολύ μικρό κόστος για τον διαχειριστή του δικτύου, θα ήταν η μείωση της παροχής των υδροστομίων. Η επέμβαση αυτή θα μείωνε την ελευθερία των χρηστών, σε βαθμό όμως που, όπως έδειξε η ανάλυση, δεν είναι απαγορευτικός.

4. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Béthery J., 1990. *Réseaux collectives d' irrigation ramifiés sous pression. Calcul et fonctionnement. Etudes Hydrauliques agricole no 6. CEMAGREF éditeur, Antony, France, 139p.*
2. Béthery J., Meunier M., and Puech C. 1981. *Analyse des défaillances et étude de renforcement des réseaux d' irrigation par aspersion. Onzième Congrès de la CIID, question 36, pp.297-324.*

3. CEMAGREF, 1990. *Logiciel XERXES-RENFORS. Notice d'utilisation, Antony, France, 180p.*
4. CEMAGREF, 1991. *Logiciel ICARE. Notice d'utilisation, Antony, France, 51p*
5. CTGREF, 1979. *Renforcement des réseaux ramifiés d'eau sous pression, Cahier33.*
6. Δέρκας Ν., 2001. *Μαθηματικά Ομοιώματα για την ανάταξη και τον εκσυγχρονισμό των συλλογικών αρδευτικών δικτύων πίεσης. Σημειώσεις, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα.*
7. Δέρκας Ν. και Καραντούνιας Γ., 2003. “Μεθοδολογία ανάταξης και εκσυγχρονισμού των συλλογικών δικτύων υπό πίεση”, 9^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης, Θεσσαλονίκη, σσ.207-215.
8. Doorenbos J. and Pruitt W.O., 1977. *Guidelines for predicting crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper 24, F.A.O, Rome.*
9. Lamadalena N. 1997. *Integrated simulation modeling for design and performance analysis of on-demand pressurized irrigation systems. Ph.D. Dissertation, Technical University of Lisbon, Lisbon.*
10. Lamaddalena N. and Sagardoy J.A., 2000. *Performance analysis of on-demand pressurized irrigation systems, FAO and CIHEAM-IAMB, Paper 59, Rome, pp149.*
11. SCP-Υδροσύστημα, 1997. *Αρδευτικά δίκτυα με καταιονισμό Πηνειού (Ηλείας), Μελέτη Αναδιάρθρωσης, Υπουργείο Γεωργίας, Διεύθυνση Εργείων Βελτιώσεων.*
12. Smith M., 1989. *Manual for Cropwat – A Computer Program for IBM-PC, Version 5.5, F.A.O, Rome.*

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΧΩΡΙΚΗΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΤΗΤΑΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΟΥ ΕΛΑΦΟΥΣ

**Χ. Καλλιτσάρι^{*}, Χ. Γεωργούσης^{*}, Χ. Μπαμπατζιμόπουλος^{*},
Α. Πανώρας^{**} και Δ. Καλαμπίδης^{*}**

^{*} Α.Π.Θ. – Τμήμα Γεωπονίας, 541 24, Θεσ/νίκη

^{**} ΕΘΙΑΓΕ, Ινστιτούτο Διαχ. Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος, 574 00, Σίνδος

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η χωρική μεταβλητότητα των παραμέτρων της εξίσωσης Van Genuchten και της υδραυλικής αγωγιμότητας στον κορεσμό K_s . Επίσης διερευνήθηκε η ακρίβεια περιγραφής της χαρακτηριστικής καμπύλης υγρασίας (ΧΚΥ) με χρήση δύο (a και n), τριών (θ_r , a και n) ή τεσσάρων (θ_s , θ_r , a και n) παραμέτρων προσαρμογής. Συνολικά επελέγησαν 21 θέσεις δειγματοληψίας εντός μιας έκτασης 600 στρ. που παρουσίασαν διαφορετικές συμπεριφορές τόσο στις ΧΚΥ όσο και στις τιμές της K_s , ακόμη και σε δείγματα ίδιας μηχανικής σύστασης. Φαίνεται πως η ακρίβεια της εξίσωσης Van Genuchten βελτιώνεται όταν οι παράμετροι θ_s & θ_r (ή τουλάχιστον η θ_r) αποτελούν παραμέτρους προσαρμογής και όχι μετρημένες εργαστηριακά ποσότητες.

STUDY OF THE SPATIAL VARIABILITY OF SOIL HYDRAULIC PARAMETERS

C. Kallitsari^{*}, H. Georgoussis^{*}, C. Babajimopoulos^{*}, A. Panoras^{}
and D. Kalampidis^{*}**

^{*} Aristotle University of Thessaloniki, School of Agriculture, 541 24, Greece

^{**} N.A.G.R.E.F., Institute of Water Resources & Envir. Management, 547 00, Greece

ABSTRACT

The purpose of this paper is a) to study the spatial variability of both the Van Genuchten's equation parameters and the saturated hydraulic conductivity and b) the description of the Van Genuchten's soil retention curve using two (a and n), three (a , n and θ_r) or four (a , n , θ_r and θ_s) regression parameters. Field data were collected in 21 locations in a 0.6 km² area near the city of Thessaloniki. Differences in both soil retention curve and saturated hydraulic conductivity were observed even in samples belonging to the same soil texture class. It was also found that the soil retention curve is described more accurately if θ_s and θ_r are rather fitting than measured parameters.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μεταβλητότητα του τύπου του εδάφους είναι το αποτέλεσμα φυσικών (γεωολογικών – εδαφολογικών) διεργασιών [12] και γεωργικών πρακτικών [10, 11], που διαφοροποιούνται στο χώρο και στο χρόνο. Στην πληθώρα των συνδυασμών των παραγόντων εδαφογένεσης οφείλεται και η μεταβλητότητα των ιδιοτήτων των εδαφών τόσο σε μέγρο [16] όσο και μικρό κλίμακα [17].

Είναι φανερό ότι το μέγεθος της μεταβλητότητας, αυξάνει με την αύξηση της επιφάνειας της υπό εξέταση περιοχής και γίνεται περισσότερο κατανοητή αυξανόμενου του όγκου των δειγμάτων που παίρνουμε από αυτήν. Χωρική μεταβλητότητα των υδραυλικών παραμέτρων του εδάφους παρατηρείται όμως ακόμη και σε εκτάσεις επιπέδου αγρού και συνεπώς πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψη στο βέλτιστο προγραμματισμό των αρδεύσεων. Για το λόγο αυτό έχουν διεξαχθεί πολλές μελέτες με σκοπό τον καθορισμό της χωρικής ή χρονικής μεταβλητότητας των υδραυλικών παραμέτρων [3, 8, 7] αλλά και το συνυπολογισμό της στην προσομοίωση της κίνησης του νερού στην ακόρεστη ζώνη του εδάφους [4, 2].

Δεδομένων των τεραστίων αναγκών της γεωργίας σε νερό και της έλλειψης που αυτό παρουσιάζει σε πολλές περιοχές της χώρας μας, ο ορθολογικός προγραμματισμός των αρδεύσεων των καλλιεργειών καθίσταται αναγκαίος. Απαραίτητη για τον προγραμματισμό είναι η γνώση της χαρακτηριστικής καμπύλης υγρασίας (ΧΚΥ) του εδάφους και της υδραυλικής του αγωγιμότητας στον κορεσμό (K_s). Η τυπική διαδικασία περιλαμβάνει τη λήψη ενός περιορισμένου αριθμού δειγμάτων για τον προσδιορισμό της ΧΚΥ όσο και της K_s .

Η περιγραφή της ΧΚΥ γίνεται συνήθως με τη βοήθεια της εξίσωσης Van Genuchten [13], η οποία περιλαμβάνει τέσσερις παραμέτρους: θ_s , θ_r , α και n . Συνεπώς, οποιαδήποτε διαφοροποίηση της ΧΚΥ μέσα σε μια περιοχή αντιστοιχεί σε διαφοροποίηση αυτών των τεσσάρων παραμέτρων στην περιοχή αυτή. Οι παράμετροι θ_s (υγρασία κορεσμού) και θ_r (υπολειμματική υγρασία) μπορούν να μετρηθούν εργαστηριακά, ενώ οι α και n αποτελούν παραμέτρους προσαρμογής. Όμως λόγω αδυναμιών των μεθόδων μέτρησης των θ_s και θ_r αυτές μπορούν να θεωρούνται (είτε μια από αυτές ή και οι δυο ταυτόχρονα) ως παράμετροι προσαρμογής μαζί με τις α και n [14, 6].

Σκοποί της παρούσας εργασίας είναι (α) η μελέτη της χωρικής μεταβλητότητας των παραμέτρων της εξίσωσης Van Genuchten και της υδραυλικής αγωγιμότητας στον κορεσμό K_s σε περιοχές της πεδιάδας Θεσσαλονίκης και (β) η παράλληλη διερεύνηση της ακρίβειας περιγραφής της ΧΚΥ με χρήση δυο (α και n), τριών (θ_r , α και n) ή τεσσάρων (θ_s , θ_r , α και n) παραμέτρων προσαρμογής.

ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Για το πειραματικό μέρος της παρούσας εργασίας επιλέχθηκαν περιοχές συνολικής έκτασης 600 περίπου στρεμμάτων που ανήκουν στον Τ.Ο.Ε.Β. Χαλάστρας – Καλοχωρίου του νομού Θεσσαλονίκης, ο οποίος διοικεί το ομώνυμο συλλογικό αρδευτικό – στραγγιστικό δίκτυο συνολικής έκτασης 63.000 στρεμμάτων. Το εν λόγω αρδευτικό δίκτυο λειτουργεί με βαρύτητα. Χωρίζει δε τις εκτάσεις σε περιοχές περίπου 200 στρεμμάτων που συνηθίζεται να καλούνται «πλάκες» και παίρνουν το όνομα της

τριτεύουσας διώρυγας από την οποία αρδεύονται. Η δειγματοληψία διεξήχθη σε τρεις συνολικά πλάκες (Δε, Δζ και Δη αντίστοιχα), κατά μήκος μιας ευθείας γραμμής μέσα σε κάθε πλάκα, ενώ η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών θέσεων ήταν περίπου 100 μέτρα. Αναλυτικότερα από την πλάκα Δε πάρθηκαν δείγματα από 10 θέσεις, από τη Δζ από 9 θέσεις και από τη Δη ελήφθησαν δείγματα από 2 θέσεις. Στις θέσεις αυτές πάρθηκαν διαταραγμένα εδαφικά δείγματα για μηχανική ανάλυση ενώ αδιατάρακτα δείγματα πάρθηκαν για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών καμπυλών υγρασίας. Όλα τα δείγματα πάρθηκαν από τα πρώτα 30cm του εδάφους. Για τον προσδιορισμό της υδραυλικής αγωγιμότητας στον κορεσμό στην αρχή έγινε χρήση του υδροπερατόμετρου Guelph. Λόγω όμως της έντονης στρωμάτωσης των εδαφών της περιοχής, το υδροπερατόμετρο Guelph παρείχε πολύ συχνά αρνητικές τιμές (χωρίς δηλαδή φυσική σημασία). Για το λόγο αυτό επιλέχθηκε ως λύση η λήψη αδιατάρακτων εδαφικών δειγμάτων και η εισαγωγή τους στο υδροπερατόμετρο σταθερού φορτίου του Εργαστηρίου Γενικής και Γεωργικής Υδραυλικής και Βελτιώσεων του Α.Π.Θ.

2.1 Προσδιορισμός της μηχανικής σύστασης του εδάφους

Για τον προσδιορισμό της μηχανικής σύστασης των δειγμάτων ακολουθήθηκε η μέθοδος Βουγιούκου [1].

2.2 Προσδιορισμός της χαρακτηριστικής καμπύλης

Διεξήχθη με τη βοήθεια συσκευών πιεζόμενης κεραμικής πλάκας χαμηλών (0.1 – 3 bar) και υψηλών (5 – 15 bar) πιέσεων [5] του Ινστιτούτου Διαχείρισης Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος του ΕΘ.Ι.ΑΓ.Ε. στη Σίνδο Θεσσαλονίκης.

2.3 Προσδιορισμός της υδραυλικής αγωγιμότητας στον κορεσμό

Όπως προαναφέρθηκε, η υδραυλική αγωγιμότητα στον κορεσμό προσδιορίστηκε στο εργαστήριο με το υδροπερατόμετρο σταθερού φορτίου.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1 Μηχανική ανάλυση

Τα αποτελέσματα της μηχανικής ανάλυσης των 21 δειγμάτων φαίνονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 7: Μηχανική ανάλυση των συλλεχθέντων δειγμάτων.

Πλάκα	Θέση	Άμμος (%)	Πλύς (%)	Άργιλος (%)	Χαρακτηρισμός κατά USDA
Δε	Θ1	46.4	35.2	18.4	L
	Θ2	38.8	40.8	20.4	L
	Θ3	26.0	49.2	24.8	L
	Θ4	31.2	46.0	22.8	L
	Θ5	32.4	49.2	18.4	L
	Θ6	43.6	34.0	22.4	L
	Θ7	30.0	51.6	18.4	SiL
	Θ8	16.4	59.2	24.4	SiL
	Θ9	36.0	47.6	16.4	L
	Θ10	48.0	37.6	14.4	L
Δζ	Θ1	62.4	24.4	13.2	SL
	Θ2	52.4	42.4	5.2	SL
	Θ3	52.4	30.4	17.2	SL/(L)
	Θ4	50.4	34.4	15.2	L
	Θ5	44.4	42.4	13.2	L
	Θ6	46.4	44.4	9.2	L
	Θ7	54.4	36.4	9.2	SL

	Θ8	64.4	26.4	9.2	SL
	Θ9	58.4	32.4	9.2	SL
Δη	Θ1	31.2	42.0	26.8	L
	Θ2	27.6	49.6	22.8	L

3.2 Χαρακτηριστικές καμπύλες

Η περιγραφή της χαρακτηριστικής καμπύλης στην εργασία αυτή γίνεται με τον προσδιορισμό της εξίσωσης Van Genuchten (1980) [13]:

$$\theta(h) = \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (ah)^n\right]^m} \quad (1)$$

όπου: θ η περιεχόμενη στο έδαφος υγρασία κατ' όγκο [$L^3 L^{-3}$], θ_r η υπολειμματική υγρασία [$L^3 L^{-3}$], θ_s η υγρασία κορεσμού [$L^3 L^{-3}$], a μια παράμετρος προσαρμογής [L^{-1}], n μια παράμετρος προσαρμογής [-] που συνδέεται με την παράμετρο m με τη σχέση $m = 1 - \frac{1}{n}$.

Η εξίσωση (1) περιγράφει τη σχέση μεταξύ εδαφικής υγρασίας θ και εδαφικής πίεσης h αρκεί να είναι γνωστές οι τέσσερις παράμετροι θ_s , θ_r , a , n , που μπορούν να εκτιμηθούν από δεδομένα συγκράτησης νερού – εδάφους. Η υπολειμματική υγρασία θ_r αντιπροσωπεύει τη μέγιστη ποσότητα εδαφικού νερού, η οποία δεν κινείται διαμέσου των εδαφικών πόρων λόγω ισχυρής προσρόφησης στη στερεή φάση του εδάφους. Από μαθηματικής σκοπιάς η υπολειμματική υγρασία είναι η περιεχόμενη στο έδαφος υγρασία για την οποία σε μεγάλες τιμές πίεσης ισχύει ότι τόσο $d\theta/dh \rightarrow 0$ όσο και $K \rightarrow 0$. Η μέτρηση της υπολειμματικής υγρασίας θ_r με κάποια μέθοδο σε κάποια πολύ υψηλή πίεση (συνήθως αυτή των 15 bar) δεν αντικατοπτρίζει την ακριβή τιμή της ιδιαίτερα όταν μελετούνται εδάφη ξηρών και ταυτόχρονα θερμών περιοχών. Στις περιοχές αυτές το ισχυρά προσροφημένο στη στερεή φάση εδαφικό νερό απομακρύνεται με την αέρια μορφή του, ξηραίνοντας το έδαφος σε επίπεδα πολύ κάτω της μετρημένης στο εργαστήριο τιμής θ_r .

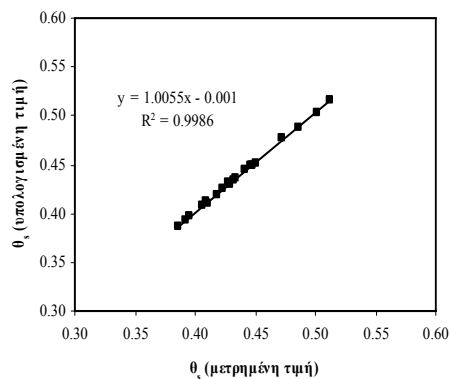
Όσον αφορά την υγρασία κορεσμού θ_s , αυτή αντιπροσωπεύει τη μέγιστη ποσότητα νερού που μπορεί να περιέχει ένας όγκος εδάφους, όταν το εδαφικό νερό καλύψει κάθε κενό πόρο αυτού. Μια τέτοια περίπτωση, όπου η κατ' όγκο περιεχόμενη εδαφική υγρασία ισούται με τον όγκο των κενών πόρων του εδάφους, δεν είναι δυνατό να επιτευχθεί στη φύση είτε λόγω του εγκλωβισμού αέρα στους μικροπόρους του εδάφους είτε λόγω του διαλυμένου αέρα μέσα στο εδαφικό νερό. Στο εργαστήριο με προσεκτική διύγνωση των δειγμάτων, ο εγκλωβισμένος όγκος αέρα μπορεί να είναι πρακτικά μηδενικός, χωρίς ωστόσο να παύει να υφίσταται. Συνεπώς η θ_r και ίσως η θ_s , θα μπορούσαν να μην προσδιορίζονται εργαστηριακά, αποτελώντας έτσι σταθερές της Εξίσωσης (1) αλλά θα πρέπει να εξετάζεται ο υπολογισμός τους μέσω της ανάλυσης παλινδρόμησης όπως και οι παράμετροι a και n της εξίσωσης αυτής.

Για τους παραπάνω λόγους, στην εργασία αυτή διερευνάται η ακρίβεια περιγραφής της ΧΚΥ με τη βοήθεια της Εξίσωσης (1) με τρία σενάρια: (α) προσδιορίζοντας και τις τέσσερις παραμέτρους a , n , θ_r και θ_s από ανάλυση παλινδρόμησης (β) προσδιορίζοντας τις παραμέτρους a , n και θ_r δεχόμενοι ως ακριβή την εργαστηριακά προσδιορισμένη τιμή της θ_s (γ) προσδιορίζοντας μόνο τις παραμέτρους a , n , αποδεχόμενοι ως ακριβείς τις τιμές θ_s και θ_r , που προσδιορίστηκαν κατά την πειραματική διαδικασία. Οι υπολογισμοί έγιναν με μη γραμμική ανάλυση παλινδρόμησης (non-linear regression analysis [14, 6] με τη βοήθεια του προγράμματος

ηλεκτρονικού υπολογιστή RETC [15] που χρησιμοποιεί τη μέθοδο μέγιστης γειτνίασης του Marquardt – Marquardt's maximum neighborhood method [9].

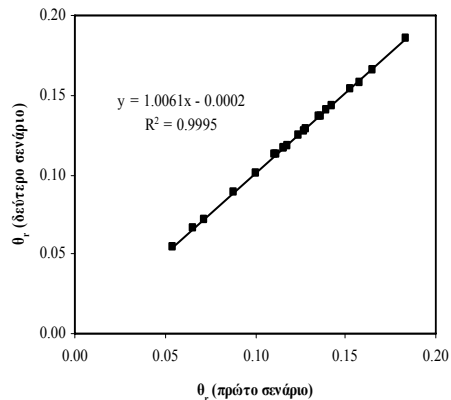
Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα της ανάλυσης παλινδρόμησης (τιμές των παραμέτρων θ_s , θ_r , a , n και του συντελεστή προσδιορισμού R^2) και για τα τρία σενάρια. Στο Σχήμα 1 παρατηρούμε ότι οι τιμές θ_s οι οποίες προσδιορίστηκαν με το πρώτο σενάριο, διαφέρουν πολύ λίγο από αυτές που υπολογίστηκαν πειραματικά. Αυτό γίνεται φανερό τόσο από την κλίση της ευθείας προσαρμογής που είναι πολύ κοντά στη μονάδα, όσο και από τον υψηλό βαθμό προσδιορισμού. Επίσης οι τιμές θ_s που υπολογίστηκαν είναι ακριβείς σε τουλάχιστον δύο δεκαδικά ψηφία σε σύγκριση με αυτές που είχαν υπολογισθεί πειραματικά.

Αναφορικά με τις τιμές θ_r που προσδιορίστηκαν με τον πρώτο σενάριο, αυτές δε διαφέρουν σημαντικά (Σχήμα 2) από τις τιμές που προσδιορίστηκαν με το δεύτερο σενάριο, καθώς και σε αυτή την περίπτωση η κλίση της ευθείας προσαρμογής είναι περίπου ίση με τη μονάδα και διακρίνεται από επίσης υψηλό βαθμό προσδιορισμού.



Σχήμα 15

Σύγκριση μετρημένων και υπολογισμένων τιμών υγρασίας κορεσμού θ_s

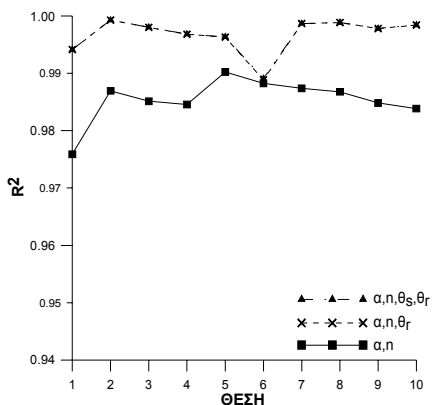


Σχήμα 16: Σύγκριση τιμών υπολειμματικής υγρασίας θ_r υπολογισμένων σύμφωνα με το πρώτο και το δεύτερο σενάριο.

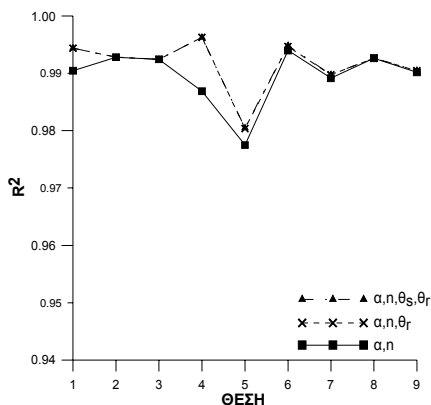
Αντίθετα, από τη σύγκριση των τιμών της θ_r που προσδιορίστηκαν με το πρώτο σενάριο και των μετρημένων τιμών (Πίνακας 2) φαίνεται πως οι διαφορές κυμαίνονται

από 0 ως $0.132 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ (ή ποσοστιαία από 0 – 51.3%) με μια μέση τιμή της τάξης των $0.049 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ($\approx 18.1\%$). Παρόμοια είναι και τα αποτελέσματα της σύγκρισης των τιμών της θ_r που προσδιορίστηκαν με το δεύτερο και το τρίτο σενάριο. Οι μεγάλες αποκλίσεις στις περισσότερες τιμές της θ_r οφείλεται βέβαια στο γεγονός ότι ο εργαστηριακός προσδιορισμός της γίνεται με άσκηση πίεσης μόνο 15 bar. Είναι γνωστό όμως ότι η υπολειμματική υγρασία πρέπει να λαμβάνεται για πολύ μεγαλύτερες πιέσεις, κάτι όμως που δεν είναι εφικτό στο εργαστήριο.

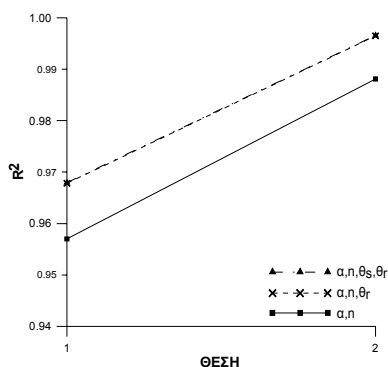
Η συγκριτική μελέτη των τριών σεναρίων με κριτήριο το συντελεστή προσδιορισμού (Πίνακας 2) έδειξε (α) την ελαφρά υπεροχή του πρώτου έναντι του δεύτερου (μέγιστη βελτίωση του συντελεστή προσδιορισμού 0.023%, με μέση τιμή 0.005%) και (β) ξεκάθαρη υπεροχή του δεύτερου σεναρίου έναντι του τρίτου (μέγιστη βελτίωση του συντελεστή προσδιορισμού 1.871%, με μέση τιμή 0.728%). Παρόμοια είναι και η υπεροχή του πρώτου έναντι του τρίτου σεναρίου. Τα παραπάνω συμπεράσματα φαίνονται στον Πίνακα 2 και αποτυπώνονται γραφικά στα Σχήματα 4, 5 και 6, όπου οι διαφορές μεταξύ των δύο πρώτων σεναρίων είναι δυσδιάκριτες:



Σχήμα 17: Τιμές του συντελεστή προσδιορισμού για τις 10 θέσεις της πλάκας Δε.



Σχήμα 18: Τιμές του συντελεστή προσδιορισμού για τις 9 θέσεις της πλάκας Δζ.

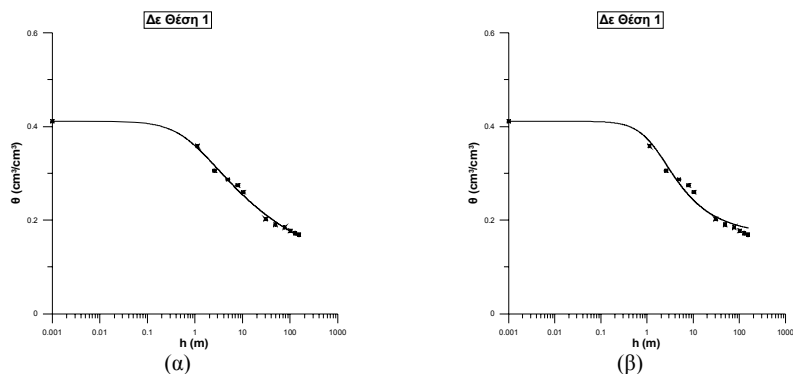


Σχήμα 19: Τιμές του συντελεστή προσδιορισμού για τις 2 θέσεις της πλάκας Δε.

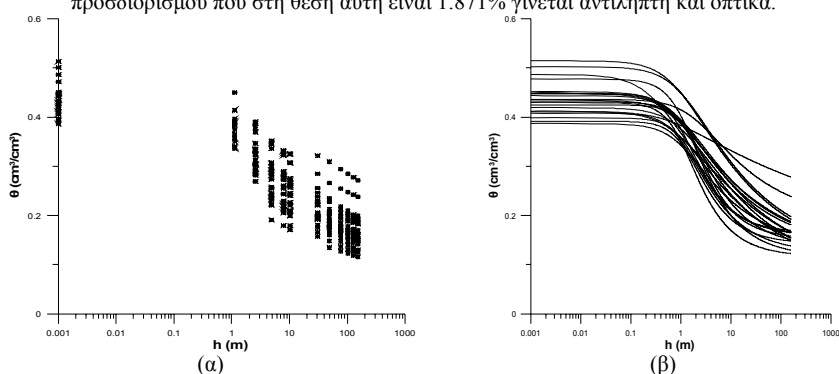
Πίνακας 8: Παρουσίαση τιμών των παραμέτρων θ_s , θ_r , a , n και του συντελεστή προσδιορισμού r^2 για κάθε σενάριο

ΘΕΣΗ	Μετρημένες τιμές		θ_s, θ_r, a, n – προσαρμοσμένες τιμές						θ_r, a, n – προσαρμοσμένες τιμές						a, n – προσαρμοσμένες τιμές					
	θ_s (cm ³ /cm ³)	θ_r (cm ³ /cm ³)	θ_s (cm ³ /cm ³)	θ_r (cm ³ /cm ³)	a (cm ⁻¹)	n	m	r^2	θ_s (cm ³ /cm ³)	θ_r (cm ³ /cm ³)	a (cm ⁻¹)	n	m	r^2	θ_s (cm ³ /cm ³)	θ_r (cm ³ /cm ³)	a (cm ⁻¹)	n	m	r^2
Δε-1	0.411	0.169	0.411	0.066	1.305	1.233	0.189	0.994	0.411	0.066	1.302	1.233	0.189	0.994	0.411	0.169	0.698	1.601	0.375	0.976
Δε-2	0.486	0.149	0.487	0.054	3.110	1.245	0.197	0.999	0.486	0.054	3.102	1.245	0.197	0.999	0.486	0.149	1.455	1.541	0.351	0.987
Δε-3	0.513	0.194	0.515	0.100	1.115	1.290	0.225	0.998	0.513	0.101	1.096	1.292	0.226	0.998	0.513	0.194	0.675	1.616	0.381	0.985
Δε-4	0.442	0.189	0.444	0.128	0.966	1.338	0.252	0.997	0.443	0.128	0.944	1.340	0.254	0.997	0.442	0.189	0.630	1.658	0.397	0.985
Δε-5	0.446	0.153	0.448	0.112	1.000	1.405	0.288	0.996	0.446	0.113	0.971	1.409	0.290	0.996	0.446	0.153	0.729	1.636	0.389	0.990
Δε-6	0.472	0.125	0.477	0.116	0.863	1.672	0.402	0.989	0.472	0.117	0.828	1.679	0.405	0.989	0.472	0.125	0.780	1.756	0.430	0.988
Δε-7	0.451	0.184	0.451	0.127	1.123	1.347	0.258	0.999	0.451	0.127	1.115	1.348	0.258	0.999	0.451	0.184	0.738	1.644	0.392	0.987
Δε-8	0.501	0.199	0.502	0.111	0.900	1.305	0.234	0.999	0.501	0.113	0.879	1.308	0.235	0.999	0.501	0.199	0.565	1.640	0.390	0.987
Δε-9	0.433	0.169	0.434	0.088	0.918	1.297	0.229	0.998	0.433	0.089	0.894	1.300	0.231	0.998	0.433	0.169	0.565	1.645	0.392	0.985
Δε-10	0.418	0.158	0.419	0.072	0.835	1.296	0.228	0.998	0.418	0.072	0.827	1.297	0.229	0.998	0.418	0.158	0.519	1.660	0.398	0.984
Δζ-1	0.386	0.161	0.387	0.136	0.915	1.436	0.304	0.994	0.386	0.136	0.907	1.437	0.304	0.994	0.386	0.161	0.708	1.633	0.388	0.990
Δζ-2	0.392	0.142	0.392	0.143	0.725	1.805	0.446	0.993	0.392	0.143	0.732	1.801	0.445	0.993	0.392	0.142	0.738	1.791	0.442	0.993
Δζ-3	0.448	0.158	0.448	0.158	0.999	1.718	0.418	0.992	0.448	0.158	0.996	1.718	0.418	0.992	0.448	0.158	0.998	1.716	0.417	0.992
Δζ-4	0.448	0.185	0.448	0.118	1.352	1.290	0.225	0.996	0.448	0.118	1.343	1.290	0.225	0.996	0.448	0.185	0.819	1.571	0.364	0.987
Δζ-5	0.396	0.152	0.398	0.165	0.706	1.832	0.454	0.980	0.396	0.166	0.685	1.844	0.458	0.980	0.396	0.152	0.817	1.635	0.389	0.978
Δζ-6	0.427	0.145	0.431	0.135	0.628	1.632	0.387	0.995	0.427	0.136	0.599	1.646	0.392	0.995	0.427	0.145	0.559	1.736	0.424	0.994
Δζ-7	0.423	0.147	0.425	0.153	0.571	1.862	0.463	0.990	0.423	0.153	0.559	1.872	0.466	0.990	0.423	0.147	0.593	1.780	0.438	0.989
Δζ-8	0.429	0.116	0.429	0.116	0.960	1.777	0.437	0.993	0.429	0.116	0.958	1.778	0.438	0.993	0.429	0.116	0.963	1.771	0.435	0.993
Δζ-9	0.406	0.129	0.408	0.124	0.862	0.161	-5.23	0.991	0.406	0.124	0.841	1.611	0.379	0.990	0.406	0.129	0.796	1.665	0.399	0.990
Δη-1	0.410	0.271	0.412	0.139	1.723	1.120	0.107	0.968	0.410	0.141	1.609	1.122	0.108	0.968	0.410	0.271	0.710	1.471	0.320	0.957
Δη-2	0.434	0.238	0.436	0.184	0.513	1.346	0.257	0.997	0.434	0.186	0.487	1.357	0.263	0.997	0.434	0.238	0.354	1.696	0.410	0.988

Η υπεροχή της πρώτης μεθόδου έναντι της τρίτης στην περιγραφή της ΧΚΥ γίνεται αντιληπτή ακόμη και οπτικά (Σχήμα 7). Μετά το πέρας της διαδικασίας προσαρμογής των δεδομένων ΧΚΥ (Σχήμα 8α) στην εξίσωση (1) η παρουσίαση των ΧΚΥ και για τις 21 θέσεις δειγματοληψίας στο Σχήμα 8β, δείχνει καθαρά το μέγεθος της χωρικής μεταβλητότητάς τους.



Σχήμα 7: Χαρακτηριστικές καμπύλες υγρασίας για τη θέση 1 της πλάκας Δε (α) προσδιορίζονται α , n , θ_s , θ_r και (β) προσδιορίζονται μόνο α , n . Η βελτίωση του συντελεστή προσδιορισμού που στη θέση αυτή είναι 1.871% γίνεται αντιληπτή και οπτικά.



Σχήμα 8: (α) Τιμές υγρασίας – πίεσης για όλες τις θέσεις (β) Χαρακτ. καμπύλες υγρασίας για το σύνολο των 21 θέσεων δειγματοληψίας που προσδιορίστηκαν με το πρώτο σενάριο.

3.3 Υδραυλική αγωγιμότητα στον κορεσμό

Η αρχική προσπάθεια της *in situ* μέτρησης της υδραυλικής αγωγιμότητας στον κορεσμό K_s με το υδροπερατόμετρο Guelph, εγκαταλείφθηκε εξαιτίας των συχνών αρνητικών τιμών που οφείλονται στην ύπαρξη στρώσεων διαφορετικής μηχανικής σύστασης. Ως εναλλακτική μέθοδος χρησιμοποιήθηκε η εργαστηριακή μέθοδος του υδροπερατόμετρου σταθερού φορτίου. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζονται στον Πίνακα 3, παράλληλα με τα αποτελέσματα της μηχανικής ανάλυσης. Από τον Πίνακα αυτό γίνεται αντιληπτό το γεγονός της έντονης χωρικής μεταβλητότητας της υδραυλικής αγωγιμότητας στον κορεσμό (μέγιστο 17.940 cm/day – ελάχιστο 0.062 cm/day) ακόμη και σε εδάφη της ίδιας μηχανικής σύστασης και της ίδιας πλάκας (π.χ. μεταξύ των θέσεων Θ6 και Θ4 της πλάκας Δζ υπάρχει διαφορά περίπου 2 τάξεων μεγέθους).

Πίνακας 9: Μετρημένες τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας στον κορεσμό σε συνδυασμό με τη μηχ. σύσταση των δειγμάτων.

Πλάκα	Θέση	Άμμος (%)	Πλύς (%)	Αργίλος (%)	Χαρακτηρισμός κατά USDA	K _s (cm/day)
Δε	Θ1	46.4	35.2	18.4	L	1.834
	Θ2	38.8	40.8	20.4	L	0.244
	Θ3	26.0	49.2	24.8	L	0.724
	Θ4	31.2	46.0	22.8	L	0.740
	Θ5	32.4	49.2	18.4	L	9.446
	Θ6	43.6	34.0	22.4	L	1.742
	Θ7	30.0	51.6	18.4	SiL	1.440
	Θ8	16.4	59.2	24.4	SiL	0.567
	Θ9	36.0	47.6	16.4	L	0.666
	Θ10	48.0	37.6	14.4	L	0.111
Δζ	Θ1	62.4	24.4	13.2	SL	2.216
	Θ2	52.4	42.4	5.2	SL	1.420
	Θ3	52.4	30.4	17.2	SL/(L)	5.968
	Θ4	50.4	34.4	15.2	L	0.062
	Θ5	44.4	42.4	13.2	L	0.286
	Θ6	46.4	44.4	9.2	L	10.080
	Θ7	54.4	36.4	9.2	SL	2.630
	Θ8	64.4	26.4	9.2	SL	17.940
	Θ9	58.4	32.4	9.2	SL	0.467
Δη	Θ1	31.2	42.0	26.8	L	0.663
	Θ2	27.6	49.6	22.8	L	0.070

Παράγοντες που πιθανώς να ερμηνεύουν τη μεταβλητότητα των τιμών της K_s μεταξύ των θέσεων δειγματοληψίας είναι μεταξύ άλλων: η διαφοροποίηση του είδους της αργίλου (μοντιμοριλλοντική – καολινική) ο διαφορετικός βαθμός συμπίεσης του εδάφους και το ποσοστό της περιεχόμενης οργανικής ουσίας. Σε κάθε περίπτωση όμως, η έντονη χωρική μεταβλητότητα της υδραυλικής αγωγιμότητας είναι ένας παράγοντας που πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η θεώρηση της ομοιογένειας του εδάφους ακόμα και σε επίπεδο αγρού αποτελεί απλοποίηση που δεν αντιπροσωπεύει τη φυσική πραγματικότητα. Στην παρούσα εργασία καταδείχθηκε η σε σημαντικό βαθμό χωρική μεταβλητότητα της XKY του εδάφους και της υδραυλικής αγωγιμότητας στον κορεσμό. Συνεπώς είναι απαραίτητος ο συνυπολογισμός της για τον ορθολογικό προγραμματισμό των αρδεύσεων των καλλιεργούμενων εκτάσεων. Αυτό μπορεί να γίνει για παράδειγμα είτε με τεχνικές Kriging (για διερεύνηση της χωρικής μεταβολής διαφόρων παραμέτρων) είτε με τη μεθοδολογία της κλιμάκωσης (scaling) για τον προσδιορισμό της «μέσης» συμπεριφοράς του εδάφους μεγάλων σε έκταση περιοχών και των ακραίων ορίων της συμπεριφοράς αυτής.

Επιπλέον από την εργασία αυτή φαίνεται ότι η συνήθης πρακτική της θεώρησης των παραμέτρων θ_s και θ_r ως μετρήσιμων ποσοτήτων κατά τον προσδιορισμό της XKY ενός εδάφους με τη γνωστή εξίσωση Van Genuchten δε συνεισφέρει στην ακριβή περιγραφή της XKY. Προτείνεται λοιπόν η εισαγωγή και των δυο (ή τουλάχιστο μόνο της θ_r) σε διαδικασία ανάλυσης παλινδρόμησης ως παραμέτρων προσαρμογής, για την εύρεση των ορθών τους τιμών. Μια τέτοια διαδικασία με την υπολογιστική ισχύ των

σημερινών ηλεκτρονικών υπολογιστών είναι εξαιρετικά γρήγορη και για το λόγο αυτό θα πρέπει να προτιμάται.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Bouyoucos, G.J., 1962. Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils. *Agronomy J.* 54, 464-465.
2. Γεωργούσης, Χ., και Χ. Μπαμπατζιμόπουλος, 2000. «Στοχαστική μελέτη του υδατικού ισοζυγίου ενός καλλιεργούμενου εδάφους». *Πρακτικά του 2^{ου} Εθνικού Συνεδρίου Εταιρείας Γεωργικών Μηχανικών Ελλάδος (ΕΓΜΕ)*. Βόλος, 124-132.
3. Cassel and Nelson, 1985. D.K. Cassel and L.A. Nelson, Spatial and temporal variability of soil physical properties of Norfolk loamy sand as affected by tillage. *Soil Tillage Res.* 5, 5 – 17.
4. Hopmans, J. W. and E. Gutiérrez-Ravé, 1988. Calibration of root water uptake model in spatially variable soils. *J. of Hydrology.* 103, 53 – 65.
5. Klute, A., 1986. Water retention : Laboratory methods. In: *Methods of soil analysis. Part I, 2nd ed., A. Klute(ed)*, Agronomy 9, 635 – 662.
6. Luckner, L., M. Th. Van Genuchten and D.R. Nielsen, 1989. A consistent set of parametric models for the two – phase flow of immiscible fluids in the subsurface. *Water Resour. Res.* 25, 2187 – 2193.
7. Mallants, D, B.P. Mohanty, D. Jacques and J. Feyen, 1996. Spatial variability of hydraulic properties in a multi-layered soil profile. *Soil Sci.* 161(3), 167 – 181.
8. Mapa et al., 1986. R.B. Mapa, R.E. Green and L. Santo, Temporal variability of soil hydraulic properties with wetting and drying subsequent to tillage. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50, 1133 – 1138.
9. Marquardt, D.W., 1963. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *J. Soc. Ind. Appl. Math.* 11, 431 – 441.
10. Paz-González, A., Vieira, S.R. and Taboada Castro, M.T., 2000. The effect of cultivation on the spatial variability of selected properties of an umbric horizon. *Geoderma* 97, 273 – 292.
11. Stenger, R., Priesack, E. and Beese, F., 2002. Spatial variation of nitrate-N and related soil properties at the plot-scale. *Geoderma* 105, 259 – 275.
12. Trangmar, B.B., Yost, R.S. and Uehara, G., 1985. In: *Application of Geostatistics to Spatial Studies of Soil Properties*. Advances in Agronomy vol. 38, Academic Press, San Diego, 45 – 94.
13. Van Genuchten, M.Th., 1980. A Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils. *Soil Sci. Soc. Am.J.* 44, 892 – 898.
14. Van Genuchten, M.Th. and Nielsen D.R., 1985. On describing and predicting the hydraulic properties of unsaturated soil. *Ann. Geophys.* 3, 615 – 628.
15. Van Genuchten M. Th., F.J. Leij, S. R. Yates, 1991. The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils, USEPA Rep./600/2-91/065, R.S. Kerr Environ. Res. Lab., U.S. Environmental Protection Agency, Ada, OK, USA.
16. White, J.G., Welch, R.M. and Norvell, W.A., 1997. Soil zinc map of the USA using geostatistics and geographic information systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61, 185 – 194.
17. Yang, J.I., Mosby, D.E., Casteel, S.W. and Blanchar, R.W., 2001. Microscale pH variability for assessing of phosphoric acid treatment in lead-contaminated soil. *Soil Sci.* 66(6), 374 – 381.

ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΠΡΟΕΛΑΣΗΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΑΡΔΕΥΣΗ ΜΕ ΛΩΡΙΔΕΣ

Ι. Χατζησπύρογλου και Ε. Αναστασιάδου-Παρθενίου
Τομέας Εγγείων Βελτιώσεων, Εδαφολογίας και Γεωργικής Μηχανικής
Εργαστήριο Γενικής και Γεωργικής Υδραυλικής και Βελτιώσεων,
Τμήμα Γεωπονίας Α.Π.Θ., 54124 Θεσσαλονίκη, chatziio@agro.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή μελετάται η μη μόνιμη (ασταθής) ροή του νερού κατά τη φάση της προέλασής του σε αρδευτική λωρίδα. Στο φυσικό αυτό πρόβλημα επιφανειακής ροής του νερού με ταυτόχρονη πλευρική εκροή λόγω διήθησης, επιλύονται οι εξισώσεις της μη μόνιμης ροής, στην πλήρη υδροδυναμική μορφή τους, με εφαρμογή του ρητού υπολογιστικού σχήματος πεπερασμένων διαφορών του McCormack. Τα αποτελέσματα που πάρθηκαν συγκρίνονται με μετρήσεις που έγιναν κατά την προέλαση του νερού σε αρδευτική λωρίδα με καλλιέργεια μηδικής στη Χαλάστρα Θεσσαλονίκης το 2003 δίνοντας ικανοποιητικά αποτελέσματα.

HYDRODYNAMIC MODEL OF BORDER IRRIGATION-ADVANCE PHASE

I. I. Chatzispiloglou and E. Anastasiadou-Partheniou
Department of Hydraulics, Soil Science and Agricultural Engineering, School of
Agriculture, Aristotle University, 54124 Thessaloniki, Greece, chatziio@agro.auth.gr

ABSTRACT

In this paper the advance phase of border irrigation is studied using a hydrodynamic model based on McCormack's explicit finite-difference computational scheme. The unsteady flow equations with lateral outflow-infiltration in their complete form, are solved. Comparison of the computed results to measurements obtained during a border irrigation experiment at 2003 on an alfalfa field in Chalastra, Thessaloniki, showed satisfactory agreement.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Αντικείμενο της εργασίας αυτής είναι η θεωρητική και πειραματική μελέτη της προώθησης του νερού κατά την επιφανειακή άρδευση με λωρίδες, όπου έχουμε ταυτόχρονη εκροή λόγω διήθησης. Το πρόβλημα αυτό ακολουθεί τους νόμους της μη μόνιμης (ασταθούς) κίνησης του επιφανειακού νερού με πλευρική εκροή (διήθηση) και στηρίζεται στη μαθηματική επίλυση των εξισώσεων της ασταθούς ροής σε ανοικτούς αγωγούς με τραχέα και σταθερά τοιχώματα. Συγκεκριμένα επιλύονται οι εξισώσεις του Saint-Venant στην πλήρη συντηρητικού τύπου μορφή τους.

Η αναλυτική επίλυση των διαφορικών εξισώσεων του Saint-Venant για προβλήματα ασταθούς μονοδιάστατης ροής είναι δυνατή μόνο σε ελάχιστες και εξαιρετικά απλοποιημένες περιπτώσεις. Είναι επιβεβλημένη η αριθμητική επίλυσή τους με χρήση της μεθόδου των χαρακτηριστικών, των πεπερασμένων διαφορών ή των πεπερασμένων στοιχείων.

Οι αριθμητικές μέθοδοι πεπερασμένων διαφορών είναι οι πρώτες που εφαρμόστηκαν για την επίλυση προβλημάτων μελέτης της ασταθούς ροής σε ανοικτούς αγωγούς με ιδιαίτερη επιτυχία (Terzidis [1], Terzidis and Strelkoff [2]). Σύμφωνα με αυτές, οι παράγωγοι των διαφορικών εξισώσεων αντικαθίστανται με πηλίκια πεπερασμένων διαφορών, οπότε προκύπτουν μη γραμμικές συνήθειες αλγεβρικές εξισώσεις.

Το πρόβλημα της ασυνεχούς ασταθούς ροής του νερού σε ανοικτούς αγωγούς με ξηρό πυθμένα, όπως είναι η ροή που προκαλείται μετά τη θραύση φράγματος ή η ροή κατά τη διάρκεια άρδευσης με αυλάκια ή λωρίδες, έχει επιλυθεί αριθμητικά με ποικίλες μεθόδους πεπερασμένων διαφορών από διάφορους ερευνητές κατά καιρούς (Strelkoff [3], Sakkas and Strelkoff [4], Katopodes and Strelkoff [5-6], Μπέλλος [7], Playan et al [8], Strelkoff and Clemmens [9], Sakkas, Bellos and Klonaraki [10], Τερζίδης [11]). Μεταγενέστερα η ασταθής ροή του νερού κατά τη διάρκεια άρδευσης μελετήθηκε και με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (π.χ. Katopodes [12]).

Για τη μελέτη της επιφανειακής άρδευσης μετά την εφαρμογή της μεθόδου των χαρακτηριστικών (Sakkas and Strelkoff [4], Katopodes and Strelkoff [5]) στην πλήρη μορφή των εξισώσεων του Saint-Venant, αναπτύχθηκαν και μαθηματικά μοντέλα που βασίζονται σε απλοποιημένες μορφές τους. Τέτοια είναι, το μοντέλο μηδενικής αδράνειας ή διάχυσης, που αναπτύχθηκε από τους Strelkoff and Katopodes [13] και χρησιμοποιήθηκε μεταγενέστερα από τους Strelkoff and Clemmens [9], καθώς και από άλλους ερευνητές για τη μελέτη της επιφανειακής άρδευσης με λωρίδες, το μοντέλο κινηματικού κύματος, που έχει εφαρμοστεί για τη μελέτη άρδευσης με λωρίδες και τέλος το μοντέλο ισοζυγίου όγκου ή μέσου βάθους ροής, που εφαρμόστηκε σε άρδευση με λωρίδες από τους Strelkoff [14], Valiantzas [15] κ.α..

2. ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΑΣΤΑΘΟΥΣ ΡΟΗΣ ΣΕ ΑΓΩΓΟ ΜΕ ΞΗΡΟ ΠΥΘΜΕΝΑ

Η γενική μορφή των διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν τη μονοδιάστατη ασταθή ροή του νερού σε μη πρισματικό αγωγό με πλευρική εισροή (ή εκροή) είναι (Strelkoff [3]):

$$B \frac{\partial y}{\partial t} + VB \frac{\partial y}{\partial x} + A \frac{\partial V}{\partial x} + VA_x^y - I = 0 \quad (1)$$

και

$$\frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial x} + S_f + D_I = 0 \quad (2)$$

όπου y = το βάθος ροής, V = η μέση ταχύτητα της ροής, B = το πλάτος της ελεύθερης επιφάνειας, A = το εμβαδόν υγρής διατομής, $A_x^y = (\partial A / \partial x)_y$ συμβολίζει την απόκλιση της διατομής A από την πρισματική μορφή, I = η πλευρική παροχή ανά μονάδα μήκους (αρνητική για εκροή), g = η επιτάχυνση της βαρύτητας, $H = z + y + V^2/2g$, είναι το ολικό φορτίο της διατομής, z = το υψόμετρο του πυθμένα, D_I = ο παράγοντας που αντιπροσωπεύει πλευρικές εισροές ή εκροές και παίρνει την τιμή: $D_I = -VI/2gA$ για διήθηση (Strelkoff [3]), S_f = η κλίση της γραμμής ενεργείας λόγω τριβών ή κλίση αντιστάσεων, x = η απόσταση κατά μήκος του αγωγού και t = ο χρόνος.

Η εξίσωση (1) είναι η εξίσωση συνέχειας και εκφράζει την αρχή διατήρησης της μάζας και η εξίσωση (2) είναι η εξίσωση κίνησης και εκφράζει την αρχή διατήρησης της ποσότητας κίνησης (ή της αδράνειας).

Αν και δεν είναι γνωστή η ακριβής σχέση ανάμεσα στη κλίση τριβών S_f και στις χαρακτηριστικές μεταβλητές της ροής, είναι κοινή πρακτική στην υδραυλική των ανοικτών αγωγών να χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του S_f οι ημιεμπειρικές εξισώσεις του Manning ή του Chezy, για σταθερή ομοιόμορφη ροή. Η εξίσωση του Manning είναι:

$$S_f = \frac{n^2 Q^2}{A^2 R_U^{4/3}} \quad (3)$$

όπου n = ο συντελεστής τριβών κατά Manning, R_U = η υδραυλική ακτίνα ($R_U = A / P$), P = η περιβρεχόμενη περίμετρος και $Q = V \cdot A$ = η παροχή.

Ειδικότερα η ασταθής ροή, όταν είναι ασυνεχής, όπως συμβαίνει στην περιοχή του μετώπου προέλασης, διέπεται από τις συντηρητικού τύπου εξισώσεις του Saint-Venant για ορθογωνικό αγωγό με διήθηση (Τερζίδης [16]):

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = -I \quad (4)$$

και

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} + g \frac{y}{2} A \right) = gA(S_o - S_f) - \frac{V}{2} I \quad (5)$$

όπου επιπλέον S_o = η κλίση πυθμένα.

Πλεονέκτημα των εξισώσεων (4) και (5) σε σχέση με τις (1) και (2) είναι ότι μπορούν να εφαρμοστούν όχι μόνο σε συνεχή, αλλά και σε ροή με ασθενείς ασυνέχειες. Έτσι σε περίπτωση που προκύψει στο πεδίο της ροής κάποια ασυνέχεια, όπως το υγρό μέτωπο προώθησης του νερού στην άρδευση με λωρίδες, παρατηρείται μαζική απώλεια ενέργειας, οπότε εισάγεται σφάλμα στη λύση με εφαρμογή των εξισώσεων (1) και (2),

ενώ με τις εξισώσεις (4) και (5) εξασφαλίζεται σε μεγάλο βαθμό η διατήρηση της ποσότητας κίνησης.

3. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΕΠΙΛΥΣΗ - ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΣΧΗΜΑ McCORMACK

Από μαθηματική άποψη, οι διαφορικές εξισώσεις (4) και (5) αποτελούν ένα σύστημα δύο σχεδόν γραμμικών μερικών διαφορικών εξισώσεων, πρώτης τάξης και υπερβολικού τύπου. Στην εργασία αυτή εφαρμόζεται η αριθμητική του επίλυση με μέθοδο πεπερασμένων διαφορών που βασίζεται στο ρητό υπολογιστικό σχήμα του McCormack.

Το ρητό υπολογιστικό σχήμα McCormack είναι σχήμα δύο βημάτων (πρόβλεψης-διόρθωσης) με ακρίβεια δευτέρας τάξης. Εφαρμόζεται στη συντηρητική μορφή των εξισώσεων του Saint-Venant, έτσι ώστε να μπορεί να μελετά ροές με απότομες μεταβολές του βάθους και της παροχής, όπως συμβαίνει στην περιοχή του μετώπου και στα κινούμενα υδραυλικά άλματα. Οι απώλειες ενέργειας λόγω τριβών στον πυθμένα, που είναι σημαντικές λόγω της καλλιέργειας, υπολογίζονται από τον τύπο του Manning και θεωρείται ότι συμπεριλαμβάνουν όλες τις εσωτερικές αντιστάσεις.

Το σχήμα McCormack, αν στο βήμα πρόβλεψης χρησιμοποιήσει για τη χωρική παράγωγο τις πίσω πεπερασμένες διαφορές, τότε στο βήμα διόρθωσης πρέπει να χρησιμοποιήσει τις πρόσω πεπερασμένες διαφορές και αντίστροφα, οπότε προκύπτουν οι εναλλακτικές μορφές του. Στην υδραυλική ανοικτών αγωγών άρχισε να χρησιμοποιείται από το 1986 για την αριθμητική επίλυση των εξισώσεων του Saint – Venant (Fennema and Chaudhry [17], Dammuler et al. [18], Μπέλλος [7], Τερζίδης [11], Χατζηιωαννίδου [19], Γιακουμής και Μπέλλος, [20], Χατζησπύργου [21]). Οι δύο εναλλακτικές μορφές του υπολογιστικού σχήματος McCormack μπορούν να γραφούν με συνοπτική μητρώα μορφή ως εξής:

Βήμα πρόβλεψης:

$$W_k^{*n+1} = W_k^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left[(1 - \varepsilon) F_{k+1}^n - (1 - 2\varepsilon) F_k^n - \varepsilon F_{k-1}^n \right] + D_k^n \Delta t \quad (6)$$

Βήμα διόρθωσης:

$$W_k^{n+1} = \frac{1}{2} \left[W_k^n + W_k^{*n+1} - \frac{(\Delta t)}{(\Delta x)} \left[\varepsilon F_{k+1}^{*n+1} + (1 - 2\varepsilon) F_k^{*n+1} - (\varepsilon - 1) F_{k-1}^{*n+1} \right] + D_k^{*n+1} \Delta t \right] \quad (7)$$

$$\text{όπου } W = \begin{pmatrix} A \\ Q \end{pmatrix}, F = \begin{pmatrix} Q \\ \frac{Q^2}{A} + g \frac{y}{2} A \end{pmatrix} \text{ και } D = \begin{pmatrix} -I \\ gA(S_o - S_f) - \frac{V}{2} I \end{pmatrix}$$

Στις εξισώσεις (6) και (7) το ε παίρνει τις τιμές 0 και 1. Συγκεκριμένα όταν $\varepsilon=0$ οι (6) και (7) μετατρέπονται στις εξισώσεις της Α' εναλλακτικής μορφής, και όταν $\varepsilon=1$ δίνουν τις εξισώσεις της Β' μορφής. Εφόσον χρησιμοποιηθεί η μια μόνον εναλλακτική μορφή του μπορεί να επιφέρει ελαφρά παρέκκλιση στη λύση, λόγω της μονόπλευρης διαφορίσης (Τερζίδης [11]). Αυτή ακριβώς η αιτία έκανε αναγκαία τη χρησιμοποίηση και των δύο εναλλακτικών μορφών της μεθόδου, εναλλάξ, για κάθε νέο χρονικό βήμα Δt . Έρευνα στη διεθνή βιβλιογραφία (Chaudhry [22]) έδειξε ότι παίρνονται καλύτερα

αποτελέσματα αν η διεύθυνση της διαφόρισης στο βήμα της πρόβλεψης είναι ίδια με αυτή του μετώπου του κύματος.

Οι εξισώσεις που προκύπτουν από την εφαρμογή του σχήματος McCormack (με την Α' ή Β' μορφή ή και με την εναλλάξ χρησιμοποίηση αυτών) δίνουν τις τιμές των αγνώστων μεταβλητών A και Q στο άγνωστο επίπεδο του χρόνου n+1 για όλους τους εσωτερικούς κόμβους του υπολογιστικού δικτύου. Επιπλέον χρειάζονται και οι τιμές των αγνώστων στον αρχικό χρόνο (t=0) και στα όρια ανάντη και κατόντη, τα οποία κατά τη φάση της προώθησης (όσο και της αποχώρησης) δεν είναι σταθερά αλλά κινούνται.

Στην παρούσα εργασία, ενδιαφέρει η φάση της προώθησης του μετώπου, όπου στην πραγματικότητα ως αρχική συνθήκη υπάρχει ξηρός πυθμένας, δηλαδή $A(y,0)=0$ αφού $y(x,0)=0$ και $Q(x,0)=0$. Οι μηδενικές αυτές αρχικές τιμές ισχύουν σε όλο το μήκος της λωρίδας και περιορίζονται συνεχώς προς τα κατόντη, καθώς προωθείται το μέτωπο. Οπότε παρουσιάζονται σημαντικές υπολογιστικές δυσκολίες με το μηδενισμό πολλών παρονομαστών των εξισώσεων (4), (5), (6) και (7) στις περιοχές που δεν έχει φθάσει ακόμη το μέτωπο. Η δυσκολία των αρχικών μηδενικών βαθών ξεπεράστηκε με την παραδοχή ύπαρξης απειροελάχιστου αρχικού βάθους ροής. Ανάλογες παραδοχές έχουν γίνει και από τους Playan et al [8], Μπέλλο [7] και Τερζίδη [11], και έδειξαν ότι δεν υψιέρχεται πολύ μεγάλο σφάλμα στο ισοζύγιο της μάζας.

Στο ανάντη όριο, εφαρμόζεται ομοιόμορφα, σε όλο το πλάτος της λωρίδας, σταθερή παροχή άρδευσης (Q_{in}). Μετά από κάποιο χρόνο T_c η παροχή διακόπτεται και το βάθος του νερού μειώνεται σταδιακά, μέχρι να γίνει το βάθος στο ανάντη όριο ίσο με το μηδέν δηλαδή $y(0,t)=0$ (και $A(0,t)=0$), οπότε αρχίζει η φάση της αποχώρησης. Επομένως, για τη φάση της προώθησης, που μελετάται εδώ, οι ανάντη συνθήκες είναι: για $0 < t \leq T_c$, $Q(0,t) = Q_{in}$ και για $t > T_c$, $Q(0,t) = 0$. Στην περίπτωση του προβλήματος της άρδευσης με λωρίδες η ροή του νερού είναι βασικά υποκρίσιμη (όχι όμως κοντά στο μέτωπο). Επομένως, το βάθος ροής στο ανάντη όριο υπολογίζεται με διακριτοποίηση της πίσω χαρακτηριστικής εξίσωσης (C⁻) (Τερζίδης[16]):

$$\left[\frac{\partial Q}{\partial t} + (V - c) \frac{\partial Q}{\partial x} \right] - B(V + c) \left[\frac{\partial y}{\partial t} + (V - c) \frac{\partial y}{\partial x} \right] = gA \cdot (S_o - S_f) + I \left(\frac{V}{2} + c \right) \quad (8)$$

Για την περιοχή του μετώπου, που αποτελεί και το κατόντη όριο, το βάθος υπολογίζεται προσεγγιστικά από την εξίσωση του Manning, σύμφωνα με την άποψη του Witham (Sakkas and Strelkoff [4]), επιβεβαιωμένη και από παρατηρήσεις του, σύμφωνα με την οποία, στην περιοχή του μετώπου του κύματος η ταχύτητα ροής είναι αισθητά ομοιόμορφη και ο όρος της συνολικής επιτάχυνσης $\left[\left(\frac{\partial V}{\partial t} \right) + V \left(\frac{\partial V}{\partial x} \right) \right]$ είναι πεπερασμένος, ενώ η κλίση της επιφάνειας του νερού αυξάνει πολύ κατά τέτοιο τρόπο ώστε να αντισταθμίζει πρακτικά την μεγάλη αντίσταση τριβών. Σύμφωνα με την εξίσωση του Manning το S_f αυξάνει απεριόριστα όταν το βάθος ροής τείνει στο μηδέν, όπως συμβαίνει στο μέτωπο.

Στο κατόντη άκρο, όπου $x=L$ (μήκος λωρίδας), οι οριακές συνθήκες διαφοροποιούνται ανάλογα με το αν υπάρχει ανάχωμα στο τέλος της λωρίδας ή όχι. Εφόσον υπάρχει, όπως στη περίπτωση των εφαρμογών της παρούσας εργασίας, τότε η παροχή είναι ίση με μηδέν στο κατόντη άκρο, δηλαδή $Q(L,t)=0$ και το βάθος ροής $y(L,t)$, θα υπολογίζεται με διακριτοποίηση της πρόσω χαρακτηριστικής εξίσωσης (C⁺) για υποκρίσιμη ροή:

$$\left[\frac{\partial Q}{\partial t} + (V+c) \frac{\partial Q}{\partial x} \right] - B(V-c) \left[\frac{\partial y}{\partial t} + (V+c) \frac{\partial y}{\partial x} \right] = gA \cdot (S_o - S_f) + I \left(\frac{V}{2} - c \right) \quad (9)$$

Για να εξασφαλίζεται η ευστάθεια του ρητού υπολογιστικού σχήματος McCormack, πρέπει η επιλογή του βήματος χρόνου Δt , να ικανοποιεί τα κριτήρια ευστάθειας:

$$C_n = \frac{\Delta t}{\Delta x} (|V| + c) \leq 1 \quad (10)$$

όπου C_n είναι ο αριθμός Courant και

$$\Delta t \leq \frac{AR_U^{4/3}}{gn^2 Q} \quad (11)$$

Σύμφωνα με το Μπέλλο [7,10], ικανοποιητική ευστάθεια πετυχαίνεται με τιμές του αριθμού Courant $C_n \approx 0.8$. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η τιμή $C_n = 0.8$.

Σύμφωνα με την εξίσωση (11), που είναι το κριτήριο αδράνειας, το βήμα του χρόνου εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διατομής, την παροχή ροής και το συντελεστή τραχύτητας κατά Manning. Έτσι για μεγάλο συντελεστή τραχύτητας n (όπως σε επιφάνεια καλλιεργούμενου εδάφους) περιορίζεται σημαντικά το βήμα χρόνου και παίζει καθοριστικό ρόλο για την επιλογή του Δt το κριτήριο αδράνειας.

4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΑΡΔΕΥΤΙΚΗ ΛΩΡΙΔΑ

Για εφαρμογές σε αρδευτική λωρίδα ο παράγοντας I που αντιπροσωπεύει την ανά μονάδα μήκους του αγωγού εκροή λόγω διήθησης, είναι: $I = i \cdot \omega$, όπου i η ταχύτητα διήθησης (στιγμιαία διηθητικότητα), δηλαδή η ένταση με την οποία διηθείται το νερό σε ορισμένη στιγμή μετά από την έναρξη της διήθησης και ω είναι η βρεχόμενη περίμετρος. Στην περίπτωση λωρίδας, αυτή είναι ίση με το πλάτος της, από όπου λαμβάνει χώρα η εκροή (Sakkas and Strelkoff [4]). Στην εργασία αυτή υποθέτουμε ότι η μεταβολή της ταχύτητας διήθησης μπορεί να υπολογιστεί με βάση την εμπειρική εξίσωση του Kostiaikov, για μονοδιάστατη κατακόρυφη διήθηση.

Ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε εφαρμόστηκε για τη μελέτη της φάσης προέλασης του νερού σε αρδευτική λωρίδα καλλιέργειας μηδικής. Το πείραμα έγινε σε αγροτεμάχιο της περιοχής Χαλάστρας Θεσσαλονίκης τον Ιούλιο του 2003 με συμμετοχή και του Ινστιτούτου Διαχείρισης Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος (τέως IEB) Θεσσαλονίκης.

Λίγο πριν από το πείραμα προσδιορίστηκε η διηθητικότητα του υπό εξέταση εδάφους. Ένα έδαφος μέσης σύστασης ή συνεκτικότητας με φυλλοειδής μορφή ιλύος που λόγω των διατεταγμένων αλλεπάλληλων στρώσεων της περιόριζε σε ακόμη μεγαλύτερο βαθμό την κατακόρυφη κίνηση του νερού. Η μέτρηση της διηθητικότητας έγινε με τη συσκευή του διηθητόμετρου εφαρμογής αρδεύσεων του I.E.B. (Πανώρας [23]). Οι παρατηρήσεις της συσκευής χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των παραμέτρων της σχέσης αθροιστικής διηθητικότητας του Kostiaikov χρησιμοποιώντας τη μέθοδο

ελαχίστων τετραγώνων. Με αυτόν τον τρόπο υπολογίστηκε ότι η μέση αθροιστική διήθητικότητα για όλη τη λωρίδα δίνεται από τη σχέση:

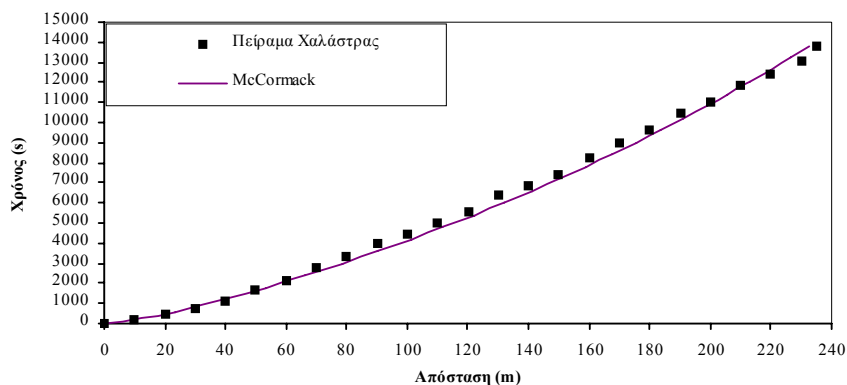
$$Z = 3.593 \cdot t^{0.491} \text{ σε mm} \quad (12)$$

Η εξίσωση (12) αποτελεί την προσεγγιστική σχέση του ύψους διήθησης (σε mm) σε όλη την επιφάνεια της λωρίδας. Παραγωγίζοντας, τη σχέση (12) ως προς το χρόνο, προέκυψε η σχέση της ταχύτητας διήθησης (σε mm/min ή mm/hr):

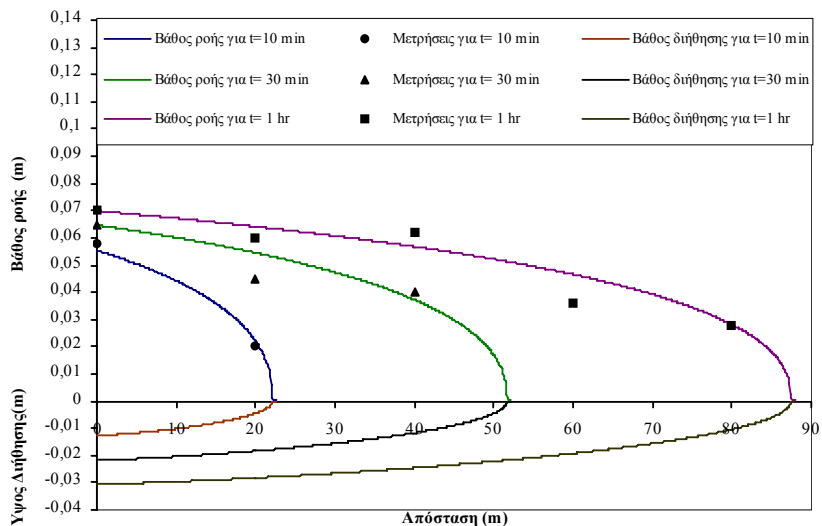
$$i = 2.008 \cdot t^{-0.509} \text{ σε mm/min} \quad \text{ή} \quad i = 120.5 \cdot t^{-0.509} \text{ σε mm/hr} \quad (13)$$

Για το πείραμα χρησιμοποιήθηκαν ξύλινοι πάσσαλοι ως σταθμοί παρατήρησης της προώθησης του νερού κατά μήκος της λωρίδας, αλλά και του βάθους της επιφανειακής ροής, αφού βαθμολογήθηκαν κατάλληλα με πολύχρωμες μεζούρες, μετά την έμπηξή τους στο έδαφος, για να μπορεί ο παρατηρητής να διαβάσει το ύψος του νερού σε κάθε θέση. Οι πάσσαλοι τοποθετήθηκαν ανά 10 m, ενώ επαρκούσε ένας παρατηρητής ανά 20 m. Έτσι με τη βοήθεια ενός κινούμενου παρατηρητή και δώδεκα σταθερών παρατηρητών καταφέραμε να έχουμε μετρήσεις τόσο του χρόνου προώθησης του μετώπου του κύματος ανά 10 m, όσο και μετρήσεις του βάθους ροής ανά 20 m. Με την άφιξη του μετώπου σε μια θέση, όλοι οι προηγούμενοι της θέσης αυτής παρατηρητές σημείωναν το βάθος ροής στην θέση παρατήρησής τους. Έτσι μπορούσαμε να έχουμε πειραματικές μετρήσεις της καμπύλης προώθησης σε κάθε χρόνο. Αυτή η διαδικασία συνεχίστηκε μέχρι την άφιξη του υγρού μετώπου στο κατάντη άκρο της λωρίδας στα 235 m.

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αγωγού και οι αρχικές συνθήκες δίνονται στη συνέχεια (Χατζησπύρογλου [21]). Ο αγωγός είναι αρδευτική λωρίδα καλλιέργειας μηδικής, πλάτους πυθμένα $B=23$ m. Με χρήση χωροβάτη μετρήθηκε και βρέθηκε η μέση κατά μήκος κλίση της επιφάνειας του εδάφους ίση με 0.02724 %, δηλαδή: $S_0 = 0.0002724$. Στην είσοδο του αγωγού εφαρμόστηκε, σε όλη τη φάση της προώθησης, σταθερή παροχή $Q_{in}=0.042$ m³/sec. Η σταθερή παροχή νερού στον χωμάτινο ανοικτό αγωγό (λωρίδα) σταμάτησε τη στιγμή της άφιξης του υγρού μετώπου στο κατάντη άκρο. Ο μέσος όρος της κορεσμένης υδραυλικής αγωγιμότητας, για δύο θέσεις μέτρησης κατά μήκος της λωρίδας με το υδροπερατόμετρο Guelph, βρέθηκε ίσος με $K_s = 6.805 \cdot 10^{-6}$ m/sec. Τέλος, για την εφαρμογή της εξισώσεως του Manning, εκτιμήθηκε, με βάση την πυκνότητα της καλλιέργειας, την κατάσταση της επιφάνειας του εδάφους και τη βιβλιογραφία, ο συντελεστής τριβής $n=0.15$.



Σχήμα 1. Σύγκριση υπολογιστικών και πειραματικών δεδομένων για την προέλαση του υγρού μετώπου.



Σχήμα 2. Σύγκριση του υπολογισμένου βάθους ροής με τα πειραματικά δεδομένα σε 3 χρονικές στιγμές και υπολογισμένο βάθος διήθησης.

Στους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκε μικρό χωρικό βήμα $\Delta x=0,1$ m και έγινε παραδεκτό ένα πολύ μικρό αρχικό βάθος ροής του νερού $Y_0=0,00005$ m. Στο Σχήμα 1 συγκρίνονται οι υπολογισμένες τιμές της προέλασης του υγρού μετώπου με τις αντίστοιχες μετρήσεις του πειράματος της Χαλάστρας. Στο Σχήμα 2 συγκρίνονται οι υπολογισμένες τιμές του βάθους του νερού με τις αντίστοιχες μετρημένες για τρεις διαφορετικές χρονικές στιγμές από τη στιγμή έναρξης του φαινομένου, και επίσης φαίνονται τα υπολογισμένα βάθη διηθούμενου νερού.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκε αλγόριθμος κατάλληλος για επίλυση μονοδιάστατης ασταθούς ροής σε ορθογωνικό αγωγό με πλευρική εκροή-διήθηση. Ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε βασίζεται στο ρητό υπολογιστικό σχήμα McCormack, το οποίο είναι δύο βημάτων, με ακρίβεια δεύτερης τάξης, τόσο ως προς το χώρο όσο και ως προς το χρόνο, και είναι κατάλληλο για την πρόβλεψη ροών με ασυνέχειες όπως τα υδραυλικά άλματα και τα κινούμενα μέτωπα νερού. Ο αλγόριθμος είναι σχετικά απλός, χαρακτηριστικό των ρητών σχημάτων και το χρονικό βήμα εκτέλεσης των υπολογισμών δεν επιβάλλεται ως σταθερό, αλλά υπολογίζεται αυτόματα με βάση τα κριτήρια ευστάθειας, και μεταβάλλεται με την πάροδο του χρόνου.

Για τον έλεγχο και την αξιολόγηση της υπολογιστικής διαδικασίας πραγματοποιήθηκε πειραματική εφαρμογή στο ύπαιθρο σε αρδευτική λωρίδα με καλλιέργεια μηδικής. Η σύγκριση, που αφορούσε την προέλαση του υγρού μετώπου αλλά και τη μεταβολή του βάθους ροής με το χρόνο και την απόσταση, κρίνεται ικανοποιητική. Επίσης υπολογίστηκε το βάθος του διηθούμενου νερού συναρτήσει του χρόνου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Terzidis, G.A., 1968. «Discontinuous unsteady flow in open channel», Ph. D. Thesis, University of California, Davis.
2. Terzidis, G.A., and Strelkoff, T.S., 1970. «Computational of open-channel surges and shocks», », J. Hydraul. Div., Proc. ASCE, 96(12): 2581.
3. Strelkoff, T.S., 1970. «Numerical solution of Saint-Venant equations», J. Hydraul. Div., ASCE, 96: 223-252.
4. Sakkas, J.G., and Strelkoff, T., 1974. «Hydrodynamics of surface irrigation-advance phase», J. Irrig. Drain. Div., ASCE, 100: 31-48.
5. Katopodes, N.D., and Strelkoff, T., 1977a. «Hydrodynamics of border irrigation-complete model», J. Irrig. Drain. Div., ASCE, 103: 309-324.
6. Katopodes, N.D., and Strelkoff, T., 1977b. «Dimensionless solution of border irrigation advance», J. Irrig. Drain. Div., ASCE, 103: 401-417.
7. Μπέλλος, Κ.Β., 1989. «Υπολογισμός Διδιάστατης Κινήσεως του Νερού σε Ανοικτούς Αγωγούς», Διδακτορική Διατριβή, Δ.Π.Θ., Ξάνθη
8. Playan, E., Walker, W.R., and Merkle, G.P., 1994. «Two-dimensional simulation of basin irrigation. I: Theory», J. Irrig. Drain. Eng., ASCE, 120(5): 837-856.
9. Strelkoff, T.S., and Clemmens, A.J., 1994. «Dimensional analysis in surface irrigation», J. Irrig. Science., 15: 57-82.
10. Sakkas, J.G., Bellos C.V. and Klonaraki M.N., 1994. «Numerical computation of surface irrigation», J. Irrig. Science., 15: 83-99.
11. Τερζίδης, Γ.Α., 1999. «Υπολογιστικό Σχήμα McCormack – Θεωρία και Εφαρμογές σε Προβλήματα Υπερβολικού και Παραβολικού Τύπου», Μεταπτυχιακές Διδακτικές Σημειώσεις Π.Μ.Σ. Ειδίκευσης Γεωργικής Μηχανικής και Υδατικών Πόρων, Θεσσαλονίκη.
12. Katopodes, N.D., 1994. «Hydrodynamics of surface flow: vertical structure of the surge front», J. Irrig. Science., 15: 101-111.
13. Strelkoff, T. and Katopodes, N.D., 1977. «Border irrigation hydraulics with zero inertia», J. Irrig. Drain. Div., ASCE, 103: 325-342.
14. Strelkoff, T., 1977. «Algebraic computational of flow in border irrigation», J. Irrig. Drain. Div., ASCE, 103: 357-377.

15. Valiantzas, J.D., 1997. «Volume balance irrigation advance equation: Variation of surface shape factor », *J. Irrig. Drain. Eng.*, ASCE, 123: 307-312.
16. Τερζίδης, Γ.Α., 1982. «Μαθήματα Υδραυλικής – 3. Ανοικτοί Αγωγοί», Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
17. 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.
18. Dammuler, D.C., Bhamudi, S.M. and Chaudhry, M.H., 1989. «Modeling of unsteady flow in curved channel», *J. Hydraul. Eng.*, ASCE, 115(11): 1479-1945.
19. Χατζιωαννίδου, Α.Χ., 1998. «Διόδευση Πλημμύρας με το Υπολογιστικό Σχήμα του McCormack», Μεταπτυχιακή Διατριβή, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη
20. Γιακουμής, Α., Μπέλλος Κ., 2003. «Υπολογισμός πλημμυρικών ροών σε ανοιχτούς αγωγούς», Πρακτικά 9^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης, Σελ. 87-96, Θεσσαλονίκη.
21. Χατζησπύρογλου, Ι.Ι., 2004. «Μελέτη της Κίνησης του Νερού σε Χωμάτινο Ανοικτό Αγωγό και της Διήθησης του στο Έδαφος», Μεταπτυχιακή Διατριβή, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη.
22. Chaudhry, M.H., 1993. «Open-Channel Flow», Prentice-Hall, Inc.
23. Πανώρας, Α., 1987. «Διήθηση-Τρόποι Μέτρησης», Θεσσαλονίκη.

ΡΗΤΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΣΥΖΥΓΩΝ ΒΑΘΩΝ ΥΔΡΑΥΛΙΚΟΥ ΑΛΜΑΤΟΣ ΣΕ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ

Γεώργιος Α. Τερζίδης και Μαρία Δ. Μπαντή
Τομέας Εγγείων Βελτιώσεων, Εδαφολογίας και Γεωργικής Μηχανικής
Εργαστήριο Γενικής και Γεωργικής Υδραυλικής και Βελτιώσεων
Τμήμα Γεωπονίας Α.Π.Θ., 54124 Θεσσαλονίκη, mbanti@netscape.net

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία αυτή παρουσιάζει συνοπτικά μία ρητή μέθοδο υπολογισμού των συζυγών βαθών υδραυλικών αλμάτων σε ανοικτούς αγωγούς ορθογωνικής διατομής, η οποία βασίζεται σε αυστηρή μαθηματική και αριθμητική ανάλυση του συστήματος δύο αρχικών μη γραμμικών εξισώσεων, που συνδέουν τα δύο συζυγή βάθη με την ειδική παροχή, $q=Q/B$, και το ύψος απωλειών ενέργειας, E_L . Οι τελικές εξισώσεις υπολογισμού, που προκύπτουν και χρησιμοποιούνται εδώ, είναι ρητές εξισώσεις μίας αδιάστατης παραμέτρου, f_L , η οποία υπολογίζεται από τα δεδομένα του προβλήματος. Η μέθοδος αυτή ισχύει για μεγάλο εύρος της παραμέτρου $f_L > 0$, έχει μέσο σφάλμα της τάξης 0.0001% και οι υπολογισμοί μπορούν να γίνουν και με αριθμομηχανή χειρός.

EXPLICIT METHOD FOR CALCULATING CONJUGATE DEPTHS OF HYDRAULIC JUMPS IN RECTANGULAR CHANNELS

George A. Terzidis and Maria D. Banti
Department of Hydraulics, Soil Science and Agricultural Engineering
School of Agriculture
Aristotle University of Thessaloniki

ABSTRACT

This paper presents an explicit method to calculate the conjugate depths of hydraulic jumps in rectangular open channel flow, using rigorous mathematical and numerical analysis of the governing non linear equations, in which the two depths are functions of the specific discharge, q and the energy loss, E_L . The final equations of the calculation are explicit functions of the nondimensional parameter, f_L , which can be computed from the problem's data. This method is valid over a large range of parameter $f_L > 0$, has a mean error of the order of 0.0001% and the calculation can be performed even by hand calculator.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα υδραυλικά άλματα είναι εντυπωσιακά τοπικά φαινόμενα της υδραυλικής των ανοικτών αγωγών, τα οποία σχηματίζονται οποτεδήποτε η ροή αναγκάζεται να αλλάξει από υπερκρίσιμη σε υποκρίσιμη κατάσταση. Ανάλογα με την ένταση της ειδικής παροχής ($q=Q/B$) ή καλύτερα με την τιμή του αριθμού Froude (Fr_1) της υπερκρίσιμης ροής, η μετάβαση στην υποκρίσιμη ροή γίνεται με απότομη ανύψωση της επιφάνειας του νερού με έντονο τυρβώδες, δίνες και στροβιλισμούς, που συνοδεύονται από αφρούς και φυσαλίδες αέρα και συνήθως καταστρέφουν σημαντικές ποσότητες κινητικής ενέργειας. Επωφελούμενοι από αυτές τις χαρακτηριστικές ιδιότητές τους, τα υδραυλικά άλματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την καταστροφή πλεονάζουσας κινητικής ενέργειας, για την ανάμιξη χημικών ουσιών ή για τον αερισμό και οξυγόνωση του νερού.

Τα πιά απλά και περισσότερο μελετημένα υδραυλικά άλματα είναι αυτά των οριζόντιων ορθογωνικών αγωγών. Έχουν γίνει πάρα πολλές θεωρητικές και πειραματικές μελέτες και έρευνες από διάφορους ανά τον κόσμο ερευνητές για να προσδιοριστούν οι χαρακτηριστικές ιδιότητες αυτών των αλμάτων και να προταθούν απλούστερες και ακριβέστερες μέθοδοι επίλυσης διαφόρων πρακτικών προβλημάτων [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8].

Τα τελευταία δέκα χρόνια έχει αναζωπυρωθεί το ενδιαφέρον των ερευνητών για τη μελέτη και έρευνα τέτοιων τοπικών φαινομένων καταστροφής ενέργειας, όπως είναι η ροή πάνω από υπερχειλιστή και ελεύθερο καταβαθμό, κάτω από θυρίδες και θυροφράγματα, καθώς και η μελέτη των σχετικών λεκανών ηρεμίας και εγκλωβισμού των υδραυλικών αλμάτων.

Οι νεώτερες αυτές μελέτες και έρευνες αποσκοπούν στην εξεύρεση νέων μεθόδων επίλυσης σχετικών προβλημάτων των υδραυλικών αλμάτων, κυρίως στο στάδιο του σχεδιασμού υδραυλικών έργων με δεδομένα την παροχή Q , το πλάτος πυθμένα B , την κατά μήκος κλίση πυθμένα S_0 και το φορτίο ή ύψος απώλειας ενέργειας στην περιοχή του υδραυλικού άλματος. Αγνωστα και ζητούμενα είναι τα συζυγή βάθη y_1 και y_2 και το μήκος του υδραυλικού άλματος L . Τα προβλήματα αυτά δεν έχουν ή δεν έχει βρεθεί ακόμη αναλυτική κλειστή λύση.

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται συνοπτικά μία ρητή μέθοδος υπολογισμού των συζυγών βαθών υδραυλικών αλμάτων σε ανοικτούς αγωγούς ορθογωνικής διατομής, η οποία βασίζεται σε αυστηρή μαθηματική και αριθμητική ανάλυση του συστήματος δύο αρχικών μη γραμμικών εξισώσεων, που συνδέουν τα δύο συζυγή βάθη με την ειδική παροχή, $q=Q/B$, και το ύψος απωλειών ενέργειας, E_L , ύστερα από το μετασχηματισμό τους σε αδιάστατες μορφές. Οι τελικές εξισώσεις υπολογισμού των αδιάστατων βαθών, που προκύπτουν και χρησιμοποιούνται εδώ, είναι ρητές εξισώσεις μίας αδιάστατης παραμέτρου, $f_L=E_L/(q^2/g)^{1/3}$, η οποία υπολογίζεται από τα δεδομένα του προβλήματος.

2. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Εφαρμόζοντας τις εξισώσεις σταθερής ροής συνέχειας και ποσότητας κίνησης, μεταξύ των διατομών (1) ανάντη και (2) κατόντη του υδραυλικού άλματος, σε οριζόντιο ορθογωνικό αγωγό, λαμβάνεται [2, 3, 4]:

$$\frac{Q^2}{gB^2} = \frac{q^2}{g} = \frac{1}{2} y_1 y_2 (y_1 + y_2) \quad (1)$$

όπου $q=Q/B=$ ειδική παροχή ανά μονάδα πλάτους (m^3/sm), $B=$ πλάτος πυθμένα (m), $g=$ επιτάχυνση βαρύτητας (m/s^2), y_1 και y_2 είναι τα συζυγή βάρη ανάντη και κατάντη του υδραυλικού άλματος.

Εφαρμόζοντας τις εξισώσεις συνέχειας και ειδικής ενέργειας μεταξύ των διατομών (1) και (2) και χρησιμοποιώντας την Εξ.(1), λαμβάνεται:

$$E_L = E_1 - E_2 = (y_1 + \frac{q^2}{2gy_1^2}) - (y_2 + \frac{q^2}{2gy_2^2}) = \frac{(y_2 - y_1)^3}{4y_1 y_2} \quad (2)$$

Στην εξαγωγή των Εξ.(1) και (2) χρησιμοποιήθηκαν οι παραδοχές:

- 1) Οι ταχύτητες $V_1=Q/By_1$ και $V_2=Q/By_2$ είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες.
- 2) Οι δυνάμεις πίεσης $P_1=\gamma y_1^2/2$ και $P_2=\gamma y_2^2/2$ έχουν υδροστατική κατανομή.
- 3) Οι δυνάμεις αντίστασης λόγω τριβής στα τοιχώματα του αγωγού είναι αμελητέες.
- 4) Οι απώλειες ενέργειας μεταξύ των διατομών (1) και (2) οφείλονται μόνο στις τριβές των δινών και στροβιλισμών του υδραυλικού άλματος.

Οι Εξ. (1) και (2) αποτελούν ένα αλγεβρικό σύστημα δύο εξισώσεων και τεσσάρων αγνώστων q , y_1 , y_2 και E_L , επειδή θεωρείται δεδομένη η τιμή της επιτάχυνσης βαρύτητας g . Για να έχει λύση το σύστημα αυτό πρέπει να είναι γνωστές οι δύο από τις τέσσερις μεταβλητές, με τέσσερις πιθανούς συνδυασμούς: α) (y_1, y_2), β) (q, y_1), γ) (q, y_2), δ) (q, E_L). Ο πρώτος συνδυασμός με γνωστά τα συζυγή βάρη y_1 και y_2 έχει το πλεονέκτημα ότι κάνει ρητές και τις δύο εξισώσεις και έτσι υπολογίζονται αμέσως οι άλλες δύο μεταβλητές q και E_L . Οι άλλοι δύο συνδυασμοί (β) και (γ) έχουν το πλεονέκτημα να γίνονται οι μετρήσεις μόνον από τη μία πλευρά του άλματος, ανάντη ή κατάντη, επειδή καθιστούν ρητή την Εξ. (1) ως δευτεροβάθμια αλγεβρική εξίσωση του άλλου βάρους y_2 ή y_1 , αντίστοιχα και στη συνέχεια υπολογίζεται η τιμή της E_L από την Εξ.(2).

Όλοι οι παραπάνω συνδυασμοί προϋποθέτουν την ύπαρξη σταθερού υδραυλικού άλματος και ότι είναι προσβάσιμη και εύκολη η μία τουλάχιστον θέση των μετρήσεων ανάντη ή και κατάντη του άλματος.

Ο τέταρτος συνδυασμός με άγνωστα και τα δύο συζυγή βάρη, y_1 και y_2 , είναι ο πιο δύσκολος, επειδή το σύστημα των εξισώσεων (1) και (2) είναι μη γραμμικό και πεπλεγμένο και δεν έχει ή δεν έχει βρεθεί ακόμη κλειστή αναλυτική λύση. Έχει όμως το πλεονέκτημα ότι, δεν απαιτείται υποχρεωτικά η ύπαρξη του υδραυλικού άλματος για μετρήσεις, επειδή η παροχή Q μπορεί να προσδιορισθεί είτε από υδρολογικές μεθόδους ή από τις ανάγκες των προς άρδευση ή ύδρευση περιοχών, ενώ η απώλεια ενέργειας E_L και το πλάτος B προσδιορίζονται από τη γεωμορφολογία της περιοχής προς αποφυγή διαβρώσεων ή και απόθεση φερτών υλικών.

Διαιρώντας την Εξ.(1) δια y_c^3 και την Εξ.(2) δια y_c , εισάγοντας τις αδιάστατες μεταβλητές:

$$p_1=y_1/y_c, p_2=y_2/y_c \text{ και } f_L=E_L/y_c \text{ και τον αριθμό Froude } Fr_c^2=q^2/gy_c^3=1 \quad (3)$$

και εκτελώντας τις σχετικές αλγεβρικές πράξεις, λαμβάνεται [6] :

$$p_1 p_2 (p_1 + p_2) = 2 \quad (4)$$

$$f_L = \frac{(p_2 - p_1)^3}{4 p_1 p_2} \quad (5)$$

Οι Εξ.(4) και (5) αποτελούν σύστημα δύο μη γραμμικών εξισώσεων με δύο αγνώστους (p_1 και p_2), που είναι πεπλεγμένες συναρτήσεις μίας παραμέτρου, της $f_L = E_L / y_c = E_L / (q^2/g)^{1/3}$, η οποία συνδυάζει και τα δύο δεδομένα του προβλήματος (E_L και q). Η Εξ.(4) μπορεί να λυθεί με το γνωστό τύπο της δευτεροβάθμιας αλγεβρικής εξίσωσης για οποιαδήποτε άγνωστη μεταβλητή (p_2 ή p_1), όταν θεωρηθεί γνωστή η άλλη, π.χ.

$$p_2 = \frac{1}{2}(-p_1 + \sqrt{p_1^2 + \frac{8}{p_1}}) = \frac{1}{2p_1}(-p_1^2 + \sqrt{p_1^4 + 8p_1}) \quad (6)$$

Από τις Εξ.(5) και (6) λαμβάνεται:

$$f_L = \frac{1}{16p_1^2} \left[-p_1^6 + 20p_1^3 + 8 - (p_1^4 + 8p_1)^{3/2} \right] \quad (7)$$

Η Εξ.(7) δίνει τη σχέση μεταξύ του αδιάστατου βάθους p_1 ανάντη του άλματος και της αδιάστατης παραμέτρου $f_L = E_L / y_c$ της απώλειας φορτίου, λόγω του τυρβώδους και των στροβιλισμών του άλματος. Προφανώς η Εξ.(7) είναι πεπλεγμένη και μη γραμμική ως προς p_1 , ενώ είναι ρητή ως προς f_L .

Χρησιμοποιώντας διάφορες τιμές του p_1 με μικροαυξήσεις κατά 0.01 στο εύρος $0.11 \leq p_1 \leq 0.70$, υπολογίζονται οι αντίστοιχες τιμές της f_L και οι τιμές αυτές σχεδιάζονται σε ημιλογαριθμικό χαρτί με την f_L στη λογαριθμική κλίμακα. Η γραμμή, που προκύπτει από τα σημεία των ζευγών (p_1, f_L) μπορεί να χωριστεί σε πέντε ευθύγραμμα τμήματα, στα οποία εφαρμόζεται η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων και λαμβάνονται οι παρακάτω προσεγγιστικές εξισώσεις με τα αντίστοιχα όρια ισχύος τους.

α) Για ασθενή άλματα με χαμηλή απώλεια ενέργειας, με όρια $0.08 < f_L \leq 0.2306$ ή $1.71 < Fr_1 < 2.15$:

$$p_{10} = 0.462328 - 0.094809 \ln f_L \quad (8a)$$

β) Για μέτρια μεταβατικά έως καλά μόνιμα άλματα, με όρια $0.2306 < f_L < 2.767$ ή $2.15 < Fr_1 < 5.52$:

$$p_{10} = 0.43558 - 0.113916 \ln f_L \quad (8b)$$

γ) Για ισχυρά μόνιμα και αποτελεσματικά άλματα, με όρια $2.767 < f_L < 6.784$ ή $5.52 < Fr_1 < 9.07$:

$$p_{10} = 0.421145 - 0.100487 \ln f_L \quad (8c)$$

δ) Για πολύ ισχυρά και πιο αποτελεσματικά άλματα, με όρια $6.784 < f_L < 15.09$ ή $9.07 < Fr_1 < 14.92$:

$$p_{10} = 0.384728 - 0.081422 \ln f_L \quad (8d)$$

ε) Για πάρα πολύ ισχυρά και πολύ 'άγρια και θορυβώδη' άλματα, με όρια $15.1 \leq f_L < 31.9$ ή $14.9 \leq Fr_1 < 24.7$:

$$p_{10} = 0.332417 - 0.062097 \ln f_L \quad (8e)$$

Να σημειωθεί ότι υδραυλικά άλματα με $Fr_1 > 13$ είναι πολύ 'άγρια και θορυβώδη' με στροβιλισμούς, που καθιστούν δύσκολες τις συνθήκες εγκλωβισμού και η κατασκευή των λεκανών ηρεμίας τους είναι πολύ δαπανηρή (Henderson, 1966, p.218).

Οι προσεγγιστικές εξισώσεις (8a), (8b), (8c), (8d) και (8e) προσεγγίζουν τις ακριβείς τιμές p_1 με % σφάλμα μικρότερο της μισής μονάδας. Οι ίδιες εξισώσεις, μπορεί να λεχθεί ότι, περιγράφουν και τους τύπους των υδραυλικών αλμάτων, που προέκυψαν από τα πειραματικά δεδομένα διαφόρων ερευνητών [5]. Για μικρότερη ακρίβεια, δηλαδή για προσέγγιση των τιμών της p_1 με % σφάλμα μικρότερο της μονάδας οι περίπου αντίστοιχες προσεγγιστικές εξισώσεις περιορίζονται σε τρεις [Γερζίδης, 2005]. Γράφοντας την Εξ.(7) με τη συναρτησιακή μορφή:

$$F(p_1) = 16f_L p_1^2 + p_1^6 - 20p_1^3 - 8 + (p_1^4 + 8p_1)^{3/2} = 0 \quad (9)$$

και εφαρμόζοντας την αριθμητική μέθοδο των Newton-Raphson [9, 10] λαμβάνεται:

$$p_{1k+1} = p_{1k} - \frac{F(p_{1k})}{F'(p_{1k})} = \frac{16f_L p_{1k}^2 + 5p_{1k}^6 - 40p_{1k}^3 + 8 + (5p_{1k}^4 + 4p_{1k})\sqrt{p_{1k}^4 + 8p_{1k}}}{32f_L p_{1k} + 6p_{1k}^5 - 60p_{1k}^2 + 6(p_{1k}^3 + 2)\sqrt{p_{1k}^4 + 8p_{1k}}} \quad (10)$$

όπου $k=0, 1, 2, 3, \dots$

Για την πρώτη τιμή $k=0$ η Εξ.(10) δίνει την τιμή της p_{11} :

$$p_{11} = \frac{16f_L p_{10}^2 + 5p_{10}^6 - 40p_{10}^3 + 8 + (5p_{10}^4 + 4p_{10})\sqrt{p_{10}^4 + 8p_{10}}}{32f_L p_{10} + 6p_{10}^5 - 60p_{10}^2 + 6(p_{10}^3 + 2)\sqrt{p_{10}^4 + 8p_{10}}} \quad (11)$$

όπου p_{10} είναι η αρχική τιμή της p_1 , που λαμβάνεται από τις Εξ.(8) και p_{11} είναι η πρώτη προσεγγιστική τιμή της p_1 , η οποία έχει ακρίβεια της τάξης του $10^{-4}\%$ και θεωρείται πολύ ικανοποιητική.

Χρησιμοποιώντας την τιμή p_{11} της Εξ.(11) στην Εξ.(6) και θέτοντας $p_2=p_{21}$, λαμβάνεται:

$$p_{21} = \frac{1}{2} \left(-p_{11} + \sqrt{p_{11}^2 + \frac{8}{p_{11}}} \right) \quad (12)$$

Από τις Εξ.(11), (12) και (5) λαμβάνεται:

$$f_{Lc} = \frac{(p_{21} - p_{11})^3}{4p_{11}p_{21}} \quad (13)$$

Η Εξ.(13) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να επιβεβαιώσει την ακρίβεια των υπολογισμών και να εκτιμήσει το % σχετικό σφάλμα:

$$\% \text{ σφάλμα} = \left(\frac{f_L - f_{Lc}}{f_L} \right) \cdot 100 \quad (14)$$

Ο υπολογισμός του μήκους υδραυλικού άλματος μπορεί να γίνει μόνο με εμπειρικές εξισώσεις, που βασίζονται σε πολλές πειραματικές μετρήσεις. Όμως η μέτρηση του μήκους L του υδραυλικού άλματος είναι η πιο δύσκολη επειδή δεν είναι σταθερές οι θέσεις των διατομών (1) και (2) ανάντη και κατόντη του άλματος. Με διάφορες τεχνικές και την πείρα, που απέκτησαν οι σχετικοί ερευνητές, θεωρούνται ικανοποιητικές οι διαδοχικές μετρήσεις, που διαφέρουν μεταξύ τους λιγότερο από 5% [1, 4]. Οι Bradley and Peterka [5] σχεδίασαν τα πειραματικά τους στοιχεία από έξι διαφορετικούς ορθογωνικούς αγωγούς με δύο τρόπους α) L/y_1 ως συνάρτηση του Fr_1 και β) L/y_2 ως συνάρτηση πάλι του Fr_1 . Άλλοι ερευνητές χρησιμοποίησαν και τρίτο τρόπο γ) $L/(y_2 - y_1)$ ως συνάρτηση του Fr_1 . Στα διαγράμματά τους αυτά και από τη διασπορά των πειραματικών σημείων, φαίνεται ως καλύτερη η πρώτη σχέση από ότι η δεύτερη και η τρίτη. Επειδή όμως η δεύτερη σχέση είναι πιο απλή για τα πιο συνηθισμένα υδραυλικά άλματα υιοθετήθηκε και χρησιμοποιείται το πειραματικό διάγραμμα της δεύτερης σχέσης καθώς και η εξίσωση [3, 4, 5]:

$$L = 6y_2, \quad \text{για } 4.5 < Fr_1 < 14 \quad (15)$$

Ο Silvester (1964) [7] προτείνει την εξίσωση:

$$L = 9.75y_1(Fr_1 - 1)^{1.01}, \quad \text{για } 3 < Fr_1 < 10 \quad (16)$$

Ο Hager (1991) [13, 3] προτείνει την εξίσωση:

$$\frac{L}{y_1} = 220 \tanh\left(\frac{Fr_1 - 1}{22}\right) \quad (17)$$

Στην εργασία αυτή προτείνονται οι παρακάτω εξισώσεις ως πιά απλές και πιά ακριβείς στα πειραματικά δεδομένα:

$$\frac{L}{y_1} = 10.0381(Fr_1 - 1)^{0.9885}, \quad \text{για} \quad 2 < Fr_1 < 6.75 \quad (18a)$$

$$\frac{L}{y_1} = 11.4446(Fr_1 - 1)^{0.9131}, \quad \text{για} \quad 6.75 \leq Fr_1 \leq 12 \quad (18b)$$

$$\frac{L}{y_1} = 15.7416(Fr_1 - 1)^{0.7804}, \quad \text{για} \quad 12 < Fr_1 \leq 17.5 \quad (18c)$$

$$\frac{L}{y_1} = 24.219(Fr_1 - 1)^{0.6267}, \quad \text{για} \quad 17.5 < Fr_1 \leq 23 \quad (18d)$$

Όλες οι παραπάνω εξισώσεις είναι εμπειρικές και βασίστηκαν κυρίως στα πειραματικά στοιχεία των Bradley and Peterka και μερικώς στα πειραματικά των Bakhmeteff και Silvester [7]. Οι Ινδοί ερευνητές Chaurasia (2003) [11] και Swamee and Rathie (2004) [12] χρησιμοποίησαν τις σχέσεις $L=5(y_2-y_1)$ και $L=6(y_2-y_1)$, αντίστοιχα, οι οποίες όμως είχαν προταθεί προηγουμένως από τους Bakhmeteff (1932) και Smetana (1934) [7].

3. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Η παρούσα μέθοδος εφαρμόστηκε αναλυτικά σε τέσσερα παραδείγματα, πρόσφατα δημοσιευμένα σε έγκυρο διεθνές επιστημονικό περιοδικό, με τη χρήση υπολογιστή τσέπης και με επιτραπέζιο υπολογιστή. Τα αποτελέσματα αυτών των παραδειγμάτων καθώς και άλλων παραδειγμάτων παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 1, όπου φαίνεται και η ακρίβεια της μεθόδου. Ομοια είναι και η ακρίβεια των αποτελεσμάτων σε δέκα παραδείγματα των αξιόπιστων πειραματικών δεδομένων των Bradley and Peterka για διάφορους αριθμούς Froude ($Fr_1=2.17$ έως 19.55), που καλύπτουν όλους τους τύπους των υδραυλικών αλμάτων σε οριζόντιους ορθογωνικούς αγωγούς. Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται μόνον τέσσερα παραδείγματα πειραματικών για μεγάλους αριθμούς Fr_1 ($=5.81, 12.61, 15.87$ και 19.58)

Συγκρίνοντας τις τρεις ρητές αυτές μεθόδους από τα αποτελέσματά τους, εύκολα διαπιστώνεται η υπεροχή της παρούσας μεθόδου τόσο για την ακρίβεια των αποτελεσμάτων της όσο και για την απλότητά της. Η μέθοδος του Chaurasia (2003), όπως δημοσιεύτηκε, φαίνεται ότι γράφτηκε με κάποια προχειρότητα, επειδή περιέχει σημαντικά τυπογραφικά και ουσιαστικά σφάλματα σε ορισμένες εξισώσεις της και τα σφάλματα των υπολογισμών της είναι πολύ μεγάλα και απαράδεκτα. Αντίθετα, η μέθοδος των Swamee and Rathie (2004) δίνει ακριβή αποτελέσματα για μικρούς αριθμούς Froude αλλά δεν είναι και τόσο ακριβής για μεγάλους αριθμούς Froude, όπως δείχνει και η δική τους ακρίβεια στα αποτελέσματα του δεύτερου παραδείγματός τους, που έχει σφάλμα % μεγαλύτερο του 3% (Τερζίδης 2005).

Πίνακας 1. Λύσεις Προβλημάτων άλλων ερευνητών Chaurasia [8], Swamee [12] και συγκρίσεις

	Ερευνητές και δεδομένα προβλήματος			
	Swamee 1	Swamee 2	Chaurasia 1	Chaurasia 2
Παροχή, q (m^2/s)	7.000000	1.710000	10.000000	1.700000
Βαρύτητα, g (m/s^2)	9.800000	9.800000	9.800000	9.800000
Απώλειες ενέργειας, E_L	0.950000	2.100000	1.630000	2.500000
E_{ξ} . (3), $y_c=$	1.709976	0.668224	2.168992	0.665616
E_{ξ} . (3), $f_L=$	0.555563	3.142659	0.751501	3.755918
E_{ξ} . (8a, b, c, d, e), $p_{10}=$	0.502537	0.306080	0.468124	0.288167
E_{ξ} . (11), $p_{11}=$	0.503738	0.306299	0.468960	0.287580
E_{ξ} . (12), $p_{21}=$	1.756552	2.406739	1.843917	2.497281
E_{ξ} . (13), $f_{Lc}=$	0.555564	3.142657	0.751501	3.755902
E_{ξ} . (3), $y_{11}=$	0.861380	0.204676	1.017171	0.191418
E_{ξ} . (3), $y_{21}=$	3.003662	1.608241	3.999441	1.662231
E_{ξ} . (2), $E_{Lc}=$	0.950001	2.099999	1.629999	2.499990
E_{ξ} . (1), $q_c=$	7.000000	1.710000	10.000000	1.700000
$Fr_1 = q / y_{11} (gy_{11})^{1/2}$	2.80	5.90	3.11	6.48
$(q-q_c)/q*100=$	2.538E-14	2.597E-14	3.553E-14	3.918E-14
$(E_L-E_{Lc})/E_{Lc}*100=$	-1.469E-04	4.959E-05	5.575E-05	4.177E-04

Πίνακας 2. Λύσεις Πειραματικών Προβλημάτων Bradley and Peterka [5] διαφόρων τύπων υδραυλικών αλμάτων ($Fr_1=5.81$ έως 19.55)

	Δεδομένα προβλήματος			
Παροχή, q (m^2/s)	0.075716	0.185800	0.093646	0.061966
Βαρύτητα, g (m/s^2)	9.814560	9.814560	9.814560	9.814560
Απώλειες ενέργειας, E_L	0.254810	1.765400	1.59654	1.663800
E_{ξ} . (3), $y_c=$	0.083593	0.152080	0.096317	0.073138
E_{ξ} . (3), $f_L=$	3.048234	11.608326	16.575905	22.748657
E_{ξ} . (8a, b, c, d, e), $p_{10}=$	0.309146	0.185104	0.158052	0.138395
E_{ξ} . (11), $p_{11}=$	0.309557	0.184597	0.158375	0.137648
E_{ξ} . (12), $p_{21}=$	2.391751	3.200559	3.475324	3.743602
E_{ξ} . (13), $f_{Lc}=$	3.048229	11.608234	16.575833	22.747960
E_{ξ} . (3), $y_{11}=$	0.025877	0.028074	0.015254	0.010067
E_{ξ} . (3), $y_{21}=$	0.199933	0.486743	0.334732	0.273801
E_{ξ} . (2), $E_{Lc}=$	0.254810	1.765386	1.596533	1.663749
E_{ξ} . (1), $q_c=$	0.075716	0.185800	0.093646	0.061966
$Fr_1 = q / y_{11} (gy_{11})^{1/2}$	5.81	12.61	15.87	19.58
$(q-q_c)/q*100=$	1.833E-14	-2.988E-14	-4.446E-14	-3.359E-14
$(E_L-E_{Lc})/E_{Lc}*100=$	1.710E-04	7.899E-04	4.350E-04	3.064E-03

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- 1) Η εργασία αυτή παρουσιάζει μία νέα ρητή μέθοδο υπολογισμού των συζυγών βαθών y_1 και y_2 του υδραυλικού άλματος σε ορθογωνικούς οριζόντιους αγωγούς, όταν δίνονται μόνον η ειδική παροχή q και το ύψος απωλειών ενέργειας E_L . Χρησιμοποιώντας τις αδιάστατες μεταβλητές της Εξ.(3), οι αρχικές Εξ.(1) και (2) μετασχηματίζονται στις Εξ.(6) και (7), οι οποίες με τη βοήθεια της αριθμητικής ανάλυσης Newton-Raphson λύνονται με τις ρητές Εξ.(8), (11) και (12). Η ακρίβεια της μεθόδου ελέγχεται με τις Εξ.(13) και (14) και βρέθηκε ότι είναι της τάξης 0.0001%.
- 2) Το μήκος του άλματος L μπορεί να υπολογιστεί με τις εμπειρικές Εξ.(18a, b, c, d) για το εύρος: $2 < Fr_1 < 24$, που περιλαμβάνουν σχεδόν όλα τα δημοσιευμένα πειραματικά δεδομένα και έχει ικανοποιητική ακρίβεια.
- 3) Η μέθοδος αυτή συγκρίθηκε με διάφορες άλλες παλιές και νέες μεθόδους και με πολλά πειραματικά παραδείγματα και βρέθηκε ότι υπερέρχει σημαντικά (Βλέπε π.χ. Πίνακες 1 και 2).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Chow, V.T., 1959. Open-Channel Hydraulics. McGraw-Hill Book Co. New York.
2. Henderson, F.M., 1966. Open-Channel Flow. Macmillan. New York.
3. Chaudhry, M.H., 1993. Open-Channel Flow. Prentice Hall. New Jersey.
4. Τερζίδης, Γ.Α., 1997. Εφαρμοσμένη Υδραυλική. Ζήτη. Θεσσαλονίκη.
5. Bradley, J.N. and Peterka, A.J., 1957. The Hydraulic Design of Stilling Basins. J. of the Hydraulics Div., Proc. ASCE, 83 (HY5) No. 1401(1-24).
6. Swamee, P.K., 1970. Sequent Depths for Irrigation Canals. J. Irrig. Power, 27(1), 45-61.
7. Silvester, R., 1964. Hydraulic Jump in All Shapes of Horizontal Channels. J. of the Hydraulics Div., Proc. ASCE, 90 (HY1), 23-55.
8. Rajaratnam, N., 1967. Hydraulic Jumps. Advances in Hydroscience. Edit. by Chow Ven Te. Academic Press. New York.
9. Μπαμπατζιμόπουλος, Χρ., 1999. Αριθμητική Ανάλυση. Γιαχούδης-Γιαπούλης. Θεσσαλονίκη.
10. Atkinson, K.E., 1978. An Introduction to Numerical Analysis. John Wiley. New York.
11. Chaurasia, S.R., 2003. Direct Equations for Hydraulic Jump Elements. J. Irrig. and Drain. Eng. (ASCE). 129(4), 291-294.
12. Swamee, P.K. and Rathie, R.N., 2004. Exact Solutions for Sequent Depth Problem. J. Irrig. and Drain. Eng. (ASCE). 130(6), 520-522.
13. Hager, W.H., 1991. Energy Dissipators and Hydraulic Jump. Kluwer Academic. Dordrecht. The Netherlands.
14. Terzidis, G.A., 2005. Discussion of 'Exact Solutions for Sequent Depths Problem' by Swamee and Rathie [12] (In Press).

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΟΥ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ΚΑΙ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΤΗΣ ΛΙΜΝΗΣ ΒΟΛΒΗΣ

Ι. Γιαννοπούλου*, Δ. Παπαμιχαήλ* και Β. Αντωνόπουλος*

* Α.Π.Θ. - Τμήμα Γεωπονίας, Σχολή Γεωτεχνικών Επιστημών, 54124, Θεσσαλονίκη
e-mail: igiannop@agro.auth.gr, papamich@agro.auth.gr, vasanton@agro.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η υδρολογική λεκάνη Μυγδονίας, στην Κεντρική Μακεδονία, αποτελείται από δύο υπολεκάνες, της λίμνης Κορώνειας (Λαγκαδά ή Αγ. Βασιλείου) και της λίμνης Βόλβης. Η λίμνη Κορώνεια παρουσιάζει έντονα και αυξανόμενα προβλήματα ισοζυγίου νερού και ποιοτικής υποβάθμισης. Ανάλογα προβλήματα, αλλά σε πολύ μικρότερο βαθμό παρουσιάζει και η λίμνη Βόλβη τα οποία πρέπει να αντιμετωπιστούν. Στην εργασία αυτή γίνεται προσπάθεια εκτίμησης του υδατικού ισοζυγίου της λίμνης και περιγραφής της ποιοτικής της κατάστασης. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης αυτής επιτρέπουν τον καθορισμό των πιθανών αιτιών της υποβάθμισης της λίμνης και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το σχεδιασμό της αποτελεσματικής διαχείρισης της λίμνης και της υδρολογικής της λεκάνης σύμφωνα με την Οδηγία 2000/60 και το Ν.3199/2003.

ASSESSMENT OF WATER BALANCE AND WATER QUALITY OF VOLVI LAKE IN CENTRAL MACEDONIA

J. Giannopoulou*, D. Papamichail* and V. Antonopoulos*

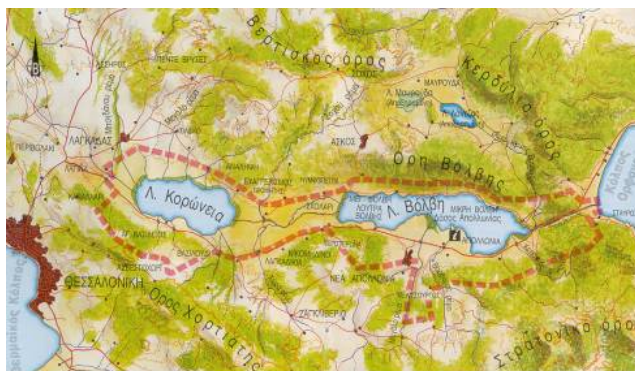
* School of Agriculture, Aristotle University, 54124 Thessaloniki, Greece
e-mail: igiannop@agro.auth.gr, papamich@agro.auth.gr, vasanton@agro.auth.gr

ABSTRACT

Koronia and Volvi are lakes in the area of Mygdonia basin of Central Macedonia, Greece. Koronia lake suffers from serious problems related to water quantity and quality. Volvi lake shows corresponding problems but less than those in Koronia lake. This paper deals with the Volvi's lake water balance estimation and water quality description. The results of this analysis allow the identification of the possible causes lake's degradation and offer a better understanding in the design of the effective water management in the lake and its hydrological basin according to the Directives (2000/60/EEC and N.3199/2003).

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η υδρολογική λεκάνη Μυγδονίας, που βρίσκεται στο υδατικό διαμέρισμα 10 (Κεντρική Μακεδονία), αποτελείται από δύο υπολεκάνες, της λίμνης Κορώνειας (Λαγκαδά ή Αγ. Βασιλείου) και της λίμνης Βόλβης, οι οποίες αποτελούν σύμφωνα με: (α) Τη διεθνή σύμβαση Ramsar: «Υγροβιότοπο Διεθνούς Σημασίας». (β) Την Οδηγία 69/409/ΕΟΚ: «Ειδικά Προστατευόμενη Περιοχή (SPA)». (γ) Την Οδηγία 92/43/ΕΟΚ: «Περιοχή Κοινοτικού Ενδιαφέροντος (SCI)» και (δ) Τη Διεθνή Σύμβαση της Βαρκελώνης: «Ειδικά Προστατευόμενη Περιοχή». Οι δύο λίμνες μαζί με το ρέμα Δερβένι, που παλιότερα αποφόρτιζε τη λίμνη Κορώνεια στη λίμνη Βόλβη και το Ρήγιο ποταμό, που αποφορτίζει τη λίμνη Βόλβη στον κόλπο του Ορφανού αποτελούν ένα ενιαίο υδρολογικό σύστημα (Σχήμα 1).



Σχήμα 1. Τοπογραφικό διάγραμμα της ευρύτερης περιοχής στην οποία ανήκει η λεκάνη της Μυγδονίας

Ανάλογα με τη λίμνη Κορώνεια προβλήματα υδατικού ισοζυγίου και ποιοτικής υποβάθμισης υπάρχουν και στη λίμνη Βόλβη χωρίς να έχει δοθεί ιδιαίτερη σημασία σε αυτά, ίσως λόγω των σοβαρότερων προβλημάτων, που αντιμετωπίζει η λίμνη Κορώνεια. Όμως, τα προβλήματα της λίμνης Βόλβης πρέπει να τύχουν της κατάλληλης προσοχής και αντιμετώπισης πριν και η λίμνη Βόλβη ακολουθήσει την τύχη της Κορώνειας.

Κατά το παρελθόν, η λεκάνη Μυγδονίας αποτέλεσε αντικείμενο μελέτης πολλών ερευνητών. Για παράδειγμα, η BRGM [1] εξέτασε τη δυνατότητα χρήσης των υδάτινου δυναμικού της λεκάνης Μυγδονίας για την ύδρευση της Θεσσαλονίκης. Ο Ψιλοβίκος [2] μελέτησε τη στρωματογραφική εξέλιξη της λεκάνης Μυγδονίας. Ο Βαφειάδης [3] μελέτησε τα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης Μυγδονίας. Οι Mercier et al. [4] πραγματοποίησαν τεκτονικές μελέτες σχετικά με τα ενεργά ρήγματα της λεκάνης της Μυγδονίας. Οι Βεράνης και Κατιρτζόγλου [5] ασχολήθηκαν με τις υδρογεωλογικές συνθήκες της λεκάνης Μυγδονίας. Οι Karavokiris et al. [6] στα πλαίσια του Master Plan για την περιβαλλοντική αποκατάσταση της λίμνης Κορώνειας εξέτασαν και τις υδρογεωλογικές-υδροχημικές συνθήκες της λεκάνης Μυγδονίας. Η ερευνητική ομάδα που συντάξε το επιχειρησιακό σχέδιο αποκατάστασης της λίμνης Κορώνειας [7] εξέτασε μεταξύ των άλλων και το υδατικό ισοζύγιο της υπολεκάνης της Βόλβης.

Τα θέματα που εξετάζονται στην παρούσα εργασία είναι η μελέτη του υδατικού ισοζυγίου και της ποιότητας του νερού της λίμνης Βόλβης, η διερεύνηση των αιτιών

που οδηγούν στην υποβάθμιση αυτής και προτάσεις για τη λήψη μέτρων για τη διάσωσή της.

2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η περιοχή μελέτης είναι η λίμνη Βόλβη ($\varphi=40^{\circ} 41'$ και $\lambda=23^{\circ} 20'$), η οποία είναι ο φυσικός αποδέκτης του μεγαλύτερου τμήματος των αποστραγγιζόμενων νερών της ομώνυμης λεκάνης (Σχήμα 1). Ο χειμάρρος Δερβένι ενώνει τις δύο λίμνες και λειτουργεί ως αποστραγγιστική τάφρος εκφορτίζοντας τα πλεονάζοντα νερά της λίμνης Κορώνειας στη λίμνη Βόλβη. Ένα άλλο αξιόλογο υδατόρευμα της λεκάνης της Βόλβης είναι ο Ρήχιος ποταμός, ο οποίος εκφορτίζει τα πλεονάζοντα νερά της ομώνυμης λίμνης στη θάλασσα και συγκεκριμένα, στον κόλπο του Ορφανού (Σχήμα 1).

Η λίμνη Βόλβη έχει σχήμα επίμηκες, το μήκος της μεγαλύτερης πλευράς της είναι 19,5 km και έχει διεύθυνση Α-Δ. Το πλάτος της κυμαίνεται μεταξύ ενός ελαχίστου 2 km και ενός μεγίστου 5,5 km. Σημειώνεται ότι με τις συνεχείς αποθέσεις, η λίμνη στο απώτερο μέλλον προβλέπεται ότι θα χωριστεί σε δύο ξεχωριστές λίμνες δηλαδή στην Ανατολική και στη Δυτική Βόλβη [3, 8]. Η επιφάνεια της στάθμης των νερών της λίμνης ήταν σε ύψος 37 m (έτος 1970) πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Τα βάθη της λίμνης κυμαίνονται συνήθως από 10 έως 23,5 m.

Οι επιπτώσεις από τις συνεχιζόμενες προσχώσεις των χειμάρρων που εκβάλλουν στη Βόλβη είναι ότι η επιφάνεια της λίμνης υφίσταται προοδευτική μείωση της έκτασής της. Στη μείωση αυτή έχει συμβάλει, επίσης, και η μικρή σχετικά εκβάθυνση της κοίτης του Ρήχιου ποταμού, ο οποίος διοχετεύει τα νερά της λίμνης Βόλβης στη θάλασσα.

3. ΥΔΑΤΙΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΤΗΣ ΛΙΜΝΗΣ

Το υδατικό ισοζύγιο μιας λίμνης σε ετήσια βάση εκφράζεται από μία γενική σχέση, η οποία εξισώνει τις συνολικές εισροές στη λίμνη με τις συνολικές εκροές από αυτή και τη μεταβολή του αποθηκευμένου όγκου νερού της λίμνης [9]. Η εξίσωση αυτή της οποίας όλοι οι όροι εκφράζονται σε μονάδες ύψους νερού και η οποία περιγράφει στην πραγματικότητα την αρχή της διατήρησης της μάζας είναι [9]:

$$P + RO + GW_{in} = E + RT + RS + GW_{out} \pm DS \quad (1)$$

όπου: P = η βροχόπτωση που πέφτει απευθείας στην επιφάνεια της λίμνης, RO = οι επιφανειακές εισροές νερού από τα υδατορεύματα που εκβάλλουν στη λίμνη και η απευθείας επιφανειακή απορροή, G_{win} = οι εισροές του νερού από τους υπόγειους υδροφορείς, E = η εξάτμιση από την επιφάνεια της λίμνης, RT =η επιφανειακή εκροή είτε είναι φυσική είτε τεχνητή διαμέσου τάφρων ή εκχειλιστών, RS = οι αντλήσεις νερού από τη λίμνη, G_{wout} = οι εκροές (απώλειες) νερού από τη λίμνη προς τους υπόγειους υδροφορείς και DS = η μεταβολή του αποθηκευμένου όγκου νερού της λίμνης.

Συνήθως, το υδατικό ισοζύγιο μιας λίμνης υπολογίζεται σε ετήσια βάση, έτσι ώστε να δίνεται μία γενική εικόνα των μεταβολών, που συμβαίνουν στη λίμνη από έτος σε έτος. Μερικές φορές, όμως, είναι χρήσιμη η εποχιακή ή και η μηνιαία μελέτη του υδατικού ισοζυγίου.

Αν είναι γνωστές όλες οι παράμετροι της σχέσης (1), που αφορούν σε μια συγκεκριμένη λίμνη και μάλιστα, για μια σειρά ετών, τότε με τη βοήθεια της εξίσωσης αυτής μπορεί να βρεθεί η κυριότερη αιτία της ποσοτικής υποβάθμισης της λίμνης, οπότε, στη συνέχεια, μπορούν να ληφθούν και τα κατάλληλα μέτρα για την αναβάθμισή της.

Στη βιβλιογραφία έχουν παρουσιαστεί αρκετές εργασίες στις οποίες χρησιμοποιείται η εξίσωση του υδατικού ισοζυγίου για τον προσδιορισμό και τη λύση προβλημάτων ποσοτικών ή ακόμη και ποιοτικών, που εμφανίζονται σε λίμνες. Ενδεικτικά, αναφέρονται οι εργασίες των Αντωνόπουλου κ.α [10], οι οποίοι μελέτησαν τα προβλήματα του ισοζυγίου νερού της λίμνης Βεγορίτιδας, των Αντωνόπουλου και Γιαννιού [11], οι οποίοι μελέτησαν το ισοζύγιο νερού και αλάτων της λίμνης Κορώνειας, των Barbieri and Mosselo [12], οι οποίοι μελέτησαν το ισοζύγιο της μάζας σε λίμνες αλπικού υψομέτρου, των Asmar and Ergenzonger [13], οι οποίοι παρουσίασαν μια δυναμική προσομοίωση του υδατικού ισοζυγίου της Νεκράς Θάλασσας στο Ισραήλ, του Rimer [14], ο οποίος μελέτησε τον μηχανισμό της αλμυροποίησης (salinization) της λίμνης Kinneret του Ισραήλ κ.λπ.

3.1. Βροχόπτωση

Η περιοχή της λεκάνης Μυγδονίας δεν διαθέτει σήμερα κανένα μετεωρολογικό και υδρομετρικό σταθμό. Κατά το παρελθόν λειτούργησαν κάποιοι σταθμοί για ορισμένα χρονικά διαστήματα με την ευθύνη του ΥΠ.ΓΕ. και του Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε. στα πλαίσια εκπόνησης διαφόρων μελετών [3]. Για παράδειγμα, το έτος 1970 ο Οργανισμός Ύδρευσης Θεσσαλονίκης ανέθεσε στην εταιρεία ΕΜΥΘΕΜ Ε.Π.Ε. μια μελέτη για να εξεταστεί η δυνατότητα ύδρευσης της πόλης της Θεσσαλονίκης από τις λίμνες Κορώνεια και Βόλβη. Η εταιρεία αυτή εγκατέστησε σταθμούς που λειτούργησαν κατά το χρονικό διάστημα 1970-79 στην Αρέθουσα, στη Νέα Απολλωνία, στο Ζαγκλιβέρι, στη Ρεντίνα και στο Σοχό που ανήκουν στη λεκάνη της Βόλβης και στη Νικόπολη, στο Λαγκαδά και στον Αγ. Βασίλειο. Όμως, στα όρια της λεκάνης Μυγδονίας, με τόσα περιβαλλοντικά προβλήματα δεν λειτουργεί τα τελευταία χρόνια κανένας μετεωρολογικός, αλλά ούτε και υδρομετρικός σταθμός με αποτέλεσμα να μην υπάρχουν μετεωρολογικά δεδομένα.

Λόγω της έλλειψης άμεσων μετεωρολογικών μετρήσεων έχει γίνει, κατά το παρελθόν, προσπάθεια συμπλήρωσης των μετεωρολογικών στοιχείων των σταθμών της ΕΜΥΘΕΜ της περιόδου 1970-1979 και της επέκτασής τους μέχρι το 1992 με συσχέτιση με τα αντίστοιχα στοιχεία της ίδιας χρονικής περιόδου του σταθμού του Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης [15].

Στην παρούσα εργασία δεν επεκτάθηκαν και πέραν του 1992 οι χρονοσειρές των μετρήσεων των σταθμών της ΕΜΥΘΕΜ [15] εξαιτίας του ότι αφενός είναι επισφαλής μια τέτοια για πολλά χρόνια επέκταση και αφετέρου η επέκταση είναι χωρίς νόημα, αφού υπάρχει σοβαρή έλλειψη μετρήσεων για τις υπόλοιπες συνιστώσες του υδατικού ισοζυγίου της λίμνης Βόλβης. Για τους λόγους αυτούς, στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν τα συσχετισμένα στοιχεία των μηνιαίων υψών βροχής της ΑΝ.Ε.Ν.Θ. [15] των σταθμών που βρίσκονται μέσα στα όρια της λεκάνης της Βόλβης (και του σταθμού του Αγ. Βασιλείου).

3.2. Εξάτμιση

Στην περιοχή της λεκάνης της Βόλβης έχουν γίνει μετρήσεις εξάτμισης με εξατμισόμετρο στο σταθμό της Νέας Απολλωνίας για το χρονικό διάστημα 1970-75, οι οποίες παρουσιάζουν ελλείψεις για τους μήνες Ιανουάριο και Φεβρουάριο του έτους 1974-75, ενώ για τη λεκάνη της Κορώνειας υπάρχει πλήρης σειρά μετρήσεων με εξατμισόμετρο για την περίοδο 1970-78 [15].

Προκειμένου να συμπληρωθούν οι μετρήσεις του σταθμού της Νέας Απολλωνίας που λείπουν κατά το υδρολογικό έτος 1974-75 και να επεκταθούν οι χρονοσειρές του σταθμού της Νέας Απολλωνίας μέχρι το υδρολογικό έτος 1977-78 υπολογίστηκαν με τη

μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, οι διπλές αθροιστικές μηνιαίες καμπύλες εξάτμισης ανάμεσα στους δύο σταθμούς. Από τις καμπύλες αυτές και με γνωστά τα στοιχεία για το σταθμό Αγ. Βασιλείου προσδιορίστηκαν τα αντίστοιχα στοιχεία, που λείπουν για το σταθμό της Νέας Απολλωνίας. Οι συντελεστές προσδιορισμού (R^2) ήταν όλοι μεγαλύτεροι από 0.93, τιμή που θεωρείται πολύ ικανοποιητική.

3.3 Επιφανειακές και υπόγειες εισροές από τη λίμνη Κορώνεια

Η λίμνη Βόλβη επικοινωνεί με τη λίμνη Κορώνεια διαμέσου του ρέματος του Δερβενίου. Όμως, το μέσο βάθος της λίμνης Κορώνειας κατά τη χρονική περίοδο 1985-1995 ήταν συνέχεια μικρότερο από το υψόμετρο του εκχειλιστή αποστράγγισης προς τη λίμνη Βόλβη (+75 m), οπότε δεν υπήρχε επιφανειακή εκροή από τη μία λίμνη στην άλλη διαμέσου του ρέματος Δερβενίου [11]. Από έρευνες που έχουν γίνει από την BRGM [1] διαπιστώθηκε ότι δεν υπάρχει, ούτε υπόγεια, αλλά ούτε επιφανειακή επικοινωνία νερού μεταξύ των λεκανών Κορώνειας και Βόλβης.

3.4 Εκροές προς τη θάλασσα

Όπως αναφέρθηκε, ο Ρήχιος ποταμός διοχετεύει τα νερά της Βόλβης διαμέσου της κοιλάδας της Ρεντίνας προς το Στρυμονικό κόλπο (κόλπος Ορφανού). Σήμερα δεν γίνονται συστηματικές μετρήσεις της παροχής του Ρήχιου ποταμού. Κατά το παρελθόν, μετρήσεις είχε κάνει η ΕΜΥΘΕΜ [15] για λογαριασμό του Ο.Υ.Θ. για το χρονικό διάστημα 1969-79. Η μέγιστη παροχή του ποταμού έλαβε χώρα τον μήνα Απρίλιο του έτους 1969-70, ενώ η μέση τιμή των παροχών για το χρονικό διάστημα 1969-79 ανήλθε σε $0.96 \text{ m}^3/\text{s}$. Σημειώνεται ότι κατά τον υπολογισμό της ανωτέρω μέσης τιμής δεν ελήφθη υπόψη το υδρολογικό έτος 1973-74, γιατί για το έτος αυτό έγιναν μετρήσεις μόνο το μήνα Σεπτέμβριο. Επίσης, διαπιστώνεται ότι υπήρξαν την περίοδο αυτή χρονικά διαστήματα, που ο Ρήχιος ποταμός δεν είχε ροή τουλάχιστον στη θέση των μετρήσεων, ενώ οι μέσες παροχές του ποταμού μειώνονταν με το χρόνο σημαντικά. Συγκεκριμένα, ενώ η μέση τιμή της παροχής ήταν $2.35 \text{ m}^3/\text{s}$ κατά το έτος 1969-70 κατά τα τρία τελευταία έτη των μετρήσεων ήταν 0.02 , 0.01 και $0.09 \text{ m}^3/\text{s}$.

Μετρήσεις της παροχής του Ρήχιου ποταμού έχουν γίνει και από την ΥΕΒ κατά το χρονικό διάστημα 1983-1987 στη θέση του φράγματος χελιών [3]. Από τις μετρήσεις αυτές διαπιστώνονται ότι:

- ♦ Από τον Αύγουστο μέχρι το Δεκέμβριο του 1985, ο Ρήχιος ποταμός δεν είχε ροή στη θέση των μετρήσεων λόγω της ασυνήθιστα μεγάλης πτώσης της στάθμης της λίμνης Βόλβης, που συνέβη από την παρατεταμένη ανομβρία του έτους αυτού.
- ♦ Κατά το διάστημα 1987-1988 το ποτάμι παρουσίαζε συνεχή ροή.
- ♦ Η μέγιστη παροχή που μετρήθηκε ήταν $5,05 \text{ m}^3/\text{s}$ (Απρίλιος 1987).
- ♦ Οι παροχές του Ρήχιου ποταμού, που μετρήθηκαν για το διάστημα 1983-87 (μέση ετήσια παροχή $0.816 \text{ m}^3/\text{s}$), υπολειπόντουσαν σημαντικά των παροχών της περιόδου 1969-79 της ΕΜΥΘΕΜ [15] (μέση ετήσια παροχή $0.96 \text{ m}^3/\text{s}$)

Ο Ιωσηφίδης [16] εκτίμησε ότι οι ποσότητες του νερού που διέρχονται από την στενωπό της Ρεντίνας για να καταλήξουν στη θάλασσα ανέρχονται σε 5×10^5 και $3 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{έτος}$. Σημειώνεται ότι στους περαιτέρω υπολογισμούς του ο Ιωσηφίδης [16] θεωρεί ως «λογικότερη τιμή» την τιμή αυτή των $5 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{έτος}$ χωρίς να δίνει πληροφορίες με βάση ποια κριτήρια κατέληξε στο συμπέρασμα αυτό. Στην παρούσα εργασία θεωρήθηκε σκόπιμο να ληφθεί η μέση τιμή των ποσοτήτων αυτών δηλαδή $0.50 \times (500.000 + 3.000.000) = 1.750.000 \text{ m}^3/\text{έτος}$, επειδή οι δύο ανωτέρω εκτιμήσεις του Ιωσηφίδη [16] αφορούν στην αρχή και στο μέσο της στενωπού της Ρεντίνας.

3.5. Αντλήσεις νερού από τη λίμνη

Οι αντλήσεις για την ύδρευση οικισμών, όπως και για τη βιομηχανία δε λήφθηκαν υπόψη, γιατί αφενός μεν είναι αμελητέες και αφετέρου, το αντλούμενο νερό επιστρέφει κατά το μεγαλύτερο μέρος του, στη λίμνη, μέσω των συστημάτων αποχέτευσης. Οι σημαντικότερες απώλειες ύδατος της λίμνης από ανθρωπογενείς δραστηριότητες οφείλονται στην άρδευση, καθώς το μεγαλύτερο μέρος του αρδευτικού νερού χάνεται με την εξατμισοδιαπνοή. Ο υπολογισμός βάσει της καλλιέργειας, της απαίτησής της σε νερό και της έκτασης που καταλαμβάνει δεν είναι αντικειμενικός, καθώς οι έλληνες γεωργοί, κατά κανόνα, χρησιμοποιούν περισσότερο από το απαιτούμενο νερό για άρδευση.

Η ασφαλέστερη μέθοδος εκτίμησης του ύδατος που χρησιμοποιείται για άρδευση είναι η μέτρηση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας για την άντλησή του [15, 16]. Για το έτος 1994, ο Ιωσηφίδης [16] και η ΥΔΡΟΜΕΛΕΤΗΤΙΚΗ [15] εκτίμησαν σε 7.031.049 kWh και 8.185.923 kWh, αντίστοιχα, την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για άντληση ύδατος για αρδευτικούς σκοπούς και στη συνέχεια, υποθέτοντας ένα μέσο μονομετρικό ύψος άντλησης ίσο με 50 m (5 atm) και ένα μέσο συντελεστή απόδοσης ίσο με 50% ($\eta=0.50$) εκτίμησαν τον όγκο του αρδευτικού νερού σε 25.336.639 m³/έτος και 29.960.478 m³/έτος, αντίστοιχα. Ο μεγαλύτερος όγκος χρησιμοποιείται στους περαιτέρω υπολογισμούς, ως δυσμενέστερος.

3.6. Επιφανειακές εισροές στη λίμνη

Στη λεκάνη της Βόλβης δεν υπάρχουν ταυτόχρονες μετρήσεις βροχής – απορροής και για το λόγο αυτό, για τον υπολογισμό των μηνιαίων επιφανειακών εισροών στη λίμνη χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του απορροϊκού συντελεστή (CN) της Soil Conservation Service (SCS) [17]. Για τον υπολογισμό της επιφανειακής απορροής χρησιμοποιήθηκαν οι μηνιαίες βροχοπτώσεις των πολυγώνων Thiessen. Η επιφανειακή απορροή, Q_i [mm], που προκύπτει από τις μηνιαίες βροχοπτώσεις των πολυγώνων Thiessen της λεκάνης της λίμνης Βόλβης, υπολογίζεται από τη σχέση [17]:

$$Q = \sum_{i=1}^6 \left[\frac{(P_i - 0.2S_i)^2}{(P_i - 0.8S_i)} \right] \cdot (A_i / A) \quad (2)$$

όπου: P_i = η μηνιαία βροχόπτωση στο σταθμό i [mm], S_i = η μέγιστη αποθηκευτικότητα της περιοχής του πολυγώνου του σταθμού i [mm], A_i = το εμβαδό του πολυγώνου που επηρεάζει ο σταθμός i μειωμένου κατά το εμβαδό του τμήματος της επιφάνειας της λίμνης, εφόσον περιλαμβάνει το πολύγωνο τέτοιο τμήμα [km²] και A = το εμβαδό της λεκάνης της Βόλβης μειωμένο κατά το εμβαδό της επιφάνειας της λίμνης.

Η μέγιστη αποθηκευτικότητα S περιλαμβάνει και την αρχική συγκράτηση υγρασίας I_a , που θεωρείται ότι είναι ίση με $I_a=0.2S$. Αν υποθεθεί ότι $P < 0.2S$, τότε θεωρείται η βροχόπτωση ότι δεν προκαλεί απορροή. Η S μπορεί να υπολογιστεί με βάση τον απορροϊκό συντελεστή CN (Curve Number) με τη σχέση [17]:

$$S = 25400 / CN - 254 \Leftrightarrow CN = 25400 / (S + 254) \quad (3)$$

Η περιοχή της λεκάνης της Βόλβης περιλαμβάνει κυρίως πηλώδη και πηλοαμμώδη εδάφη [8], οπότε αυτά κατατάσσονται στην κατηγορία Β, ενώ θεωρούνται ότι ανήκουν στη υγρασιακή κατάσταση (AMC) II. Όλη η περιοχή της λεκάνης της Βόλβης καλύπτεται κυρίως από χαμηλά δημητριακά με καλές υδρολογικές συνθήκες και σε ευθείες γραμμές.

Για την εκτίμηση της μέγιστης αποθηκευτικότητας, S και στη συνέχεια του CN ολόκληρη η λεκάνη της Βόλβης συνολικής έκτασης 1129,04 km² θεωρήθηκε ότι είναι ομοιόμορφη από την άποψη της σύστασης των εδαφών, της στράγγισης αυτών, της υγρασιακής τους κατάστασης, των καλλιεργητικών συνθηκών κ.λπ. και σύμφωνα με τη μελέτη Ιωσηφίδη [16] ελήφθη μια μέση τιμή του απορροϊκού συντελεστή CN=80. Στη συνέχεια, υπολογίστηκαν ο όγκος απορροής και οι επιφανειακές εισροές νερού στη λίμνη. Η μέση τιμή των επιφανειακών εισροών για το χρονικό διάστημα 1970-1992 εκτιμήθηκε σε 33.39x10⁶ m³.

3.6. Υπολογισμός υδατικού ισοζυγίου

Με την ανάλυση που προηγήθηκε και με βάση τις παραδοχές που έγιναν εκτιμήθηκαν οι διάφορες μέσες συνιστώσες του υδρολογικού ισοζυγίου της λίμνης Βόλβης για τη χρονική περίοδο 1970-1992 και παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Υδατικό ισοζύγιο λίμνης Βόλβης

Αίτιο	Όγκος νερού (x10 ⁶ m ³)
Όγκος απευθείας εισροών λόγω βροχόπτωσης	+ 33.20
Όγκος νερού που εξατμίζεται από την επιφάνεια της λίμνης	- 73.60
Όγκος επιφανειακών εισροών στη λίμνη	+ 33.39
Όγκος εκροών προς τη θάλασσα διαμέσου του Ρήχιου	- 1.75
Όγκος εισροών από το ρέμα Δερβένι	0.00
Όγκος νερού που αντλείται για αρδεύσεις	- 29.96
Άθροισμα	- 38.72

Από τους σχετικούς υπολογισμούς προκύπτει ότι το μέσο ετήσιο έλλειμμα της λίμνης Βόλβης ανέρχεται σε -38.72x10⁶ m³/έτος, γεγονός που έχει επιπτώσεις στην πτώση της στάθμης της, αλλά και στο βιοτικό της περιβάλλον. Για επιφάνεια λίμνης 72.2 km² προκύπτει μια μέση ετήσια πτώση της στάθμης της λίμνης ίσης με (100x 38.72x10⁶)/72.2x10⁶=53.62 cm/έτος.

Προκειμένου να αξιολογήσουμε το αποτέλεσμα, που προέκυψε από τους ανωτέρω σχετικούς υπολογισμούς, εξετάσαμε τα συμπεράσματα και άλλων μελετών που αφορούσαν το θέμα αυτό. Για παράδειγμα, η ΥΔΡΟΜΕΛΕΤΗΤΙΚΗ Ε.Π.Ε [15] εκτίμησε το υδατικό ισοζύγιο της Βόλβης για την περίοδο 1971-92 σε -28.10x10⁶ m³/έτος, που αντιστοιχεί σε μια μέση πτώση της στάθμης της λίμνης σε 38.91 cm/έτος.

Ο Ιωσηφίδης [16] εκτίμησε το έλλειμμα της Βόλβης σε -11.006x10⁶ m³/έτος, που αντιστοιχεί σε μια μέση της στάθμης 15.24 cm/έτος. Σύμφωνα με μελέτη του Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε. [8] «το ισοζύγιο της λίμνης Βόλβης είναι έντονα αρνητικό με μια μέση τιμή της τάξης των -35x10⁶ m³/έτος» που αντιστοιχεί σε μια μέση πτώση της στάθμης της λίμνης 48.48 cm/έτος. Από τη μελέτη της μεταβολής της στάθμης για το χρονικό διάστημα 1989-96 [8] προέκυψε ότι κατά το διάστημα αυτό η στάθμη της λίμνης Βόλβης μειωνόταν κατά 42.0 cm/έτος. Επομένως, η μέση μείωση της στάθμης της λίμνης Βόλβης κατά 53.62 cm/έτος, που εκτιμήθηκε και με βάση τις παραδοχές που έγιναν, βρίσκεται μέσα σε λογικά πλαίσια.

4. ΠΟΙΟΤΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΤΗΣ ΛΙΜΝΗΣ ΒΟΛΒΗΣ

Συστηματικές μετρήσεις των φυσικοχημικών παραμέτρων της λίμνης Βόλβης γίνονται από το Υπουργείο Γεωργίας κάθε μήνα [18]. Από τις μετρήσεις αυτές προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

α. Το pH του νερού της λίμνης Βόλβης είναι πολύ υψηλό (>8), αν και παρουσιάζει μια σταθερότητα (μέσες ετήσιες τιμές από 8.4 μέχρι 8.9). Όμως, διαπιστώνεται ότι υπάρχουν περιόδους, που οι τιμές του pH φθάνουν μέχρι και 10.5 (Μάρτιος 1996). Οι τιμές αυτές του pH είναι ενδεικτικές ενός πολύ υποβαθμισμένου οικοσυστήματος ακατάλληλου να στηρίζει μορφές ζωής, όπως είναι τα ψάρια και τα πουλιά. Αξιοσημείωτο, επίσης, είναι ότι κατά τα τελευταία έτη (1993-1997) παρατηρείται μια σταθερή αυξητική τάση των μέγιστων τιμών του pH.

β. Η αλατότητα της λίμνης παρουσιάζει αυξητικές τάσεις. Συγκεκριμένα, ενώ το έτος 1984 η μέση ετήσια τιμή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας ήταν 914.5 μmhos/cm, το 1997 έφθασε σε 1113.8 μmhos/cm δηλαδή αύξηση 1.45% κατ' έτος. Ας σημειωθεί ότι η αύξηση αυτή είναι μεγαλύτερη κατά την τελευταία επταετία (1991-97), αφού ανέρχεται σε 1.60% κατ' έτος. Φυσικά, η ηλεκτρική αγωγιμότητα του νερού της Βόλβης απέχει πολύ ακόμη από την τιμή 6.000 μmhos/cm που είχε φθάσει το νερό της παρακείμενης λίμνης Κορώνειας το έτος 1995, ενώ βρίσκεται μέσα στο εύρος των τιμών που δίνει η Κ.Υ.Α. αυτή για κινδύνους δημιουργίας προβλημάτων λόγω της ποιότητας του νερού.

γ. Παρόμοια, όμως πορεία με την ηλεκτρική αγωγιμότητα ακολουθούν και οι συγκεντρώσεις των χλωριόντων Cl^- , των θεικών SO_4^{2-} και του Νατρίου Na^+ .

δ. Στη λίμνη Βόλβη έχουν γίνει συστηματικές μετρήσεις αζωτούχων ενώσεων δηλαδή νιτρικών, νιτροδών και αμμωνιακών μέχρι το έτος 1988, ενώ για τα επόμενα έτη οι μετρήσεις είναι σποραδικές. Για όλο το διάστημα 1983-1997, οι τιμές των ενώσεων αυτών βρίσκονται σε ικανοποιητικά επίπεδα.

ε. Παράλληλα με τις μετρήσεις αζωτούχων ενώσεων έχουν γίνει και μετρήσεις ολικού φωσφόρου, του οποίου οι τιμές δεν δείχνουν σημαντικές διαφορές από έτος σε έτος (μέσες ετήσιες συγκεντρώσεις από 0.029 ppm έως 0.134 ppm).

στ. Μελέτες σχετικά με βαρέα μέταλλα στη λίμνη Βόλβη είναι ελάχιστες σε σύγκριση με αυτές που έχουν γίνει για τη λίμνη Κορώνεια και δείχνουν χαμηλές συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων στο νερό της λίμνης [19].

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από όσα έχουν αναφερθεί διαπιστώνεται ότι η λίμνη Βόλβη αντιμετωπίζει προβλήματα, ποιοτικά και ποσοτικά. Τα προβλήματα αυτά δεν είναι της ίδιας οξύτητας με αυτά της λίμνης Κορώνειας, όμως, πρέπει να τύχουν της κατάλληλης προσοχής και να ληφθούν μέτρα που πολύ σύντομα θα αναδειχθούν κατά την εκπόνηση των διαχειριστικών προγραμμάτων, που προβλέπονται από την Οδηγία 2000/60 της Ευρωπαϊκής Ένωσης, αλλά και το Ν.3199/2003, πριν και η λίμνη Βόλβη ακολουθήσει το δρόμο και την τύχη της λίμνης Κορώνειας. Συγκεκριμένα, διαπιστώθηκε ότι το υδατικό ισοζύγιο της λίμνης είναι συνεχώς αρνητικό, εδώ και πολλά χρόνια, η λίμνη τείνει να γίνει ευτροφική, υπάρχει πρόβλημα πλήρωσης της από τις στερεοπαροχές των χειμάρρων που εκβάλλουν σε αυτή, δεν υπάρχει σταθμίμετρο ή σταθμηγράφος στη λίμνη εξαρτημένος από το κρατικό υψομετρικό δίκτυο, που να παρακολουθεί τις διακυμάνσεις της στάθμης, δεν υπάρχουν μετρήσεις της κατανομής ορισμένων παραμέτρων με το βάθος, όπως είναι για παράδειγμα η θερμοκρασία, το διαλυμένο οξυγόνο κ.λπ., δεν έχουν γίνει σχεδόν καθόλου μετρήσεις βαρέων μετάλλων, δεν φαίνεται να έχει γίνει προσδιορισμός των φυσικοχημικών παραμέτρων της ιλύος του πυθμένα της λίμνης

(ίζημα) και δεν υπάρχουν σχεδόν καθόλου μετρήσεις εισροών στη λίμνη από τα υδατορεύματα της περιοχής, ενώ οι μετρήσεις του Ρήχιου ποταμού είναι ελάχιστες.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

24. B.R.G.M., 1972. Étude hydrogeologique du bassin de Mydgonia pour l'alimentation en Eau de la ville de Salonique. 72 RMEO 11 FE
25. Ψιλοβίκος Α., 1977. Παλαιογραφική εξέλιξις της λεκάνης και της λίμνης της Μυδονίας (Λαγκαδά-Βόλβης). Διδακτορική διατριβή, Α.Π.Θ.
26. Βαφειάδης, Π., 1988. Υδρογεωλογική προμελέτη της λεκάνης Βόλβης Ν. Θεσσαλονίκης. ΥΠ.Γ.Ε. ΙΙ Περιφ. Δ/ση Εγγείων Βελτιώσεων. Θεσσαλονίκη
27. Mercier J., Mouyaris C., Simeakis T., Roundouyannis T. and Angelidhis C., 1979. Intra-plate deformation: a quantitative study of the faults activated by the 1978 Thessaloniki earthquakes. *Nature*. 278, 45-58
28. Βεράνης Ν. και Κατριτζόγλου Κ., 2001. Διερεύνηση των δυνατοτήτων εκμετάλλευσης του βαθύτερου υδροφορέα της υπολεκάνης Κορώνειας, Ν. Θεσσαλονίκης. Ι.Γ.Μ.Ε. Θεσσαλονίκη.
29. Karavokiris G. and Partners, Anelixi, Agrisystems and Knight Piesold, 1998. Περιβαλλοντική αποκατάσταση της λίμνης Κορώνειας. Τελική έκθεση (ελληνική μετάφραση). (2 τόμοι, Ταμείο Συνοχής, Ευρωπαϊκή Επιτροπή, Γενική Διεύθυνση XVII, Περιφερειακή Πολιτική και Συνοχή).
30. Νομαρχιακή Επιχείρηση Θεσσαλονίκης (Ν.Ε.Θ.) Α.Ε., 2004. Επιχειρησιακό σχέδιο αποκατάστασης της λίμνης Κορώνειας του Νομού Θεσσαλονίκης. *Ερευνητικό έργο*. Θεσσαλονίκη (επιστημονικός υπεύθυνος Χρ. Τζιμόπουλος).
31. Υ.Π.Ε.ΧΩ.Δ.Ε., 1996. Πρόγραμμα Αντιμετώπισης Ειδικών Περιβαλλοντικών Προβλημάτων και Συστήματος Λειτουργίας και Διαχείρισης της Προστατευμένης Περιοχής των Λιμνών Κορώνειας, Βόλβης, των Μακεδονικών Τεμπών και της ευρύτερης Περιοχής τους. Επιστ. Σύμβουλος Π. Λουκάκης. Νομαρχιακή Αυτοδιοίκηση Θεσσαλονίκης/Χαλκιδικής. Αθήνα.
32. Αντωνόπουλος Β., 2003. Υδραυλική Περιβάλλοντος και Ποιότητα Υδάτινων Συστημάτων. Εκδόσεις Γιαχούδη. Θεσσαλονίκη
33. Αντωνόπουλος Β, Διαμαντίδης Γ. και Τσιούρης Σ., 1996. Λίμνη Βεγορίτιδα. Διαχρονική εξέλιξη των υδρολογικών και ποιοτικών παραμέτρων της. *Γεωτεχνικά Επιστημονικά Θέματα*. 7(1): 63-78.
34. Αντωνόπουλος Β. και Γιαννιού Σ., 1999. Ισοζύγιο νερού και αλάτων στην λίμνη Κορώνεια της Βόρειας Ελλάδας. *Πρακτικά 4ου συνεδρίου ΕΕΔΥΠ. Διαχείριση Υδατικών Πόρων στις Ευαίσθητες Περιοχές του Ελλαδικού Χώρου*. Βόλος. 65-75.
35. Barbieri A. and Mosello R., 2000. Recent trends in chemistry and mass budget of a high altitude lake in the southern Alps (Laghetto Inferiore, Canton Ticino, Switzerland). *J. Limnol.* 59(2).103-112
36. Asmar B.N. and Ergenzinger P., 2002. Dynamic simulation of the Dead Sea. *Adv. Water Resour.* 25. 263-277
37. Rimmer, A., 2003. The mechanism of Lake Kinneret salinization as a linear reservoir. *J. Hydrol.* 281. 173-186
38. Αναπτυξιακή Εταιρεία Νομού Θεσσαλονίκης Α.Ε. (ΑΝ.Ε.Ν.Θ. Α.Ε.), 1995. Μελέτη υδάτων λεκάνης Μυδονίας. 2η Φάση Τελική. Εκπόνηση ΥΔΡΟΜΕΛΕΤΗΤΙΚΗ Ε.Ε., Θεσσαλονίκη.

39. Ιωσηφίδης Β., 2002. Διερεύνηση των επιπτώσεων εκτροπής των ρεμάτων Σχολαρίου και Λαγκαδικίων στη Λίμνη Βόλβη. Τελική Έκθεση. Νομαρχιακή Επιχείρηση Θεσσαλονίκης Α.Ε. Θεσσαλονίκη
40. Παπαμιχαήλ Δ., 2001. Τεχνική Υδρολογία Επιφανειακών Υδάτων. Εκδόσεις Γιαχούδη-Γιαπούλη. Θεσσαλονίκη.
41. ΥΠ.ΓΕ., 2001. Ποιοτικά χαρακτηριστικά υδάτων των ποταμών και λιμνών της χώρας. Υπουργείο Γεωργίας, Γ.Δ.Ε.Ε.Γ.Δ., Διεύθυνση Σχεδιασμού Ε.Ε., Τόμος Β. Αθήνα.
42. Υ.ΜΑ.Θ., 1999. Αποτελέσματα μετρήσεων δικτύου ελέγχου ρύπανσης επιφανειακών νερών έτους 1998. Αυτοτελές Τμήμα Προστασίας Περιβάλλοντος. Τομέας Ρύπανσης Νερών. Θεσσαλονίκη.

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΠΟΛΥΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΝΕΡΟΥ ΠΟΤΑΜΩΝ ΤΗΣ Β. ΕΛΛΑΔΑΣ

Μαρία Ι. Διαμαντοπούλου¹ και Βασίλειος Ζ. Αντωνόπουλος²

¹ Τμήμα Δασολογίας και Φυσικού Περιβάλλοντος, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο

² Τμήμα Γεωπονίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 54124 Θεσσαλονίκη
(e-mail: vasanton@agro.auth.gr)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή γίνεται εφαρμογή διαφόρων μεθόδων πολυμεταβλητής στατιστικής ανάλυσης (ανάλυση κυρίων συνιστωσών, ιεραρχική ταξινόμηση) σε μηνιαία δεδομένα ποιότητας νερού των διασυνοριακών ποταμών της Βόρειας Ελλάδας, Αξιού και Στρυμόνα, με σκοπό την καλύτερη κατανόηση της ποιότητας του νερού και της οικολογικής τους κατάστασης. Τα αποτελέσματα της πολυμεταβλητής στατιστικής ανάλυσης επιτρέπουν τον καθορισμό των πιθανών πηγών ρύπανσης και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το σχεδιασμό των δειγματοληψιών και για την αποτελεσματική διαχείριση της ρύπανσης σύμφωνα με την Οδηγία 2000/60 και το Ν.3199/2003.

APPLICATION OF MULTIVARIATE STATISTICAL ANALYSIS FOR THE INTERPRETATION OF THE WATER QUALITY DATA FROM RIVERS IN NORTHERN GREECE

Maria J. Diamantopoulou¹ and Vassilis Z. Antonopoulos²

¹ School of Forestry and Natural Environment, Aristotle University

² School of Agriculture, Aristotle University, 54124 Thessaloniki, Greece
(e-mail: vasanton@agro.auth.gr)

ABSTRACT

This paper deals with the application of different multivariate statistical approaches (principal components analysis, cluster analysis) on the monthly water quality data from Axios and Strymon transboundary rivers in order to get better information of their water quality and ecological status. The results of the multivariate statistical analysis allow the identification of the possible sources that influence the water quality and offer a better understanding on the design of sampling and the effective pollution management according to the Directive 2000/60/EEC and the Greek law N.3199/2003.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η συστηματική μέτρηση και καταγραφή των μεταβλητών που περιγράφουν την ποιότητα του νερού των ποταμών, είναι απαραίτητη για τη διαμόρφωση προτάσεων για τη λήψη μέτρων θεραπείας, προστασίας, διατήρησης, διαχείρισης και κύρια πρόληψης της υποβάθμισης της ποιότητας των νερών τους.

Στη χώρα μας, από το 1971, άρχισε από το Υπουργείο Γεωργίας το «Πρόγραμμα εκτέλεσης ελέγχου ποιότητας αρδευτικών υδάτων» στα μεγάλα ποτάμια της Βόρειας Ελλάδας. Έξι (6) από τους σταθμούς μετρήσεων στα ποτάμια εντάχθηκαν τα επόμενα χρόνια στις Κοινοτικές Οδηγίες 77/795, 81/856 και 86/574 «Περί ανταλλαγής πληροφοριών για την ποιότητα των επιφανειακών νερών στην Κοινότητα» [1], ενώ και άλλοι φορείς, όπως το Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε, η ΔΕΗ, κ.α., εγκατέστησαν άλλους σταθμούς μέτρησης των ποσοτικών και ποιοτικών παραμέτρων των επιφανειακών νερών. Τα στοιχεία των μετρήσεων αυτών αποκτούν ιδιαίτερη σημασία σε διασυνοριακά ποτάμια όταν με την εφαρμογή διαφόρων μεθόδων πολυμεταβλητής στατιστικής ανάλυσης εξάγονται συμπεράσματα που σχετίζονται με τους παράγοντες που διαμορφώνουν την ποιότητα του νερού και την προέλευση της ρύπανσης.

Η μελέτη της ποιότητας των νερών των ποταμών έχει απασχολήσει εδώ και πολλά χρόνια τους επιστήμονες. Η ρύπανση του νερού των ποταμών είτε προέρχεται από ανθρωπογενείς δραστηριότητες (γεωργική, αστική, βιομηχανική κλπ) είτε από φυσικές διαδικασίες (κλιματικές αλλαγές, διάβρωση, οξείδωση υλικών κλπ) υποβαθμίζει την ποιότητά του και περιορίζει τη χρήση του. Στη χώρα μας, η μελέτη αυτή αναφέρεται στην ανάλυση χρονικών σειρών μηνιαίων τιμών των ποιοτικών παραμέτρων, είτε με τη διερεύνηση σχέσεων μεταξύ της παροχής και των ποιοτικών παραμέτρων του νερού, είτε με την προσαρμογή κατανομών πιθανότητας και τη διερεύνηση μοντέλων συσχέτισης των ποιοτικών παραμέτρων και της παροχής, είτε με τη διερεύνηση της τάσης [2, 3, 4], είτε τέλος με την προσομοίωση των χρονοσειρών με στοχαστικά μοντέλα [5, 6].

Στην εργασία αυτή γίνεται εφαρμογή διαφόρων μεθόδων πολυμεταβλητής στατιστικής ανάλυσης (ανάλυση κυρίων συνιστωσών, ιεραρχική ταξινόμηση) σε μηνιαία δεδομένα ποιότητας νερού των διασυνοριακών ποταμών της Βόρειας Ελλάδας, Αξιού και Στρυμόνα, με σκοπό τον καθορισμό των παραγόντων διαμόρφωσης των πιθανών πηγών ρύπανσης και τη χρησιμοποίηση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης στο σχεδιασμό των δειγματοληψιών και στην αποτελεσματική διαχείριση της ρύπανσης. Εφαρμογή μεθόδων πολυμεταβλητής ανάλυσης σε υδάτινα ποτάμια συστήματα της Ελλάδας με σκοπό την εξαγωγή ανάλογων συμπερασμάτων έγινε και από άλλους ερευνητές [7, 8, 9].

2. ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Με την εφαρμογή μεθόδων πολυμεταβλητής στατιστικής ανάλυσης όπως αυτές της ανάλυσης κυρίων συνιστωσών (PCA) και της ιεραρχικής ταξινόμησης (HCA) [10, 11] σε δεδομένα ποιοτικών παραμέτρων είναι δυνατό να προκύψουν χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με τις πιθανές επιδράσεις του περιβάλλοντος στην ποιότητα του νερού και την προέλευση της ρύπανσης. Στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκε η τεχνική της PCA με σκοπό να διερευνηθούν οι ομάδες των ποιοτικών παραμέτρων που εμφανίζουν υψηλή συσχέτιση με τις κύριες συνιστώσες που προκύπτουν από την ανάλυση. Η PCA εφαρμόστηκε χωριστά σε δεδομένα μηνιαίων χρονικών σειρών ποιοτικών παραμέτρων του ποταμού Αξιού και του Στρυμόνα και διερευνήθηκαν οι

ομοιότητες και οι διαφορές των ποιοτικών παραμέτρων που συσχετίζονται έντονα με τις ασυσχέτιστες μεταξύ τους κύριες συνιστώσες. Έγινε προσπάθεια αναγνώρισης των συστημάτων των κυρίων συνιστωσών που προέκυψαν από την ανάλυση των διαθέσιμων δεδομένων κάθε ποταμού. Χρησιμοποιήθηκαν οι τυποποιημένες τιμές των ποιοτικών παραμέτρων ($Z_{ij} = (x_{ij} - x_{mj})/s_{ij}$, όπου x_{ij} είναι οι τιμές της μεταβλητής j , x_{mj} είναι ο μέσος όρος της μεταβλητής j και s_{ij} είναι η τυπική απόκλιση των τιμών της μεταβλητής j). Ο μετασχηματισμός αυτός χρησιμοποιήθηκε με σκοπό τη μείωση της επίδρασης των μεταβλητών που εμφανίζουν μεγάλη μεταβλητότητα και αντίστοιχα την αύξηση της επίδρασης αυτών που εμφανίζουν μικρή διασπορά. Επιπλέον, οι μετασχηματισμένες τιμές μειώνουν τον επηρεασμό που προκύπτει από τις διαφορετικές μονάδες μέτρησης των ποιοτικών μεταβλητών. Η εξαγωγή των κυρίων συνιστωσών έγινε με τη χρήση της Varimax μεθόδου περιστροφής, κάνοντας χρήση της κανονικοποίησης του Kaiser [12, 13], ενώ ελήφθησαν υπόψη μόνο οι συνιστώσες εκείνες που είχαν ιδιοτιμή μεγαλύτερη από τη μονάδα [14]. Η PCA εφαρμόστηκε κάνοντας χρήση του στατιστικού πακέτου SPSS [11].

Στη συνέχεια εφαρμόστηκε ιεραρχική ταξινόμηση [11] σε εκείνες τις ποιοτικές παραμέτρους που έδωσαν την υψηλότερη συσχέτιση με τις κύριες συνιστώσες που προέκυψαν από την PCA, για κάθε ποτάμι χωριστά. Η βασική αρχή της ιεραρχικής ταξινόμησης είναι να διαμελιστεί ένα σύνολο δεδομένων με τις περισσότερο ομοιογενείς ομάδες και στη συνέχεια οι ομάδες αυτές να συνενώνονται διαδοχικά με την επιδίωξη του σχηματισμού μεγαλύτερων ομογενών ομάδων. Η διαδικασία συνένωσης των ομάδων σταματάει όταν όλα τα δεδομένα περιέχονται τελικά σε μια ομάδα. Ο σκοπός εφαρμογής της HCA ήταν να ομαδοποιηθούν εκείνες οι ποιοτικές μεταβλητές οι οποίες δίνουν ταυτόσημες πληροφορίες στο σύστημα έτσι ώστε να είναι δυνατή η εξαγωγή των ίδιων ή παρόμοιων συμπερασμάτων μετρώντας όμως λιγότερες ποιοτικές μεταβλητές. Και σ' αυτή τη διαδικασία χρησιμοποιήθηκε ο Z-μετασχηματισμός των τιμών των ποιοτικών παραμέτρων που έλαβαν μέρος στην ανάλυση με σκοπό να αποφευχθούν προβλήματα ταξινόμησης τα οποία οφείλονται στις διαφορετικές μονάδες μέτρησης των παραμέτρων. Χρησιμοποιήθηκε η Ευκλείδεια απόσταση (Euclidean distance), ως ένα από τα πλέον αξιόπιστα μέτρα ομοιότητας μεταξύ των μεταβλητών που ταξινομούνται εξαιτίας του γεγονότος ότι η Ευκλείδεια μετρική βασίζεται στον υπολογισμό των διαφορών μεταξύ όλων των συντεταγμένων των μεταβλητών. Για τη δημιουργία ομάδων μεταβλητών με τις μικρότερες αποστάσεις και για τη διαφοροποίησή τους από τις μεταβλητές με τις μεγαλύτερες αποστάσεις χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος του Ward's [15]. Η επιλογή του βέλτιστου αριθμού ομάδων έγινε με το κριτήριο του λόγου της ερμηνευμένης αδράνειας [15], λαμβάνοντας υπ' όψη το γεγονός της απότομης μεταβολής της τιμής της, κατά τη μετάβαση από το διαμελισμό σε $k+1$ ομάδες στο διαμελισμό σε μια ομάδα λιγότερη, σημαίνοντας ότι χάνεται σημαντικό ποσοστό πληροφορίας. Άρα στο σημείο $k+1$ ομάδων έχουμε τον πιο ικανοποιητικό διαμελισμό.

3. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Η εφαρμογή των διαφόρων μεθόδων πολυμεταβλητής στατιστικής ανάλυσης (ανάλυση κυρίων συνιστωσών, ιεραρχική ταξινόμηση) έγινε σε μηνιαία δεδομένα ποιότητας νερού των διασυνοριακών ποταμών της Βόρειας Ελλάδας, Αξιού και Στρυμόνα, που προέρχονται από τους σταθμούς μέτρησης της Αξιούπολης και του Σιδηροκάστρου, αντίστοιχα (Σχήμα 1). Ο σταθμός της Αξιούπολης βρίσκεται λίγα km μετά την είσοδο

του Αξιού στην Ελλάδα και ο σταθμός του Σιδηροκάστρου βρίσκεται 18 km μετά την είσοδο του Στρυμόνα στην Ελλάδα και ανάντη της λίμνης Κερκίνης.

Ο ποταμός Αξιός (Σχήμα 1) είναι ένας διασυνοριακός ποταμός της Ελλάδας και της FYROM. Το μήκος του είναι περίπου 376 km από τα οποία τα 76 km βρίσκονται σε Ελληνικό έδαφος. Η έκταση της υδρολογικής του λεκάνης είναι περίπου 22450 km² από τα οποία 2300 km² (10%) είναι στην Ελλάδα. Ο ποταμός Αξιός αρδεύει περίπου 300000 στρέμματα στην πεδιάδα Θεσσαλονίκης και το δέλτα του είναι μία από τις 11 Ελληνικές προστατευόμενες περιοχές της συνθήκης Ramsar.

Ο ποταμός Στρυμόνας (Σχήμα 1) είναι ένας άλλος διασυνοριακός ποταμός της Ελλάδας, της Βουλγαρίας και της FYROM. Το μήκος του είναι περίπου 392 km και εκβάλλει στο Αιγαίο πέλαγος. Η έκταση της υδρολογικής του λεκάνης είναι περίπου 17330 km² από τα οποία 6295 km² (36.4%) είναι στην Ελλάδα. Στον Ελλαδικό χώρο τροφοδοτεί την τεχνητή λίμνη Κερκίνη, που προστατεύεται από τη συνθήκη Ramsar. Ο ποταμός Στρυμόνας προμηθεύει με αρδευτικό νερό την πεδιάδα των Σερρών.



Σχήμα 1. Υδρολογικές λεκάνες Αξιού και Στρυμόνα και θέσεις σταθμών μέτρησης.

Τα δεδομένα των χρονοσειρών των μηνιαίων τιμών των ποιοτικών παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στην πολυμεταβλητή στατιστική ανάλυση καταγράφονται και συγκεντρώνονται από το Υπουργείο Γεωργίας [16] και αφορούν έντεκα ποιοτικές παραμέτρους των χρονικών περιόδων 1980 – 1994 και 1980 – 1990 των σταθμών της Αξιούπολης και του Σιδηροκάστρου, αντίστοιχα. Οι έντεκα ποιοτικές παράμετροι είναι τα νιτρικά (NO₃⁻), η ηλεκτρική αγωγιμότητα (ECw), το διαλυμένο οξυγόνο (DO), τα θειικά (SO₄²⁻), τα ιόντα νατρίου (Na⁺), τα ιόντα μαγνησίου (Mg²⁺), τα ιόντα ασβεστίου (Ca²⁺), ο ολικός φώσφορος (TP), το pH, τα χλωρίοντα (Cl⁻) και τα όξινα ανθρακικά ιόντα (HCO₃⁻). Τα περιγραφικά στατιστικά στοιχεία των 11 ποιοτικών παραμέτρων για τους σταθμούς μέτρησης της Αξιούπολης του ποταμού Αξιού και του Σιδηροκάστρου του ποταμού Στρυμόνα δίνονται στον Πίνακα 1.

4. ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Η ανάλυση κυρίων συνιστωσών εφαρμόστηκε χωριστά στα δεδομένα των μηνιαίων τιμών των χρονικών σειρών των ποιοτικών παραμέτρων των ποταμών Αξιού και

Πίνακας 1. Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία των χρονοσειρών των μηνιαίων τιμών των ποιοτικών παραμέτρων του νερού των ποταμών του Αξιού στο σταθμό της Αξιούπολης και του Στρυμόνα στο σταθμό του Σιδηροκάστρου.

Αξιός ποταμός (χρονική περίοδος 1980-1994)						
Ποιοτικές παράμετροι	Μέγεθος δείγματος	Μέσος	Τυπικό σφ. μέσ.	Μέγιστη τιμή	Ελάχιστη τιμή	Τυπική απόκλιση
NO ₃ ⁻ , mg/l	177	7,14	0,27	18,25	0,02	3,57
ECw, μS/cm	177	477,3	9,71	870,0	260,0	129,1
DO, mg/l	177	9,89	0,14	13,50	2,20	1,83
SO ₄ ²⁻ , me/l	177	1,50	0,08	5,70	0,10	1,01
Na ⁺ , me/l	177	0,70	0,02	3,20	0,30	0,32
Mg ²⁺ , me/l	177	1,25	0,04	3,80	0,10	0,50
Ca ²⁺ , me/l	177	3,30	0,07	6,00	1,80	0,92
TP, mg/l	177	0,63	0,04	4,36	0,00	0,54
pH	177	7,70	0,03	8,62	6,90	0,37
Cl ⁻ , me/l	177	0,41	0,02	1,10	0,10	0,20
HCO ₃ ⁻ , me/l	177	3,30	0,04	4,60	2,20	0,50
Στρυμόνας ποταμός (χρονική περίοδος 1980-1990)						
Ποιοτικές παράμετροι	Μέγεθος δείγματος	Μέσος	Τυπικό σφ. μέσ.	Μέγιστη τιμή	Ελάχιστη τιμή	Τυπική απόκλιση
NO ₃ ⁻ , mg/l	132	5,14	0,17	10,34	1,33	1,96
ECw, μS/cm	132	377,6	6,41	600,0	180,0	73,63
DO, mg/l	132	9,64	0,14	13,44	5,50	1,65
SO ₄ ²⁻ , me/l	132	0,95	0,04	4,70	0,10	0,50
Na ⁺ , me/l	132	0,67	0,02	1,30	0,20	0,21
Mg ²⁺ , me/l	132	0,99	0,04	3,80	0,20	0,48
Ca ²⁺ , me/l	132	2,45	0,04	3,80	1,10	0,52
TP, mg/l	132	0,15	0,01	1,25	0,04	0,14
pH	132	7,75	0,03	8,50	6,90	0,36
Cl ⁻ , me/l	132	0,24	0,01	0,60	0,10	0,11
HCO ₃ ⁻ , me/l	132	2,90	0,05	4,20	1,30	0,60

Στρυμόνα. Στον Πίνακα 2, δίνονται οι ιδιοτιμές και τα ποσοστά εξηγούμενης διασποράς για τις συνιστώσες που αφορούν τα δεδομένα και των δύο ποταμών. Για τα δεδομένα του ποταμού Αξιού εξάγονται τρεις κύριες συνιστώσες (PC_{A1}, PC_{A2}, και PC_{A3}), με ιδιοτιμές που κυμαίνονται από 1,003 έως 5,527 και φαίνεται πως εξηγούν το μέγιστο της μεταβλητότητας των τιμών με ποσοστό περίπου 72%, ενώ για τον ποταμό Στρυμόνα εξάγονται τέσσερις κύριες συνιστώσες (PC_{Σ1}, PC_{Σ2}, PC_{Σ3} και PC_{Σ4}) με ιδιοτιμές που κυμαίνονται από 1,121 έως 2,405 και φαίνεται πως εξηγούν το μέγιστο της μεταβλητότητας των τιμών με ποσοστό περίπου 65%.

Όσον αφορά τα δεδομένα που προέρχονται από τον ποταμό Αξιό, η πρώτη συνιστώσα εξηγεί το 50,3%, η δεύτερη συνιστώσα το 13,0% και η τρίτη το 9,1% της ολικής μεταβλητότητας των δεδομένων. Η ερμηνεία των συνιστωσών έγινε με βάση τη συσχέτιση μεταξύ μεταβλητής και συνιστώσας. Όπως φαίνεται (Πίνακας 3) οι μεταβλητές ECw, SO₄²⁻, Na⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, Cl⁻ και HCO₃⁻, εμφανίζουν ιδιαίτερα υψηλή θετική συσχέτιση με τη συνιστώσα ένα, οι μεταβλητές NO₃⁻ και DO,

Πίνακας 2. Ιδιοτιμές και ποσοστά εξηγούμενης διασποράς για τις συνιστώσες που αφορούν τα δεδομένα του Αξιού και του Στρυμόνα ποταμού.

Ποταμός Αξιός			
Συνιστώσα	Ιδιοτιμή	Ποσοστό (%) εξηγούμενης διασποράς	
		Εκατοστιαίο	Αθροιστικό
1	5,527	50,247	50,247
2	1,432	13,015	63,262
3	1,003	9,118	72,380
4	0,893	8,117	80,496
⋮	⋮	⋮	⋮
11	0,007	0,065	100,00
Ποταμός Στρυμόνας			
Συνιστώσα	Ιδιοτιμή	Ποσοστό (%) εξηγούμενης διασποράς	
		Εκατοστιαίο	Αθροιστικό
1	2,405	21,863	21,863
2	2,285	20,775	42,638
3	1,386	12,598	55,236
4	1,121	10,187	65,424
5	0,933	8,483	73,907
⋮	⋮	⋮	⋮
11	0,105	0,953	100,00

εμφανίζουν υψηλή θετική συσχέτιση με τη συνιστώσα δύο, ενώ οι μεταβλητές TP και pH, εμφανίζουν υψηλή συσχέτιση με την τρίτη συνιστώσα. Η PC_{A1} διαμορφώνεται από παράγοντες που είναι φυσικοχημικής προέλευσης, η PC_{A2} από παράγοντες που είναι γεωργικής προέλευσης και τέλος η PC_{A3} από παράγοντες που είναι αστικής προέλευσης.

Πίνακας 3. Συσχέτιση μεταξύ των ποιοτικών παραμέτρων του νερού και των αντίστοιχων κύριων συνιστωσών για τον Αξιό και τον Στρυμόνα ποταμό, μετά τη χρήση της μεθόδου περιστροφής μέγιστης διακύμανσης.

Ποιот. Παράμ.	Ποταμός Αξιός			Ποταμός Στρυμόνας			
	Συνιστώσα						
	1	2	3	1	2	3	4
NO ₃ ⁻	0,253	0,663	-0,434	0,053	0,219	0,689	-0,335
ECw	0,958	0,139	0,011	0,072	0,903	-0,038	0,093
DO	0,124	0,868	0,073	-0,138	0,136	0,770	0,095
SO ₄ ²⁻	0,854	0,095	-0,178	0,016	0,711	0,331	0,022
Na ⁺	0,826	0,103	0,258	-0,040	0,858	0,103	0,036
Mg ²⁺	0,677	0,107	0,018	0,544	-0,052	0,386	0,199
Ca ²⁺	0,901	0,162	-0,065	0,820	0,130	-0,318	-0,123
TP	0,506	-0,098	-0,636	0,080	0,025	0,048	0,634
pH	0,258	-0,105	0,813	-0,059	0,114	-0,117	0,825
Cl ⁻	0,778	0,199	0,195	0,618	-0,060	0,151	0,096
HCO ₃ ⁻	0,723	0,214	0,239	0,914	0,061	-0,217	-0,080

Όσον αφορά τα δεδομένα που προέρχονται από τον ποταμό Στρυμόνα, η πρώτη συνιστώσα εξηγεί το 21,9%, η δεύτερη συνιστώσα το 20,8%, η τρίτη το 12,6% και η τέταρτη το 10,2% της ολικής μεταβλητότητας των δεδομένων. Όπως φαίνεται (Πίνακας 3), οι μεταβλητές Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- και HCO_3^- , εμφανίζουν ιδιαίτερα υψηλή θετική συσχέτιση με τη συνιστώσα ένα, οι μεταβλητές EC_w , SO_4^{2-} και Na^+ , εμφανίζουν υψηλή θετική συσχέτιση με τη συνιστώσα δύο, οι μεταβλητές NO_3^- και DO , εμφανίζουν υψηλή θετική συσχέτιση με τη συνιστώσα τρία, ενώ οι μεταβλητές TP και pH , εμφανίζουν υψηλή συσχέτιση με την τέταρτη συνιστώσα. Οι ποιοτικές παράμετροι που έχουν συμμετοχή στη διαμόρφωση της $PC_{\Sigma 1}$ και της $PC_{\Sigma 2}$ είναι οι ίδιες που συμμετέχουν στη διαμόρφωση της PC_{A1} του ποταμού Αξιού και κατά παρόμοιο τρόπο. Το ίδιο συμβαίνει και για τις συνιστώσες $PC_{\Sigma 3}$ και $PC_{\Sigma 4}$ οι οποίες διαμορφώνονται από τις ίδιες ποιοτικές παραμέτρους οι οποίες διαμορφώνουν τις συνιστώσες PC_{A2} και PC_{A3} του ποταμού Αξιού, αντίστοιχα. Κατά παρόμοιο τρόπο με τον ποταμό Αξιό, για τον Στρυμόνα η $PC_{\Sigma 1}$ και η $PC_{\Sigma 2}$ διαμορφώνονται από παράγοντες που είναι φυσικοχημικής προέλευσης, η $PC_{\Sigma 3}$ από παράγοντες που είναι γεωργικής προέλευσης και τέλος η $PC_{\Sigma 4}$ από παράγοντες που είναι αστικής προέλευσης.

Στον Πίνακα 4, δίνονται τα αποτελέσματα της ιεραρχικής ταξινόμησης των ποιοτικών μεταβλητών που εμφανίζουν την υψηλότερη συσχέτιση με τις αντίστοιχες κύριες συνιστώσες για τον Αξιό και το Στρυμόνα ποταμό, αντίστοιχα. Για τον ποταμό Αξιό, με την ιεραρχική ταξινόμηση των επτά ποιοτικών μεταβλητών που διαμορφώνουν την PC_{A1} (Πίνακας 4), προέκυψαν δύο ομάδες, με το κριτήριο του λόγου της ερμηνευμένης αδράνειας που έδωσε την πιο απότομη μεταβολή για την περίπτωση του διαμελισμού των δεδομένων από δύο ομάδες σε μία.

Πίνακας 4. Ιεραρχική ταξινόμηση των ποιοτικών παραμέτρων που εμφανίζουν την υψηλότερη συσχέτιση με τις αντίστοιχες κύριες συνιστώσες για τον Αξιό και τον Στρυμόνα ποταμό.

Ποιοτ. Παράμ.	Αξιός ποταμός		Στρυμόνας ποταμός			
	Ομαδοποίηση		1 ^η Ομαδοποίηση		2 ^η Ομαδοποίηση	
	Ομ. 1	Ομ. 2	Ομ. 1	Ομ. 2	Ομ. 1	Ομ. 2
EC_w	√				√	
SO_4^{2-}		√				√
Na^+		√				√
Mg^{2+}		√	√			
Ca^{2+}		√	√			
Cl^-		√	√			
HCO_3^-		√		√		

Στην πρώτη ομοιογενή ομάδα ανήκει η μεταβλητή EC_w , ενώ στη δεύτερη ομοιογενή ομάδα οι μεταβλητές SO_4^{2-} , Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- και HCO_3^- . Απ' αυτές τις ποιοτικές μεταβλητές το Ca^{2+} είναι το στοιχείο που εμφανίζει τη μεγαλύτερη συσχέτιση με την PC_{A1} (Πίνακας 3), οπότε και θεωρείται η πλέον απαραίτητη ποιοτική μεταβλητή μεταξύ των έξι, η οποία πρέπει να μετράται.

Για τον ποταμό Στρυμόνα εφαρμόστηκε ιεραρχική ταξινόμηση για τις τέσσερις (Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- και HCO_3^-) ποιοτικές μεταβλητές που διαμορφώνουν την $PC_{\Sigma 1}$ και τις τρεις (EC_w , SO_4^{2-} και Na^+) ποιοτικές μεταβλητές που διαμορφώνουν την $PC_{\Sigma 2}$, ξεχωριστά (Πίνακας 4). Οι πρώτες τέσσερις μεταβλητές ταξινομήθηκαν σε δύο ομάδες, με το κριτήριο του λόγου της ερμηνευμένης αδράνειας. Στην πρώτη ομοιογενή ομάδα

διαχείριση της ρύπανσης. Για τα μηνιαία δεδομένα των ποταμών Αξιού και Στρυμόνα βρέθηκαν τρεις και τέσσερις κύριες συνιστώσες, αντίστοιχα και εξηγούν το μέγιστο της μεταβλητότητας των τιμών με ποσοστό 72% και 65%, αντίστοιχα. Οι ποιοτικές παράμετροι που έχουν συμμετοχή στη διαμόρφωση των αντίστοιχων κύριων συνιστωσών των δύο ποταμών είναι οι ίδιες και συμμετέχουν κατά παρόμοιο τρόπο. Από την ιεραρχική ταξινόμηση προκύπτει ότι το Ca^{2+} είναι το στοιχείο που εμφανίζει τη μεγαλύτερη συσχέτιση με την πρώτη κύρια συνιστώσα και στα δύο ποτάμια.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 1994. Ποιότητα των Επιφανειακών Γλυκών Νερών. Κοινή Διαδικασία Ανταλλαγής Πληροφοριών, Συγκεντρωτική Έκθεση 1990-1992.
2. Αντωνόπουλος, Β., 1982. Ποιοτική κατάσταση του ποταμού Αξιού. Δελτίο Ελληνικής Επιτροπής Αρδεύσεων και Αποστραγγίσεων, Τεύχος 1-2: 37-44.
3. Μήτσιου Κ.Α., Αντωνόπουλος, Β.Ζ. και Δ.Μ. Παπαμιχαήλ, 1999. Στατιστική Διερεύνηση των Χρονοσειρών Παραμέτρων Ποιότητας του Νερού του Ποταμού Στρυμόνα. Υδροτεχνικά, 9: 59-74.
4. Antonopoulos, V.Z., Papamichail, D.M. and Mitsiou, K.A., 2001. Statistical and trend analysis of water quality and quantity data for the Strymon River in Greece. *Journal of Hydrology and Earth System Sciences*, 5: 679-691.
5. Antonopoulos, V., and Papamichail, D., 1991. Stochastic analysis of water quality parameters in streams, Tsakiris G. (ed.) *Water Resources Management and Technology*, Balcema, pp 369-376.
6. Papamichail, D.M., Antonopoulos, V.Z. and Georgiou, P.E., 2000. Stochastic Models for River Strymon Flow and Water Quality Parameters. *Proceedings of the International Conference "Protection and Restoration of the Environment V"*, Thassos, Vol. I, pp. 219-226.
7. Voutsas, D., Manoli, E., Samara, C., Sofoniou, M., and Stratis, I., 2001. A study of surface water quality in Macedonia, Greece: Speciation of nitrogen and phosphorus. *Water, Air & Soil Pollution*, 129: 13-22.
8. Fytianos, K., Siumka, A., Zachariadis, G. A., and Beltsios, S., 2002. Assessment of the quality characteristics of Pinios River, Greece. *Water, Air & Soil Pollution*, 136: 317-329.
9. Kotti, M. E., Vlessidis, A. G., Thanasoulas, N. C., and Evmiridis, N. P., 2005. Assessment of River Water Quality in Northwestern Greece. *Water Resources Management*, 19: 77-94.
10. Davis, J.C., 1984. *Statistics and Data Analysis in Geology*. 2nded. Wiley, N.Y.
11. Norusis, M.J., 2000. *SPSS for Windows*, SPSS Inc., Chicago, Illinois.
12. Saad, M. and Turgeon, A. 1988. Application of principal components analysis to long-term reservoir management. *Water Resources Research*, 24 (7): 907-912.
13. Sharma, S., 1996. *Applied Multivariate Techniques*. Wiley, N.Y.
14. Zoski, K.W. and Jurs, S. 1996. An objective counterpoint to the visual scree test for factor analysis: the standard error scree. *Educational and Psychological Measurement*, 56, 3, 443-451.
15. Massart, D. M., and Kaufman, L., 1983. *The Interpretation of Analytical Data by the Use of Cluster Analysis*. J. Wiley, N. Y.

16. Υπουργείο Γεωργίας, 2001. Ποιοτικά χαρακτηριστικά υδάτων των ποταμών και λιμνών της χώρας. Υπουργείο Γεωργίας, Δ/νση Σχεδιασμού Εγγειοβελτιωτικών Έργων και Αξιοποίησης Εδαφούδατικών Πόρων, Αθήνα.

ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΟΥ ΚΑΘΕΣΤΩΤΟΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΣΤΑ ΥΔΑΤΙΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΩΝ ΠΟΤΑΜΩΝ ΤΗΣ ΒΟΡΕΙΑΣ ΕΛΛΑΔΟΣ

Κυριακίδης Ι.Ν., Γ. Ζαλίδης, Β. Ζ. Αντωνόπουλος και Ν. Μισοπολινός
Γεωπονική Σχολή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
E-mail: vasanton@agro.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία μελετήθηκε το φυσικοχημικό καθεστώς επτά ποταμών της Βόρειας Ελλάδος. Εξετάστηκαν οι ποταμοί : Αλιάκμονας, Πεντάβρυσος, Αξιός, Στρυμόνας, Μαρμαράς, Νέστος και Έβρος. Οι φυσικοχημικές παράμετροι που αναλύονται στην Οδηγία 2000/60/EEC για την ποιότητα των υδάτων στην Ευρωπαϊκή Ένωση είναι: η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC), η ενεργός οξύτητα (pH), το διαλυμένο οξυγόνο (DO), τα νιτρικά (NO₃) και ο ολικός φώσφορος (TP). Χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα της χρονικής περιόδου 1984 έως 1997. Η ανάλυση των δεδομένων έγινε με τις αρχές της περιγραφικής στατιστικής. Για την εκτίμηση των τάσεων χρησιμοποιήθηκε η μη παραμετρική μέθοδος εκτίμησης μονοτονικών τάσεων Seasonal Mann-Kendall. Λόγω της έλλειψης δεδομένων σε ορισμένες από τις χρονοσειρές, δεν στάθηκε δυνατό να εκτιμηθούν τάσεις, ενώ σε άλλες οι εκτιμώμενες τάσεις δεν χαρακτηρίστηκαν ως στατιστικώς σημαντικές.

STUDY OF PHYSICOCHEMICAL STATUS AND TRENDS IN THE RIVERS OF NORTHERN GREECE

Kyriakidis, I.N., G. Zalidis, V.Z.Antonopoulos and N. Misopolinos
School of Agriculture, Aristotle University of Thessaloniki, 54124 Thessaloniki,
E-mail: vasanton@agro.auth.gr

ABSTRACT

In this paper the physicochemical status of main rivers in northern Greece was studied. The physicochemical parameters, which selected are based on 2000/60/EEC directive of European Communities, and were: electrical conductivity (EC), pH, dissolved oxygen (DO), nitrates (NO₃), and total Phosphate (TP). The data, which used are from 1984 to 1997. The analysis of data is based on the descriptive statistics. The trends of parameters are estimated on the Seasonal Mann-Kendall test.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Με την οδηγία 2000/60 της EC θεσπίστηκε το πλαίσιο για την βιολογική, την ποσοτική και ποιοτική κατάσταση των υδατικών πόρων στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης (EC, 2000). Η καλή ποιότητα των επιφανειακών καθορίζεται με βιολογικά, χημικά, μορφολογικά και υδρολογικά κριτήρια. Το φυσικοχημικό καθεστώς των επιφανειακών υδατικών συστημάτων διαμορφώνεται από τις φυσικές συνθήκες στην υδρολογική λεκάνη και τις ανθρωπογενείς δραστηριότητες. Από τη δεκαετία του 60 γίνονται καταγραφές των ποιοτικών χαρακτηριστικών των υδατικών συστημάτων για την καταγραφή της ποιότητάς τους και την ανάπτυξη διαχειριστικών σχεδίων.

Η ανάλυση δεδομένων των υδατικών πόρων απασχόλησε πολλούς επιστήμονες διεθνώς και στην Ελλάδα. Αρχικά στις περισσότερες μελέτες διεθνώς είχαν χρησιμοποιηθεί αποκλειστικά φυσικοχημικές παράμετροι για την εκτίμηση της κατάστασης των υδάτων (1, 6, 7, 20, 23). Αργότερα η κατανόηση των φυσικοχημικών μηχανισμών των υδάτων που επηρεάζουν τους βιολογικούς παράγοντες των υδάτων και η συσχέτιση των βιολογικών αυτών παραγόντων με την ποιοτική κατάσταση των υδάτων οδήγησε στην παρακολούθηση και ανάλυση και βιολογικών παραμέτρων στα υδάτινα σώματα (8, 9, 21). Εκτός από τις φυσικοχημικές και βιολογικές παραμέτρους πολύ σημαντικά είναι και τα φυσικά χαρακτηριστικά που έχουν σχέση με την ποσότητα του νερού (4, 11, 24, 27).

Το Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων (πρώην Υπουργείο Γεωργίας) συμβάλλοντας στην προσπάθειά για την αξιοποίηση και προστασία των υδατινών πόρων της Ελλάδος κατάρτισε ένα πρόγραμμα παρακολούθησης των υδατικών συστημάτων της χώρας από το 1971 (25). Το πρόγραμμα συνεχώς εξελισσόταν με αποτέλεσμα σήμερα να υπάρχουν δεδομένα για ένα πλήθος υδατινών συστημάτων (λιμνών, ποταμών, γεωτρήσεων κτλ) που αφορούν 28 φυσικοχημικές υδατικές παραμέτρους.

Ο σκοπός της εργασίας είναι να εκτιμηθεί η φυσικοχημική κατάσταση των υδάτων επτά ποταμών της Βορείου Ελλάδος. Για την επίτευξή του χρειάστηκε πολύπλευρη προσέγγιση που περιλαμβάνει χωρικό, διαχρονικό, και εποχιακό έλεγχο μεταβολών πέντε φυσικοχημικών παραμέτρων, καθώς και εύρεση των κατανομών κάθε παραμέτρου μεταξύ επιλεγμένων επιπέδων αναφοράς που αντικατοπτρίζουν το ποιοτικό καθεστώς των υδάτων. Επιπλέον η εκτίμηση των μακροπρόθεσμων τάσεων αποτέλεσε απαραίτητο συμπλήρωμα ώστε να αποκτηθεί σφαιρική εικόνα σχετικά με το παρελθόν και το μέλλον του καθεστώτος των υδάτων.

Η στατιστική ανάλυση των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε για να περιγραφεί και να ερμηνευτεί η συμπεριφορά των υπό μελέτη παραμέτρων. Τα δεδομένα των παραμέτρων που περιγράφουν την κατάσταση του νερού είναι υδρολογικές χρονοσειρές και αναλύονται με την εφαρμογή των μεθόδων της στατιστικής υδρολογίας (13, 22). Χρησιμοποιούνται τα εργαλεία της πιθανολογικής στατιστικής για την εκτίμηση του καθεστώτος και των τάσεων στα ύδατα. Οι τάσεις εκτιμήθηκαν με βάση την μη παραμετρική μέθοδο εκτίμησης μονοτονικών τάσεων που ανέπτυξε ο Hirsch et al. (1982) (12, 14, 15, 19).

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Στην Οδηγία 2000/60/EC (πάρτημα V), ορίζεται ένα σύνολο φυσιολογικών, φυσικών, χημικών και βιολογικών παραμέτρων που χρησιμοποιούνται για την ταξινόμηση της οικολογικής κατάστασης των επιφανειακών υδάτων (11). Οι βασικές φυσικοχημικές συνθήκες που θα πρέπει να μελετούνται στα πλαίσια ενός

προγράμματος παρακολούθησης ενός υδάτινου συστήματος είναι : θερμικές συνθήκες, συνθήκες οξυγόνωσης, αλατότητα, κατάσταση οξίνισης και θρεπτικά στοιχεία.

Στην εργασία αυτή, η επιλογή των προς ανάλυση παραμέτρων (δεικτών φυσικοχημικής κατάστασης υδάτων) βασίστηκε κυρίως στο να υπάρχει συμφωνία με την Οδηγία 2000/60/EC για τις βασικές φυσικοχημικές συνθήκες που πρέπει να παρακολουθούνται στα υδατικά συστήματα. Οι συνθήκες αυτές αναδεικνύουν τους κινδύνους που υπάρχουν για την ανθρώπινη ζωή και τις λειτουργίες των οικοσυστημάτων, αλλά και σχετίζονται με τις υφιστάμενες χρήσεις των υδάτων και των εδαφών σε επίπεδο λεκάνης απορροής. Άλλες συνιστώσες του προβλήματος που λήφθηκαν υπόψη ήταν η ύπαρξη μετρήσεων σε ικανοποιητικό βάθος χρόνου και η συνέχεια στις μετρήσεις με τα λιγότερα κενά στα δεδομένα των χρονικών σειρών. Τα δεδομένα ποιότητας καλύπτουν την χρονική περίοδο από 1984 έως 1997, διάρκειας 14 ετών και προέρχονται από το Υπουργείου Γεωργίας (25) που είναι η μόνη υπηρεσία στην Ελλάδα που έχει μακροχρόνια δεδομένα για τους υδατικούς πόρους. Η περίοδος αυτή επιλέχθηκε διότι είναι: α) σχετικά πρόσφατη, β) κοινή μεταξύ των περισσότερων σταθμών δειγματοληψίας και γ) υπάρχουν τα περισσότερα δεδομένα. Ο ποιοτικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC, $\mu\text{S}/\text{cm}$), η ενεργός οξύτητα (pH), το διαλυμένο οξυγόνο (DO, mg/L), τα νιτρικά (NO_3 , mg/L) και ο ολικός φώσφορος (TP, mg/L). Οι σταθμοί δειγματοληψίας στους οποίους αναλύθηκαν τα δεδομένα των πέντε ποιοτικών παραμέτρων περιλαμβάνονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1 Σταθμοί δειγματοληψίας

Ποτάμι	Σταθμός	θέση (ανάτη προς κατάντη)	Ποτάμι	Σταθμός	θέση (ανάτη προς κατάντη)
Αλιάκμονας	3	Γέφυρα Γρεβενών – Κοζάνης	Στρυμόνας	1	Σιδ. γέφυρα Σιδηροκάστρου
Αλιάκμονας	1	Ανάτη γέφυρας Αμμουδάρας	Στρυμόνας	2	Γέφυρα Λυγαριάς
Αλιάκμονας	2	Μονή Παρίωνα	Στρυμόνας	3	Αρδ. αντλ. Μυρκίνου
Αξιός	2	Σιδηροδρομική Γραμμή Θεσσαλονίκης – Ειδομένης	Πεντάβρυσος	3	ΑΗΣ Αγ. Δημητρίου
Αξιός	5	Γέφυρα Προχώματος – Κουφαλίων	Πεντάβρυσος	1	ΑΗΣ Καρδιάς
Αξιός	4	Γέφυρα Χαλάστρας	Πεντάβρυσος	2	Γέφυρα Πεντάβρυσου
Έβρος	1	Σιδηροδρομικός σταθμός Δικαίων	Νέστος	3	Δέλτα
Έβρος	7	Νέα Βύσσα	Νέστος	1	Γέφυρα Παπάδων
Μαρμαράς	1	Μονόλιθος Ποδοχωρίου	Νέστος	2	Τοξότες
Μαρμαράς	2	Γέφυρα Λουτρών Ελευθέρων	Νέστος	4	Άκρο αρδ. δικτύου Ερμονησιού Καρύων

Για την περιγραφή της κατάστασης των υδάτων στους σταθμούς δειγματοληψίας χρησιμοποιούνται βασικά στατιστικά μέτρα της περιγραφικής στατιστικής (EDA), όπως η διάμεσος, καθώς και τα εργαλεία της γραφικής ανάλυσης δεδομένων (GDA), όπως τα διαγράμματα διασποράς, τα θηκογράμματα και τα διαγράμματα κατανομής συχνότητας (πίτες συχνότητας). Για το χρονικό διάστημα της μελέτης για την απεικόνιση του ποιοτικού καθεστώτος των υδάτων χρησιμοποιήθηκαν κατανομές συχνότητας των δεδομένων μεταξύ επιλεγμένων επιπέδων αναφοράς για κάθε παράμετρο (17).

Η μεταβολή του καθεστώτος ενός υδατικού συστήματος σε σχέση με το χρόνο ονομάζεται τάση (3, 5, 18). Για την εκτίμηση της τάσης τα δεδομένα (εκτός του pH)

καταρχήν μετασχηματίστηκαν με λογαριθμικό μετασχηματισμό $\log_{10}(x)$, για την επίτευξη σταθερής διασποράς. Ακολούθησε έλεγχος μονοτονίας και κατόπιν μια σειρά ελέγχων (13) που είναι απαραίτητοι πριν και κατά τον έλεγχο της μηδενικής υπόθεσης ότι δεν υπάρχει τάση. Το επίπεδο σημαντικότητας για την εύρεση της τάσης είναι 5%. Στην συγκεκριμένη μελέτη ως στατιστικά σημαντικές (σ.σ.) χαρακτηρίζονται οι τάσεις που βρίσκονται για αυτό το επίπεδο σημαντικότητας και παράλληλα υπάρχει επάρκεια δεδομένων στην χρονοσειρά (17). Για όσες χρονοσειρές αναφέρονται τάσεις αλλά δεν χαρακτηρίζονται ως σ.σ οφείλεται στο γεγονός της μεγαλύτερης έλλειψης δεδομένων, το επίπεδο σημαντικότητας παραμένει όμως 5% και για αυτές (13). Ο συντελεστής του Senp αναφέρεται στην κλίση της γραμμικής τάσης στα μετασχηματισμένα δεδομένα, ενώ στα πραγματικά δεδομένα εκφράζεται ως εκθετική τάση. Ως εποχές ορίζονται οι 12 μήνες.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

3.1 Ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC)

Γενικά η μέση κατάσταση ως προς την EC κυμαίνεται στο σύνολο των σταθμών δειγματοληψίας των ποταμών περίπου στα 300-600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Σχήμα 1, Πίνακας 2). Εξαιρέση αποτελούν οι σταθμοί δειγματοληψίας του Πεντάβρυσου (σταθμός 2) και Μαρμαρά (σταθμός 2) στους οποίους η μέση κατάσταση της EC κυμαίνεται στα επίπεδα των 1100 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Εξαιρουμένου του Μαρμαρά υψηλότερα μέσα επίπεδα EC στο σύνολο των σταθμών τους παρουσιάζουν οι ποταμοί Πεντάβρυσου και Έβρος, ενώ τα χαμηλότερα ο ποταμός Νέστος.

Χωρικά για το σύνολο σχεδόν των υδατορευμάτων από ανάντη προς κατάντη παρατηρήθηκε αύξηση της μέσης EC (βάση της διαμέσου). Η αύξηση ήταν μικρή από σταθμό σε σταθμό δειγματοληψίας (συνήθως $< 50 \mu\text{S}/\text{cm}$) και όχι αρκετή ώστε να μεταβάλλεται ουσιαστικά το ποιοτικό καθεστώς ως προς την EC. Εξαιρέση αποτελούν τα ποτάμια Πεντάβρυσος και Μαρμαράς στους οποίους παρατηρήθηκε μεγάλη αύξηση της EC προς κατάντη. Στον Πεντάβρυσο η διάμεσος τιμή EC στον πιο κατάντη σταθμό (σταθμός 2) ήταν μεγαλύτερες από 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ σε σχέση με τους άλλους δύο σταθμούς, ενώ στον Μαρμαρά η αύξηση ήταν περίπου 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Οι δύο αυτοί ποταμοί αποτελούν και τις μόνες περιπτώσεις όπου παρατηρήθηκε μεγάλη μεταβολή του ποιοτικού καθεστώτος ως προς την EC προς χειρότερα επίπεδα. Οι διαφοροποιήσεις αυτές δείχνουν ότι υπάρχουν τοπικά ισχυροί εξωγενείς παράγοντες. Βελτίωση από ανάντη προς κατάντη παρατηρήθηκε μόνο στον Έβρο αλλά οι θέσεις των σταθμών δειγματοληψίας δεν είναι αντιπροσωπευτικές για την γενική κατάσταση σε όλο το μήκος του.

Διαχρονικά η κατάσταση ως προς την EC παρουσίαζε υψηλότερες διάμεσες τιμές τα έτη 1990-93 (κυρίως το 1990) σε όλους τους ποταμούς με εξαίρεση τον Μαρμαρά. Η κατάσταση αυτή πιθανόν πρέπει να αποδοθεί σε κλιματικό παράγοντα αφού είναι ο μόνος εμφανής παράγων που θα μπορούσε να επηρεάσει πολλά υδατικά συστήματα με αρκετά μεγάλη γεωγραφική διασπορά

Εποχιακά οι μεταβολές της EC στα περισσότερα υδατορεύματα δείχνουν την ίδια συμπεριφορά σ' όλους τους σταθμούς δειγματοληψίας τους, ενώ σε ορισμένους (Μαρμαράς, Πεντάβρυσος) υπήρχαν διαφορές στις εποχιακές μεταβολές της EC μεταξύ των σταθμών δειγματοληψίας. Οι εντονότερες εποχιακές μεταβολές παρατηρήθηκαν στον Πεντάβρυσο και στον Μαρμαρά. Γενικά στις εποχιακές μεταβολές διακρίνονται

δύο κύριες περιόδους. Μικρότερες τιμές παρατηρούνται στο τέλος της άνοιξης και αυξημένες στο τέλος του καλοκαιριού και την αρχή του φθινοπώρου

Ανοδικές τάσεις εκτιμήθηκαν για τον Αλιάκμονα και τον Νέστο ενώ καθοδικές τάσεις μόνο για τον Πεντάβρυσο. Σε απόλυτα μεγέθη βάση του συντελεστή γραμμικής κλίσης του Senn οι καθοδικές τάσεις στον Πεντάβρυσο ήταν οι μεγαλύτερες από όλες τις τάσεις που έχουν εκτιμηθεί φανερώνοντας μελλοντική βελτίωση.

Πίνακας 2 Στατιστικά στοιχεία παραμέτρων

Ποτάμι	Σταθμός	Διάμεσος					Κατεύθυνση - συντελεστής κλίσης** της τάσης									
		EC	pH	DO	NO ₃	TP	EC		pH		DO		NO ₃		TP	
							Τάση	Senn	Τάση	Senn	Τάση	Senn	Τάση	Senn	Τάση	Senn
Αλιάκμονας	3	400	7,92	11,40	2,50	0,010	↑*	0,005	↑*	0,045	↑	0,003	↑	0,031		
	1	405	8,09	11,40	4,25	0,036										
	2	415	7,82	10,60	1,77	0,010	↑*	0,003	↑*	0,037	↑	0,003	↑	0,035		
Πεντάβρυσος	3	640	8,20	10,85	7,83	0,021			↓	-0,057	↑	0,006				
	1	588	8,50	10,80	5,89	0,290	↓*	-0,012	↓*	-0,053	↑	0,006	↓	-0,104	↓	-0,055
	2	1100	7,90	9,00	90,82	0,892	↓*	-0,011	↓*	-0,124						
Αξιός	2	460	7,70	10,60	7,44	0,528			↑*	0,016	↑	0,009	↑	0,017	↑	0,017
	5	470	7,70	10,85	7,49	0,500					↑	0,009			↑	0,022
	4	490	7,77	10,75	6,73	0,483			↑*	0,014			↑	0,016	↑	0,024
Στρυμόνας	1	405	7,60	10,44	5,44	0,119										
	2	470	7,90	10,29	2,80	0,091			↑*	0,034	↑	0,011	↑	0,020	↑	0,029
	3	478	7,92	10,36	6,46	0,153			↑*	0,022	↑	0,009			↑	0,037
Μαρμαράς	1	490	7,90	11,40	3,01	0,010										
	2	1180	7,60	11,20	2,84	0,036										
Νέστος	3	300	7,40	10,50	5,02	0,111			↑*	0,035	↑	0,004	↓	-0,023	↓	-0,035
	1	300	7,55	10,60	4,61	0,098			↑*	0,05	↑	0,007			↓	-0,377
	2	330	7,65	11,00	3,08	0,033	↑*	0,003	↑*	0,025	↑	0,005			↓	-0,067
	4	310	7,80	11,10	3,17	0,042			↑*	0,043	↑	0,006				
Εβρος	1	633	7,30	10,10	16,82	0,518										
	7	560	7,35	10,00	13,35	0,486			↓*	-0,03						

* Στατιστικά σημαντική τάση (Ισχύει για : $\alpha=0,05$ & πλήρωση κριτηρίων έλλειψης δεδομένων)

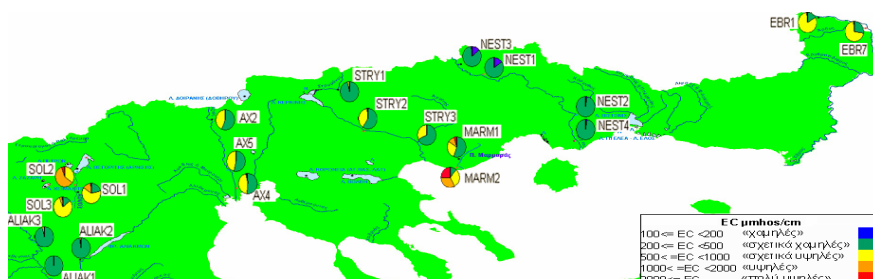
** Συντελεστής γραμμικής κλίσης του Senn (β).

↑ ανοδική τάση , ↓ καθοδική τάση , EC σε $\mu\text{S}/\text{cm}$, DO-NO₃-TP σε mg/l

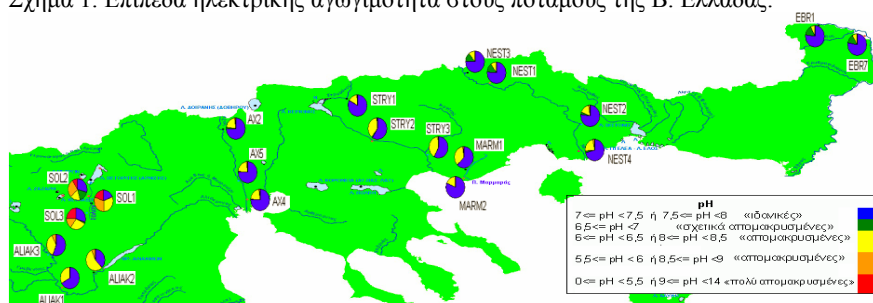
3.2 Ενεργός οξύτητα pH

Τα υψηλότερα μέσα επίπεδα pH παρουσιάζει ο Πεντάβρυσος και μετά ο Αλιάκμονας. Οι τιμές του pH στους σταθμούς των άλλων ποταμών είναι για το 50 - 75 % των δεδομένων στα «ιδανικά» ποιοτικά επίπεδα μεταξύ 7 και 8. Γενικά σε κανένα υδατόρευμα δεν εκτιμήθηκε κίνδυνος υποβάθμισης των υδάτων λόγω οξίνισής τους, αφού σε κάθε περίπτωση το pH ήταν στο 99 % των δεδομένων μεγαλύτερο από 6,5 (Σχήμα 2, Πίνακας 2).

Χωρικά τις υψηλότερες τιμές pH (ακόμη και $\text{pH} > 10$) παρουσιάζει ο Πεντάβρυσος. Από ανάντη προς κατάντη η διάμεση τιμή του pH μεταβάλλεται λίγο, ενώ η ποιοτική κατάσταση στον πιο κατάντη σταθμό είναι λίγο καλύτερη από ότι στους δυο ανάντη σταθμούς. Από τους υπόλοιπους ποταμούς γενικά τιμές pH λιγότερο αποκλίνουν από τις άριστες (7-8) είχαν οι ποταμοί της Θράκης (Νέστος και Έβρος). Ακολουθούν Αξιός, Στρυμόνας και Μαρμαράς ενώ στον Αλιάκμονα εποχιακά και διαχρονικά ανιχνεύθηκαν υψηλές τιμές pH (λίγο μεγαλύτερο από 8,5). Στο Αξιό και τον Έβρο, το pH τους δεν μεταβάλλεται από ανάντη προς κατάντη κάτι που δεν ισχύει για τους υπόλοιπους ποταμούς. Στο Στρυμόνα, Νέστο, Έβρο και λιγότερο στον Αξιό η διάμεση τιμή του pH παρουσιάζει μικρή αύξηση από ανάντη προς κατάντη, στον Μαρμαρά μικρή μείωση ενώ στους υπόλοιπους ποταμούς σημειώνονται αυξομειώσεις.



Σχήμα 1. Επίπεδα ηλεκτρικής αγωγιμότητα στους ποταμούς της Β. Ελλάδας.



Σχήμα 2 Επίπεδα pH ανά σταθμό δειγματοληψίας

Διαχρονικά στους Αξιό, Στρυμόνα, Νέστο και Αλιάκμονα παρατηρούνται αυξομειώσεις στις ετήσιες τιμές pH. Οι χαμηλότερες διάμεσες τιμές ήταν τα έτη 1987-’88. Την περίοδο 90-97 οι διάμεσες τιμές του pH ήταν γενικά αυξημένες σε σχέση με τα προηγούμενα έτη. Στον Έβρο αρχικά αυξημένες τιμές pH ακολουθούνται από μείωση με διάρκεια 6 ετών και κατόπιν ακολουθεί απότομη αύξηση το 1991 και ξανά 6 έτη μείωσης. Στους Πεντάβρυσο και Μαρμαρά η ανομοιομορφία των διαχρονικών μεταβολών του pH, μεταξύ των σταθμών δειγματοληψίας τους, ήταν μεγάλη και στους δυο.

Οι εποχιακές μεταβολές μεταξύ των ποταμών είναι εμφανείς όπως και μεταξύ των σταθμών δειγματοληψίας σε κάθε ποτάμι. Τις περισσότερο έντονες εποχιακές μεταβολές είχαν οι μικρότεροι (σε μήκος και όγκο νερού) ποταμοί Μαρμαράς και Πεντάβρυσο. Στο Στρυμόνα η παρέμβαση της Κερκίνης επηρεάζει το pH καθώς μειώνεται η παροχή του ποταμού κάποιους μήνες το χρόνο.

Ανοδικές τάσεις εκτιμήθηκαν για τους σταθμούς των ποταμών Αλιάκμονα, Αξιό, Στρυμόνα και Νέστο. Καθοδικές τάσεις εκτιμήθηκαν για τους σταθμούς δειγματοληψίας των ποταμών Πεντάβρυσος και Έβρος. Συγκριτικά οι ισχυρότερες ανοδικές τάσεις εκτιμήθηκαν για τον Νέστο χωρίς βέβαια να προκύπτει ιδιαίτερος λόγος ανησυχίας δεδομένου ότι οι τιμές του pH για το σύνολο του χρόνου διατηρούνται σε φάσμα "ιδανικών" τιμών. Στον Πεντάβρυσο οι καθοδικές τάσεις δείχνουν βελτίωση της ποιότητας αλλά οι τιμές παραμένουν σε επίπεδα άνω του 8,5.

3.3 Διαλυμένο οξυγόνο DO

Γενικά οι διάμεσες τιμές του διαλυμένου οξυγόνου ήταν υψηλές ($DO > 10$ mg/l) σε όλους τους σταθμούς των ποταμών (Σχήμα 3, Πίνακας 2). Τις υψηλότερες συγκεντρώσεις είχαν ο Αλιάκμονας και ο Μαρμαράς. Περιστασιακά πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις (< 4 mg/l) παρουσιάστηκαν στους Πεντάβρυσο και Έβρο.

Χωρικά, σε Έβρο, Μαρμαρά και Πεντάβρυσο σημειώνονται μικρές μειώσεις της διάμεσης τιμής τους DO από ανάντη προς κατάντη. Στο Νέστο η διάμεση τιμή του DO αυξάνει από ανάντη προς κατάντη, ενώ στους υπόλοιπους ποταμούς εμφανίζονται αυξομειώσεις. Σε κάθε περίπτωση η διάμεση συγκέντρωση διατηρείται σε επίπεδα άνω των 9 mg/l, ενώ για το σύνολο του χρονικού διαστήματος οι συγκεντρώσεις DO είναι πάνω από 8 mg/L στο 75 % των δεδομένων κάθε σταθμού. Παράλληλα οι διαφορές του εύρους των συγκεντρώσεων του DO μεταξύ των σταθμών δειγματοληψίας κάθε ποταμού δεν ήταν αρκετά μεγάλες ώστε να μεταβληθεί ουσιαστικά το ποιοτικό καθεστώς ως προς το DO κατά μήκος των ποταμών.

Διαχρονικά εκτός του πιο κατάντη σταθμού του Πεντάβρυσου, σε όλους τους άλλους σταθμούς κάθε ποταμού οι μεταβολές της διάμεσης συγκέντρωσης DO, όσο και του εύρους των συγκεντρώσεων από έτος σε έτος ήταν παρόμοιες, αντικατοπτρίζοντας την ομοιομορφία που υπήρχε στην συγκέντρωση του DO κατά μήκος των ποταμών.

Εποχιακά παρατηρείται μείωση της διάμεση τιμής DO κατά τους καλοκαιρινούς μήνες και τις αρχές του φθινοπώρου. Τις μεγαλύτερες εποχιακές διακυμάνσεις της διάμεσης συγκέντρωσης διαλυμένου οξυγόνου είχε ο Στρυμόνας, με μείωση της τάξης ακόμη και των 3 mg/l και κατόπιν ο Αλιάκμονας με μείωση της τάξης ως και 2,5 mg/l. Ιδιαίτερη περίπτωση αποτελεί ο Πεντάβρυσος, στον κατάντη σταθμό του οποίου η εποχιακή μείωση της διάμεσης συγκέντρωσης DO φτάνει και τα επίπεδα των 6 mg/l.

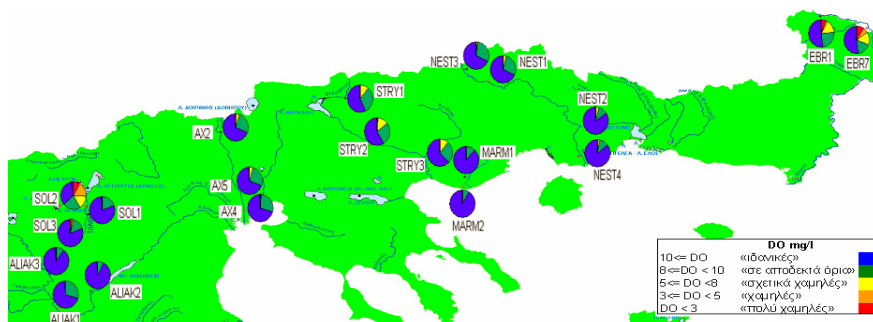
Ανοδικές τάσεις ανιχνεύθηκαν μόνο στους σταθμούς των ποταμών Αλιάκμονα, Πεντάβρυσο, Αξιό και Νέστο. Συγκριτικά οι μεγαλύτερες ανοδικές τάσεις (βάση του συντελεστή του Senn) εκτιμήθηκαν στον Στρυμόνα και τον Αξιό. Το γεγονός ότι στα ποτάμια αυτά η τάση είναι ανοδική αντικατοπτρίζει ότι μελλοντικά δεν αναμένεται υπό φυσιολογικές συνθήκες κίνδυνος υποβάθμισης των υδάτων λόγω χαμηλών συγκεντρώσεων σε διαλυμένο οξυγόνο. Το γεγονός ότι οι τάσεις που εκτιμήθηκαν δεν αναφέρονται ως στατιστικώς σημαντικές οφείλεται σε ελλείψεις δεδομένων κυρίως τα δύο τελευταία έτη (1996-1997).

3.4 Συγκέντρωση Νιτρικών NO_3

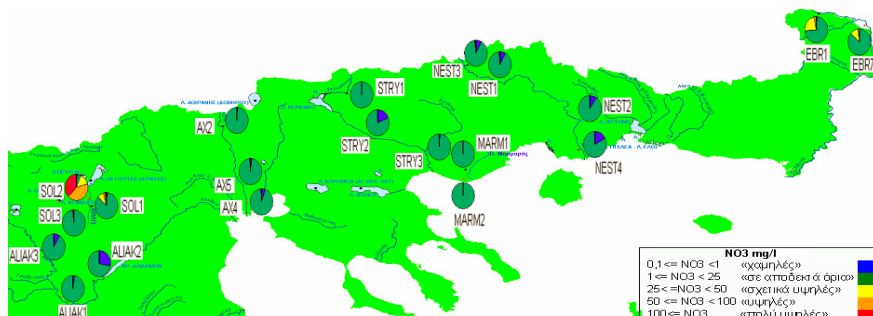
Γενικά τα μέσα επίπεδα νιτρικών κυμαίνονταν στους περισσότερους σταθμούς δειγματοληψίας μεταξύ 1 και 10 mg/l (Σχήμα 4, Πίνακας 2). Στους ποταμούς της Ευρώπης κυμαίνονται από 0,4 έως 4 mg/l (10). Περιστασιακά οι συγκεντρώσεις σε αρκετούς σταθμούς δειγματοληψίας ξεπερνούν αρκετά τα 10 mg/l. Υψηλότερες συγκεντρώσεις νιτρικών εμφάνισε ο Έβρος, ο Πεντάβρυσος και ο Αξιός. Ειδικά στο

Πεντάβρυσο στον πιο κατάντη σταθμό τα νιτρικά ξεπερνούν τα 100 mg/l στο 50 % των δεδομένων.

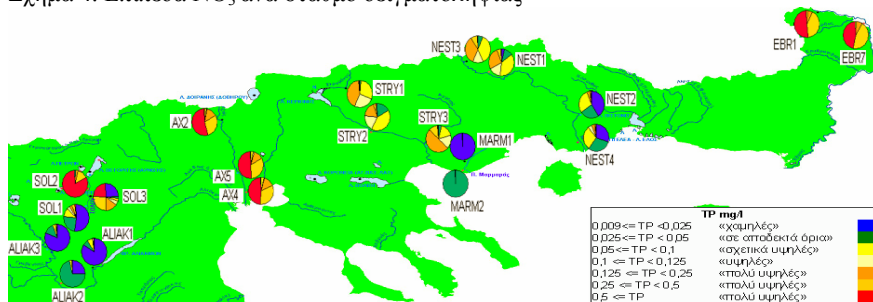
Χωρικά στους ποταμούς Αξιό, Νέστο και Έβρο οι διάμεσες συγκεντρώσεις παρουσιάζαν μείωση που ήταν λιγότερο από 1 mg/l στον Αξιό, 2 mg/l σε Νέστο και 3 mg/l στον Έβρο. Στους υπόλοιπους ποταμούς υπήρξαν αυξομειώσεις μέχρι τα 3 mg/l. Στο Πεντάβρυσο η διάμεση συγκέντρωση παρουσίαζε σταθερά αύξηση από ανάντη προς κατάντη φτάνοντας τα 90 mg/l. Στα περισσότερα ποτάμια υπήρξε και μεταβολή του ποιοτικού καθεστώτος ως προς τα νιτρικά.



Σχήμα 3. Επίπεδα DO ανά σταθμό δειγματοληψίας



Σχήμα 4. Επίπεδα NO₃ ανά σταθμό δειγματοληψίας



Σχήμα 5. Επίπεδα TP ανά σταθμό δειγματοληψίας

Στον Αλιάκμονα τα νιτρικά παρουσιάζουν αυξομειώσεις μέσα στην περίοδο μελέτης. Οι υψηλότερες συγκεντρώσεις μετρήθηκαν στον ανάντη σταθμό 3 το έτος 1997 (μέχρι και 20 mg/l). Στον Πεντάβρυσο οι μεταβολές της συγκέντρωσης των νιτρικών διαφέρουν μεταξύ των σταθμών του. Στον Αξιό οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις παρουσιάστηκαν γενικά τα έτη 1986, 1990 και 1997, στον Στρυμόνα το 1988 και 1997 και στον Έβρο το 1991.

Εποχιακά στον Αλιάκμονα από το τέλος της άνοιξης μέχρι αρχές φθινοπώρου οι διάμεσες τιμές νιτρικών είναι οι μικρότερες. Στον Αξιό, Στρυμόνα και Νέστο οι συγκεντρώσεις νιτρικών ήταν μειωμένες την ίδια περίοδο του έτους και αυξημένες το χειμώνα.

Εξαιρώντας τους Έβρο και Μαρμαρά στους υπόλοιπους ποταμούς εκτιμήθηκαν τάσεις σε τουλάχιστο ένα σταθμό δειγματοληψίας τους. Σε Αλιάκμονα, Αξιό και Στρυμόνα η τάση ήταν αυξητική, ενώ στον Πεντάβρυσο και Νέστο ήταν καθοδική. Ποσοτικά η μεγαλύτερες ανοδικές τάσεις εκτιμήθηκαν για τον Αλιάκμονα ενώ οι μικρότερες για τον Αξιό, υποδεικνύοντας ότι οι ρυθμοί αύξησης των συγκεντρώσεων των νιτρικών ήταν μεγαλύτεροι στον Αξιό σε σχέση με τα υπόλοιπα υδατορεύματα. Στο Στρυμόνα, Αξιό και Αλιάκμονα η τάση που βρέθηκε δεν χαρακτηρίστηκε ως στατιστικώς σημαντική εξαιτίας της έλλειψης δεδομένων για 2 συνεχόμενα έτη (1995-1996). Σύμφωνα όμως με τους Helsel και Hirsch (1992) θα μπορούσε η τάση να θεωρηθεί ως στατιστικώς σημαντική. Στο Πεντάβρυσο υπάρχουν σημαντικές ελλείψεις δεδομένων μετά το 1989. Στο Νέστο υπάρχει ικανοποιητικός αριθμός δεδομένων μέχρι και το 1994. Σε αμφότερες τις δυο τελευταίες περιπτώσεις αρκετοί κανόνες της θεωρίας ανάλυσης τάσεων παρακάμφθηκαν οπότε οι ευρισκόμενες τάσεις μπορεί να απορριφθούν.

3.5 Ολικός φώσφορος TP

Γενικά τις μεγαλύτερες διάμεσες συγκεντρώσεις ολικού φωσφόρου, της τάξης των 0,5 mg/l TP, είχαν κατά μήκος τους οι ποταμοί Αξιός και Έβρος (Σχήμα 5, Πίνακας 2). Ακολουθεί ο Στρυμόνας με διάμεσες τιμές συγκέντρωσης κατά μήκος του της τάξης των 0,1 mg/l TP. Μικρότερες τιμές παρουσιάζει ο Αλιάκμονας της τάξης των 0,01 mg/l TP. Στους ποταμούς της Ευρώπης η μέση συγκέντρωση είναι στα 10 µg/l (10).

Χωρικά από ανάντη προς κατάντη η διάμεση τιμή συγκέντρωσης TP εμφανίζει αυξομειώσεις κατά μήκος στους ποταμούς Αλιάκμονα, Στρυμόνα. Στον Πεντάβρυσο αυξάνει από ανάντη προς κατάντη (0,269 mg/l TP από τον 1^ο στο 2^ο και 0,602 mg/l TP από τον 2^ο στον 3^ο). Στους Αξιό, Νέστο και Έβρο η διάμεση συγκέντρωση TP μειώνεται από ανάντη προς κατάντη (μείωση της τάξης 0,02 - 0,05 mg/l TP).

Διαχρονικά στον Αλιάκμονα μία φορά τουλάχιστον σχεδόν κάθε έτος οι συγκεντρώσεις ολικού φωσφόρου ήταν υψηλότερες από 0,05 mg/l TP. Ακραίες τιμές σημειώθηκαν στον Πεντάβρυσο (50 και 200mg/l TP σε σχέση με τις συνήθεις τιμές γύρω στα 3 mg/l).

Εποχιακά οι μεταβολές του ολικού φωσφόρου παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές μεταξύ των ποταμών και τις εντονότερες μεταβολές είχαν οι Πεντάβρυσος και Έβρος. Στον Αλιάκμονα οι μεγαλύτερες διακυμάνσεις της διάμεσης συγκέντρωσης του TP καταγράφονται στο δεύτερο σταθμό με τις υψηλότερες τιμές από το καλοκαίρι μέχρι και το φθινόπωρο. Στον Πεντάβρυσο οι μεγαλύτερες εποχιακές διακυμάνσεις υπάρχουν στον κατάντη σταθμό. Στον Αξιό, Στρυμόνα και Νέστο παρατηρούνται εποχιακές διακυμάνσεις αλλού μεγαλύτερες και αλλού μικρότερες ανάλογα με τη θέση του

σταθμού και τις χρήσεις γης ανάντη. Στον Έβρο οι υψηλότερες διάμεσες συγκεντρώσεις καταγράφηκαν το φθινόπωρο και οι χαμηλότερες την άνοιξη.

Όσο αφορά τις τάσεις στον Αξιό γενικά η τάση είναι ανοδική και στους τρεις σταθμούς δειγματοληψίας του, επίσης το ίδιο ισχύει και στο Στρυμόνα στους κατάντη σταθμούς. Το αντίθετο ισχύει στο Νέστο για τον οποίο εκτιμήθηκαν καθοδικές τάσεις, όπως και στον ανάντη σταθμό του Πεντάβρυσου. Αν και όλες οι τάσεις εκτιμήθηκαν για επίπεδο σημαντικότητας 5 % ωστόσο οι σοβαρές ελλείψεις δεδομένων σε ορισμένους σταθμούς του Πεντάβρυσου και Νέστου θέτουν υπό αμφισβήτηση τα αποτελέσματα της ανάλυσης σε αυτούς τους σταθμούς. Τα αποτελέσματα στους υπόλοιπους σταθμούς δειγματοληψίας μπορεί να γίνουν αποδεκτά με βάση τους Helsel and Hirsch (1992) καθώς λείπουν τα δεδομένα μόνο των 2 τελευταίων ετών, ενώ κατά τα άλλα ο όγκος των δεδομένων είναι ικανοποιητικός.

4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Γενικά, τα επίπεδα της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, ενεργού οξυγόνου και διαλυμένου οξυγόνου στους περισσότερους σταθμούς δειγματοληψίας ήταν τέτοια ώστε τα ύδατα να υποστηρίζουν πλήθος χρήσεων (2, 26, 28). Ανάλογα με τον ποταμό τα υψηλά επίπεδα κυρίως ολικού φωσφόρου αλλά και τα αυξημένα επίπεδα νιτρικών ήταν αποτέλεσμα των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων ή παραγόντων εκτός Ελληνικών συνόρων. Ως προς την ενεργό οξύτητα η μικρή ρυθμιστική ικανότητα των υδάτων των ποταμών είχε ως αποτέλεσμα εξωτερικοί τοπικοί παράγοντες όπως κλίμα, παροχή, ανθρώπινες επεμβάσεις και κυρίως γεωλογία να επηρεάζουν τη τιμή της να την διαφοροποιήσει της μεταξύ των σταθμών ενός ποταμού ακόμη και για την ίδια εποχή. Ως προς το DO φάνηκε ότι μόνο ισχυροί παράγοντες ήταν σε θέση να μεταβάλλουν την συγκέντρωσή του όπως πχ στον Πεντάβρυσο στην κατάντη θέση. Οι ανοδικές τάσεις που εκτιμήθηκαν για τα ύδατα είναι σίγουρα ανησυχητικές ιδιαίτερα όταν συνδυάζονται με ήδη αυξημένα επίπεδα παραμέτρων. Εξάιρεση αποτελεί η συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου για την οποία τόσο τα αυξημένα επίπεδα όσο και οι ανοδικές τάσεις είναι ένδειξη «καλής» ποιότητας.

Στους σταθμούς του Αλιάκμονα μόνο σ' αυτόν που βρίσκεται κατάντη των εισροών της πόλης των Γρεβενών παρατηρείται κάποιου βαθμού υποβάθμιση της ποιότητας. Τα «καλύτερα» επίπεδα DO, TP και NO₃ και EC ανάντη και κατάντη του σταθμού αυτού φανερώνουν ότι στην συγκεκριμένη θέση το νερό επηρεάζονταν προφανώς από τα λύματα της πόλης των Γρεβενών. Γενικά τα ύδατα του ποταμού δεν είχαν υποστεί κάποιου είδους σοβαρής υποβάθμισης και ήταν ικανά να υποστηρίξουν πλήθος χρήσεων (άρδευση, ύδρευση, κτλ).

Ο Πεντάβρυσος είναι το υδατόρευμα με την υψηλότερη επιβάρυνση. Τα επίπεδα των παραμέτρων αυξάνουν από ανάντη προς κατάντη. Οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες (βιομηχανία, γεωργία και η πόλη της Πτολεμαΐδας) επιβαρύνουν σημαντικά το ποτάμι και την λίμνη Βεγορίτιδα που είναι ο τελικός αποδέκτης.

Στον Αξιό γενικά τα επίπεδα των παραμέτρων δείχνουν ότι τα νερά του είναι ικανά να υποστηρίξουν πλήθος χρήσεων. Τα χαμηλά επίπεδα αλατότητας ευνοούσαν την χρήση των υδάτων του για γεωργικούς σκοπούς. Για τις ευαίσθητες καλλιέργειες οι περιοδικά υψηλότερες των 700 μS/cm τιμές της EC δεν αποτελούσαν πρόβλημα καθώς η συχνότητα εμφάνισης είναι πολύ μικρή. Οι σχετικά υψηλές συγκεντρώσεις νιτρικών και πολύ υψηλές φωσφορικών παραμένουν σταθερές κατά μήκος του ποταμού. Γενικά

η ποιοτική υποβάθμιση οφείλεται στην γείτονα χώρα, ενώ η εγχώρια επιβάρυνση είναι ελάχιστη. Σ' αυτό σίγουρα συμβάλλει η μη ύπαρξη κάποιου μεγάλου αστικού κέντρου στην λεκάνη απορροής του ποταμού.

Ο Στρυμόνας παρουσιάζει ικανοποιητική εικόνα σχεδόν για το σύνολο των παραμέτρων. Εξαιρέση αποτελούν τα αυξημένα επίπεδα ολικού φωσφόρου τα οποία μειώνονταν αρχικά από ανάντη προς κατάντη με την μεσολάβηση της λίμνης Κερκίνης. Μικρή αύξηση παρατηρείται μετά την συμβολή του παραπόταμου Αγγίτη και των στραγγιστικών τάφρων. Το ίδιο παρατηρείται και για τα νιτρικά. Η μικρή αύξηση της EC προς τα κατάντη φανερώνει την επίδραση της γεωργίας που είναι εντατική στην λεκάνη απορροής του ποταμού. Η ποιότητα του νερού του Στρυμόνα μπορεί να υποστηρίξει πλήθος χρήσεων, ενώ προσοχή χρειάζονταν τα επίπεδα του ολικού φωσφόρου.

Στον Μαρμαρά για τις συγκεντρώσεις των θρεπτικών δεν υπάρχει ικανοποιητικός όγκος δεδομένων για την διεξαγωγή συμπερασμάτων. Μόνο τα επίπεδα της EC είναι πολύ αυξημένα κυρίως στον κατάντη σταθμό, γεγονός που αποδίδεται σε συμπύκνωση των αλάτων λόγω μείωσης της παροχής κατά τους θερινούς κυρίως μήνες και κυρίως σε διείσδυση του θαλασσινού νερού στον ποταμό. Τέλος οι χρήσεις των υδάτων περιορίζονταν κυρίως λόγω μειωμένης παροχής.

Στο Νέστο τα αυξανόμενα επίπεδα της EC και του pH προς τα κατάντη οφείλονταν στις διαχειριστικές πρακτικές (έντονη γεωργική χρήση γης) των εδαφών της λεκάνης αποστράγγισης του ποταμού. Τα επίπεδα νιτρικών, ολικού φωσφόρου και διαλυμένου οξυγόνου μειώνονταν προς κατάντη φανερόντας αφενός ότι κυρίως η ρύπανση του ποταμού ήταν προϊόν γειτονικών χωρών και αφετέρου ότι η απουσία μεγάλων αστικών κέντρων και βιομηχανιών στην περιοχή αποστράγγισης επιδρά ευεργετικά στο καθεστώς των υδάτων του ποταμού. Γενικά το νερό του ποταμού και ιδιαίτερα στα κατάντη του ποταμού προσφέρεται για όλες τις χρήσεις.

Στον Έβρο, οι σταθμοί βρίσκονται όλοι συγκεντρωμένοι σε μικρή έκταση και έτσι δεν υπάρχει δυνατότητα συζήτησης για όλο το μήκος του ποταμού. Οι υψηλές συγκεντρώσεις φωσφορικών και τα αυξημένα επίπεδα νιτρικών φανερώνουν σημαντική ρύπανση των νερών από τη Βουλγαρία. Οι γεωργικές πρακτικές έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση της EC προς κατάντη αλλά και μείωση των θρεπτικών στοιχείων. Η ενεργός οξύτητα και το διαλυμένου οξυγόνου παρουσιάζουν σχετική σταθερότητα και ικανοποιητικές τιμές. Περιστασιακά υπάρχουν προβλήματα χαμηλών τιμών διαλυμένου οξυγόνου (< 4mg/l) με θανάτους ψαριών. Η ποιότητα του νερού του ποταμού προσφέρεται για πλήθος χρήσεων (άρδευση, αλιεία κτλ), όμως παρόλα αυτά συγκέντρωση DO και TP σίγουρα έρχιζαν προσοχής και βελτίωσης.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Αντωνόπουλος Β. 1982. Ποιοτική κατάσταση ποταμού Αξιού, Δελτίο Ελληνικής Επιτροπής Αρδεύσεων και Αποστράγγισεων, τεύχος 1-2: 37-44.
2. Αντωνόπουλος Β. Ζ., 2003. Υδραυλική Περιβάλλοντος και Ποιότητα Επιφανειακών Υδάτων, Εκδόσεις Γιαχούδη, Θεσσαλονίκη, σελ 520..
3. Antonopoulos V.Z. and D.M. Papamichail, 2002. Trend analysis of water quality parameters for two transboundary rivers in northern Greece. Proceedings of the International Conference "Protection and restoration of the environment VI" Skiathos, Pages 83-90.
4. Antonopoulos V.Z. and D.M. Papamichail, 1991. Stochastic analysis of water quality parameters in streams. Tsakiris G. (ed.) Water Resources Management and Technology, Balcema, pp 369-376.

5. Antonopoulos V.Z. D.M. Papamichail and K.A. Mitsiou, 2001. Statistical and trend analysis of water quality and quantity data for the Strymon River in Greece. *Hydrology and Earth System Sciences*, 5(4), 679-691.
6. Αργυρόπουλος Δ.Σ. και Ι.Γ. Γκανούλης, 1993. Ανάλυση Συσχέτισης Παραμέτρων Ποιότητας Νερών του Αξιού Ποταμού. *Τεχνικά Χρονικά Α.*, Τομ. 13, Τεύχος 4 : 1-37.
7. Carbonnel, J.P. , and M. Maybeck, 1975. Quality variations of the Mekong river at Phnom Penh, Cambodia, and chemical transport in the Mekong Basin. *J. of Hydrology*, 27:249-265.
8. Chesapeake Bay Program, 1996. Scientific & Technical Advisory Committee (STAC). *Integrated Analysis of Chesapeake Bay Monitoring Data*. STAC Publication 97-2. 21-22 November, 1996 Solomons Maryland.
9. E.E.A., 1995. *European Rivers and Lakes, Assessment of their Environmental State*. Prepared by Danish Ministry of Environment and Energy. Peter Kristensen and Hans Ole Hansen (eds). ISBN: 87-90198-01-8.
10. E.E.A, 2003. *Europe's Water: An Indicator – based assessment*, European Environment Agency, Topic report 1/2003, Luxembourg, 97 pp.
11. E.C., 2000. Directive 2000/60/EEC 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*, L 327/1.
12. Van Belle G. and J. P. Hughes, 1984. Nonparametric Tests for Trend in Water Quality. *Water Resources Research*, 20 (1): 127-136.
13. Helsel, D.R. and R.M. Hirsch, 1992. *Statistical Methods in Water Resources*. Elsevier Science Publishers B.V., The Netherlands..
14. Hirsch R. M. and J. R. Slack, 1984. A Nonparametric Trend Test for Seasonal Data With Serial Dependence. *Water Resources Research*, 20(6): 727-732.
15. Hirsch R. M. , J. R. Slack, and R. A. Smith, 1982. Techniques of Trend Analysis for Monthly Water Quality Data. *Water Resources Research*, 18(1): 107-121.
16. Hirsch R. M. , R. B. Alexander and R. A. Smith, 1991. Selection of Methods for the Detection and Estimation of Trends in Water Quality. *Water Resources Research*, 27(5): 803-813.
17. Κυριακίδης Ι.Ν., 2004. Εκτίμηση της φυσικοχημικής κατάστασης και των μακροπρόθεσμων τάσεων μεταβολής του καθεστώτος των υδάτινων επιφανειακών συστημάτων της Ελλάδας με ανάλυση δεδομένων του Υπουργείου Γεωργίας. *Μεταπτυχιακή διατριβή ,Τμήμα Γεωπονίας, Α.Π.Θ. Θεσσαλονίκη*.
18. Lettenmaier D.P. , E.R. Hooper, C. Wagoner, and K.B. Faris, 1991. Trends in stream quality in the Continental United States, 1978-1987. *Water Resources Research*, 27 (3): 327-339.
19. Mayer A. and J. Park, 2002. Multivariate non-parametric tests of trend when the data are incomplete. *Elsevier. Statistics and Probability Letters* 57: 281-290.
20. Meybeck M., D. V. Chapman, and R. Helmer, 1990. *Global Freshwater Quality – A First Assessment*. WHO and UNEP, B. Blackwell, Ltd., U.K.
21. Ogle K. M. , D. A. Peterson, B. Spillman, and R. Padilla, 1998. *Water Quality of Rob Roy Reservoir and Lake Owen, Albany County, and Granity Springs and Crystal Lake Reservoirs, Laranie County, Wyoming, 1997-98*. *Water Resources Investigations Report 99-4220*.
22. Παπαμιχαήλ, Δ.Μ., 1991. Στατιστική Υδρολογία. Τμήμα Γεωπονίας, Α.Π.Θ. Θεσσαλονίκη, 1991. σελ. 105
23. Skoulikidis, N.T., I. Bertahas and T. Koussouris, 1998. The environmental state of freshwater resources in Greece (rivers and lakes), *Environmental Geology*, 36(1-2):1-17.
24. Trommer J.T. , M.J. DelCharco, and B.R. Lewelling, 1999.. *Water Budget and Water Quality of Ward Lake, Flow and Water-Quality Characteristics of the Braden River Wstuary, and the Effects of Ward Lake on the Hydrologic System, West-Central Florida*.U.S. Geological Survey. *Water Resources Investigations Report 98-4251*.
25. Υπουργείο Γεωργίας, 2001. Ποιοτικά χαρακτηριστικά του νερού των ποταμών και των λιμνών της Ελλάδας, Υπουργείο Γεωργίας, Διεύθυνση Εγγειοβελτιωτικών Εργων και Διαχείρισης Υδατικών και Εδαφικών Πόρων, τόμος Β, Αθήνα.
26. WHO. *Guidelines for Drinking Water Quality*, 1984. Vol. 1. Recommendations. Vol. 2. Health Criteria and Other Supporting Information. World Health Organization, Geneva.

27. Zalidis G, 1992. The National Waterlands Inventory for Greece Prospects and Progress. Pp 178-184. In M. Mozer, R.C. Drentice and J. Van Vessen (eds). Waterflow and Waterland Conservation in the 1990's. A global prospective. St. Peterbourg Beach, Florida, U.S.A., November 12-19, 1992.IWRB Special Publication No 26.
28. Ζαλίδης Χ.Γ. & Α.Λ. Μαντζαβέλας, 1994.Απογραφή των Ελληνικών Υγροτόπων ως Φυσικών Πόρων. Ελληνικό Κέντρο Βιοτόπων – Υγροτόπων (Ε.Κ.Β.Υ.), Thessaloniki.

**ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ
ΜΟΝΑΔΙΑΙΩΝ ΥΔΡΟΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΗ
ΒΟΗΘΕΙΑ ΤΗΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΘΕΙΣΑΣ
ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΗΣ ΑΙΧΜΗΣ ΜΙΑΣ ΡΑΓΔΑΙΑΣ
ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ**

Π.Ε. Γεωργίου*, Δ.Μ. Παπαμχαήλ και Δ.Ν. Καραμούζης
Εργαστήριο Γενικής και Γεωργικής Υδραυλικής και Βελτιώσεων
Γεωπονική Σχολή Α.Π.Θ., 54124 Θεσσαλονίκη, * e-mail: pantaz@agro.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή για την εκτίμηση του πλημμυρογραφήματος της ραγδαίας βροχόπτωσης της 23-25 Δεκεμβρίου 2003, σε μια προτεινόμενη θέση φράγματος στο χείμαρρο Πετρένια Χαλκιδικής χρησιμοποιήθηκαν τα συνθετικά μοναδιαία υδρογραφήματα της Sierra Nevada και της SCS. Η εκτίμηση του πλημμυρογραφήματος έγινε με τη χρησιμοποίηση της απορροϊκής βροχής (effective rainfall) της ραγδαίας βροχόπτωσης, που εκτιμήθηκε με τη βοήθεια του απορροϊκού συντελεστή (curve number). Με τη βοήθεια της υδραυλικά υπολογισθείσας πλημμυρικής αιχμής της ραγδαίας βροχόπτωσης και των εκτιμήσεων του πλημμυρογραφήματος έγινε συγκριτική ανάλυση των δύο Συνθετικών Μοναδιαίων Υδρογραφημάτων.

**COMPARATIVE ANALYSIS OF SYNTHETIC UNIT
HYDROGRAPHS BY USING THE CALCULATED
PEAK FLOW OF AN EXTREME RAINFALL**

P.E. Georgiou, D.M. Papamichail and D.N. Karamouzis
Laboratory of General and Agricultural Hydraulics and Land Reclamation
Faculty of Agriculture, Aristotle University, 54124 Thessaloniki, Greece

ABSTRACT

In this paper, for the estimation of flood hydrographs of the 23-25 December 2003 extreme rainfall for a suggested dam location on the Petrenias stream in Halkidiki, the Sierra Nevada and SCS Synthetic Unit Hydrographs were used. Flood hydrographs for this location were estimated by using the 23-25 December 2003 effective rainfall, as estimated using the Curve Number procedure. Based on the calculated peak flow of the extreme rainfall and the estimated flood hydrographs it was done the comparative analysis of the two synthetic unit hydrographs procedures.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το πιο σημαντικό στοιχείο ενός υδρογραφήματος πλημμύρας, που είναι βασικό στις υδρολογικές μελέτες αλλά και στις μελέτες υδραυλικών κατασκευών αντιπλημμυρικής προστασίας είναι η εκτίμηση του μεγέθους της αιχμής του. Η εκτίμηση γίνεται είτε με τη βοήθεια μοντέλων βροχής-απορροής είτε με τη βοήθεια συνθετικών μοναδιαίων υδρογραφημάτων [1,2,3]. Το αντικείμενο της εργασίας αυτής είναι η εκτίμηση και η συγκριτική αξιολόγηση των υδρογραφημάτων πλημμύρας, μιας ραγδαίας βροχόπτωσης, σε μια προτεινόμενη θέση φράγματος, στο χειμάρρο Πετρένια Χαλκιδικής [4] με τη χρησιμοποίηση των συνθετικών μοναδιαίων υδρογραφημάτων που βασίζονται στα αδιάστατα μοναδιαία υδρογραφήματα της Sierra Nevada και της S.C.S. [1,2,5,6,7,8,9]. Η συγκριτική αξιολόγηση έγινε και με τη βοήθεια της υδραυλικά υπολογισθείσας πλημμυρικής αιχμής, της ραγδαίας βροχόπτωσης της 23-25 Δεκεμβρίου 2003 στην προτεινόμενη θέση του φράγματος. Η ραγδαία αυτή βροχόπτωση καταγράφηκε από τον εντός της λεκάνης του Πετρένια αυτόματο μετεωρολογικό σταθμό του Γοματίου και προκάλεσε πλημμυρικά φαινόμενα στην περιοχή. Στην εκτίμηση των υδρογραφημάτων πλημμύρας χρησιμοποιήθηκε η απορροϊκή βροχή της ραγδαίας βροχόπτωσης που εκτιμήθηκε με τη βοήθεια του απορροϊκού συντελεστή (Curve Number) [1,2].

2. ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1. Συνθετικά μοναδιαία υδρογραφήματα

2.1.1. Συνθετικό Μοναδιαίο Υδρογράφημα (Σ.Μ.Υ.) της Sierra Nevada (SN)

Η μέθοδος του Σ.Μ.Υ. της Sierra Nevada περιγράφεται στο Design of Small Dams [9] και βασίζεται στο αδιάστατο Μ.Υ. της Sierra Nevada. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, ο χρόνος υστέρησης του Σ.Μ.Υ. υπολογίζεται με τη σχέση:

$$L_g = 0.1776C \left[\frac{L L_c}{\sqrt{S}} \right]^N \quad \text{ή} \quad L_g = 0.5541 \left[\frac{L L_c}{\sqrt{S}} \right]^{0.33} \quad (1)$$

όπου: L_g = χρόνος υστέρησης του Σ.Μ.Υ. σε ώρες, C = σταθερά που παίρνεται ίση με 26 K_n , K_n = συντελεστής του Manning που παίρνεται ίσος με 0.12, L = μέγιστο μήκος διαδρομής του κυρίως ρεύματος σε km, L_c = μήκος του κυρίως ρεύματος από την έξοδο της λεκάνης μέχρι την προβολή του κέντρου βάρους της λεκάνης πάνω στο κύριο ρεύμα σε km, S = κλίση του κυρίως ρεύματος σε m/m και N = σταθερά ίση με 0.33.

Η διάρκεια της μοναδιαίας βροχής, D από την οποία προέρχεται το Σ.Μ.Υ. δίνεται από τη σχέση:

$$D = L_g / 5.5 \quad (2)$$

Η τετμημένη του Σ.Μ.Υ. (χρόνος), η οποία προέρχεται από απορροϊκή βροχή 1 mm υπολογίζεται με τη σχέση

$$t_m = T/100 * (L_g + D/2) \quad (3)$$

όπου: t_m = χρόνος του Σ.Μ.Υ. σε ώρες, T = παίρνεται από τον Πίνακα του αδιάστατου Μ.Υ. της Sierra Nevada [2,9], L_g και D όπως υπολογίζονται από τις σχέσεις (1) και (2), αντίστοιχα.

Η τεταγμένη του Σ.Μ.Υ. (παροχή), η οποία προέρχεται από απορροϊκή βροχή 1 mm υπολογίζεται με τη σχέση:

$$Q = 0.01157 * \left\{ \frac{A * q}{(L_g + D/2)} \right\} \quad (4)$$

όπου: Q = παροχή του Σ.Μ.Υ. σε m^3/sec , A = έκταση της υδρολογικής λεκάνης σε km^2 και q = αδιάστατη παροχή που παίρνεται από τον Πίνακα του αδιάστατου Μ.Υ. της Sierra Nevada [2,9].

2.1.2. Συνθετικό Μοναδιαίο Υδρογράφημα (Σ.Μ.Υ.) της S.C.S.

Η μέθοδος του Σ.Μ.Υ. της S.C.S. βασίζεται στο αδιάστατο Μ.Υ. της S.C.S. [1,2]. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, η παροχή αιχμής ενός υδρογραφήματος που προέρχεται από βροχή διάρκειας D ωρών δίνεται από τη σχέση:

$$Q_p = (0.75AP_r) / (3600t_p) \quad (5)$$

όπου: Q_p = παροχή αιχμής σε m^3/sec , A = έκταση της υδρολογικής λεκάνης σε στρέμματα, $P_r = 1$ mm εφόσον πρόκειται για Μ.Υ. και t_p είναι ο χρόνος αιχμής σε ώρες, που υπολογίζεται με τη σχέση:

$$t_p = L_g + D/2 \quad (6)$$

Η τετμημένη και η τεταγμένη του Μ.Υ. υπολογίζονται με τις σχέσεις:

$$t = t_d * t_p \quad (7)$$

$$Q = Q_d * Q_p \quad (8)$$

όπου: Q = παροχή Μ.Υ. σε m^3/sec , Q_p = παροχή αιχμής σε m^3/sec , t = χρόνος μοναδιαίου υδρογραφήματος, t_p = χρόνος αιχμής σε ώρες και Q_d , t_d = αδιάστατη παροχή και αδιάστατος χρόνος, αντίστοιχα, που παίρνονται από Πίνακα [1,2].

2.2. Εκτίμηση απορροϊκής βροχής

Η απορροή κατά τη διάρκεια της πλημμύρας εξαρτάται από την τοπογραφική διαμόρφωση της λεκάνης, τη διαπερατότητα των εδαφών, το είδος φυτοκάλυψης και τις ατμοσφαιρικές συνθήκες.

Σύμφωνα με τη S.C.S. η απορροϊκή βροχή Pe δίνεται από τη σχέση [1,2]:

$$Pe = (P - 0.2S)^2 / (P + 0.8S) \quad (9)$$

όπου: Pe = απορροϊκή βροχή (mm), P = βροχόπτωση (mm) και S = μέγιστη ικανότητα συγκράτησης υγρασίας του εδάφους ή αποθηκευτικότητα (mm).

Το S σε mm υπολογίζεται με τη σχέση:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (10)$$

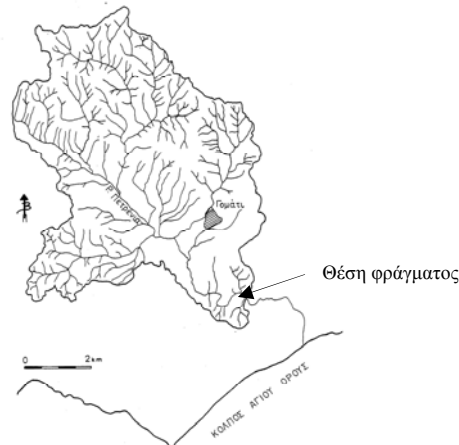
όπου: CN = απορροϊκός συντελεστής (curve number), ο οποίος αντιπροσωπεύει τη συνδυασμένη επίδραση του εδάφους, του τρόπου χρήσης και διαχείρισης αυτού, των καλλιεργητικών συνθηκών και της προηγούμενης υγρασιακής κατάστασης του εδάφους [1,2].

Για τις συνθήκες των πλημμυρικών απορροών η εκτίμηση της αποθήκευσης S γίνεται με τη βοήθεια του απορροϊκού συντελεστή (CN), που αντιστοιχεί σε υγρασιακή κατάσταση τύπου III και υπολογίζεται ως συνάρτηση του CN_{II} , με την παρακάτω σχέση [2,10]:

$$CN_{III} = \frac{CN_{II}}{0.4036 + 0.0059CN_{II}} \quad (11)$$

3. ΕΦΑΡΜΟΓΗ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η εφαρμογή αφορά την εκτίμηση των υδρογραφημάτων πλημμύρας μιας ραγδαίας βροχόπτωσης στο χειμάρρο Πετρένια Χαλκιδικής, στον οποίο μελετάται η κατασκευή φράγματος για την αποθήκευση νερού για ύδρευση και άρδευση [4]. Η υδρολογική λεκάνη του Πετρένια μέχρι την προτεινόμενη θέση του φράγματος (Σχήμα 1), έχει έκταση 41.45 km², μέση κλίση 27.75 %, περίμετρο 38.03 km, μέσο υψόμετρο 296.77 m, μέγιστο υψόμετρο 670 m και ελάχιστο υψόμετρο 29 m. Το μέγιστο μήκος διαδρομής μέχρι τη θέση του φράγματος είναι 13.88 km, το μήκος του κυρίως ρεύματος από τη θέση του φράγματος μέχρι την προβολή του κέντρου βάρους της λεκάνης πάνω στο κύριο ρεύμα είναι 7.75 km, ενώ η κλίση του κυρίου ρέματος είναι 0.06 m/m.



Σχήμα 1. Υδρολογική λεκάνη του Πετρένια Γοματίου Χαλκιδικής

Τις απογευματινές ώρες της 24^{ης} Δεκεμβρίου 2003 έλαβε χώρα μια έντονη πλημμύρα του ρέματος Πετρένια, στην περιοχή του Γοματίου Χαλκιδικής, η οποία και προκάλεσε μεγάλες ζημιές. Για την εκτίμηση του υδρογραφήματος πλημμύρας χρησιμοποιήθηκε το βροχογράφημα της βροχόπτωσης, από 23-25 Δεκεμβρίου 2003 από βροχογράφο του αυτόματου μετεωρολογικού σταθμού του Γοματίου, ο οποίος βρίσκεται εντός της υδρολογικής λεκάνης (Σχήμα 1). Η βροχόπτωση άρχισε τις πρώτες πρωινές ώρες της 23^{ης} Δεκεμβρίου 2003 με μικρή ένταση και κορύφωση αυτής τις απογευματινές ώρες της 24^{ης} Δεκεμβρίου 2003, οπότε και παρατηρήθηκε η μέγιστη ένταση, ενώ στη συνέχεια υπήρξε ύφεση της καταγίδας και τα μεσάνυχτα της 25^{ης} Δεκεμβρίου 2003 σταμάτησε η βροχόπτωση. Στον Πίνακα 1 δίνονται τα μέγιστα ύψη βροχής διαφόρων διαρκειών της βροχόπτωσης 23-25 Δεκεμβρίου 2003 στο σταθμό του Γοματίου, ενώ στο Σχήμα 2 φαίνονται οι ωριαίες εντάσεις της παραπάνω ραγδαίας βροχόπτωσης.

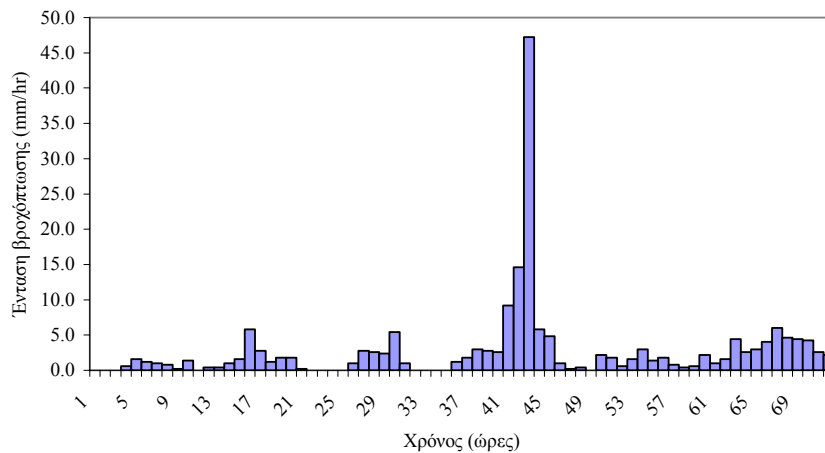
Από τον Πίνακα 1 προκύπτει ότι, το συνολικό ύψος βροχής του επεισοδίου ανήλθε σε 194.4 mm και αφορά το 34% περίπου του μέσου συνολικού ετήσιου ύψους βροχής της περιοχής που είναι 575 mm. Η καμπύλη έντασης – διάρκειας – περιόδου επαναφοράς που έχει μελετηθεί στο σταθμό της Μεγάλης Παναγιάς [7], ο οποίος βρίσκεται πλησίον του σταθμού του Γοματίου δίνεται από τη σχέση:

$$i = \frac{20.5069T^{0.1613}}{t^{0.64}} \quad (12)$$

όπου: i =ένταση βροχής σε mm/hr, T =περίοδος επαναφοράς σε έτη και t =διάρκεια βροχής σε ώρες.

Πίνακας 1. Μέγιστα ύψη βροχής διαφόρων διαρκειών της βροχόπτωσης 23-25 Δεκεμβρίου 2003 στο σταθμό του Γοματίου Χαλκιδικής

Διάρκεια (ώρες)	Περίοδος εμφάνισης	Ύψος βροχής (mm)
72	23/12-25/12	194.4
48	24/12-25/12	169.8
24	24/12 (01:00)-25/12(01:00)	111.0
12	24/12(10:00)-24/12(22:00)	94.2
6	24/12(14:00)-24/12(20:00)	84.2
3	24/12(13:00)-24/12(16:00)	71.0
1	24/12 (17:00-18:00)	47.2



Σχήμα 2. Βροχογράφημα της βροχόπτωσης 23-25 Δεκεμβρίου 2003 στο σταθμό του Γοματίου Χαλκιδικής

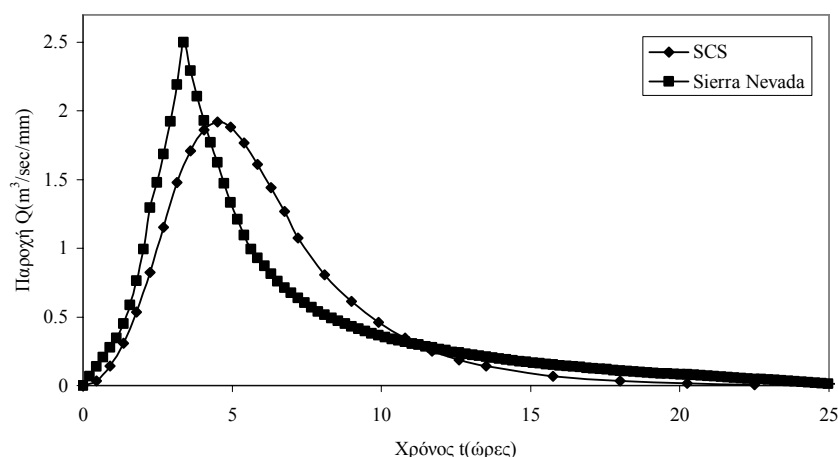
Η περίοδος επαναφοράς για τις βροχοπτώσεις διάρκειας 3 ωρών και 1 ώρας του Πίνακα 1, όπως προκύπτει από τη σχέση (12) είναι περίπου 200 έτη. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η βροχόπτωση της 23-25 Δεκεμβρίου 2003 ήταν ραγδαία και με ιδιαίτερα μεγάλη περίοδο επαναφοράς.

Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι ο ακριβής προσδιορισμός της περιόδου επαναφοράς των βροχοπτώσεων απαιτεί την ύπαρξη σχέσης της παραπάνω μορφής για τον ίδιο το σταθμό, η κατασκευή της οποίας απαιτεί αρκετά δεδομένα, τα οποία δεν ήταν διαθέσιμα.

Στη συνέχεια έγινε η εκτίμηση των υδρογραφημάτων πλημμύρας με τη βοήθεια του βροχογραφήματος της βροχόπτωσης της 23-25 Δεκεμβρίου 2003 του σταθμού του Γοματίου και των συνθετικών μοναδιαίων υδρογραφημάτων της Sierra Nevada και της S.C.S. (Παράγραφος 2.1). Για την εκτίμηση των υδρογραφημάτων πλημμύρας χρησιμοποιήθηκε η απορροϊκή βροχή της ραγδαίας βροχόπτωσης, που εκτιμήθηκε με τη βοήθεια του απορροϊκού συντελεστή (Curve Number) (Παράγραφος 2.2).

Για την περίπτωση της υδρολογικής λεκάνης του Πετρένια μέχρι την προτεινόμενη θέση του φράγματος (Σχήμα 1), χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (1) μέχρι (8) των διαδικασιών των Σ.Μ.Υ. της Sierra Nevada και της S.C.S., υπολογίζονται ο χρόνος υστέρησης (L_g), η διάρκεια της μοναδιαίας βροχής (D), ο χρόνος (t_m) και η παροχή (Q) του Σ.Μ.Υ. της Sierra Nevada και η παροχή αιχμής (Q_p) και ο χρόνος αιχμής (t_p) του Σ.Μ.Υ. της S.C.S. και είναι: $L_g=4.13$ ώρες, $D=0.75$ ώρες, $t_m=0.045T$, $Q=0.1065$, $t_p=4.50$ ώρες και $Q_p=1.92$ m³/sec.

Με βάση τα παραπάνω υπολογίζονται τα Συνθετικά Μοναδιαία Υδρογραφήματα διάρκειας $D=0.75$ ώρες της λεκάνης του χειμάρρου Πετρένια και φαίνονται στο Σχήμα 3.



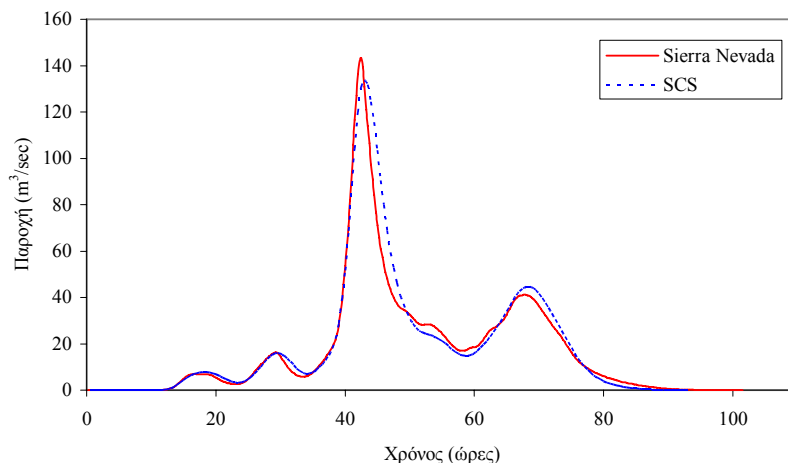
Σχήμα 3. Συνθετικά Μοναδιαία Υδρογραφήματα της Sierra Nevada και της SCS διάρκειας $D=0.75$ ωρών της λεκάνης του χειμάρρου Πετρένια

Τα συνθετικά μοναδιαία υδρογραφήματα που χρησιμοποιήθηκαν είναι διάρκειας 0.25 ωρών και για τις δύο περιπτώσεις και η διερεύνησή τους έγινε με τη βοήθεια των αντίστοιχων μοναδιαίων υδρογραφημάτων διάρκειας 0.75 ωρών του Σχήματος 3 και τη διαδικασία της S-καμπύλης [1,2].

Η απορροϊκή βροχή του μετρημένου βροχογραφήματος της 23-25 Δεκεμβρίου 2003, του Γοματίου (Σχήμα 2), υπολογίστηκε με τη βοήθεια της διαδικασίας του απορροϊκού συντελεστή (Curve Number) της SCS, που περιγράφηκε στην Παράγραφο 2.2. Ο απορροϊκός συντελεστής (CN), για υγρασιακή κατάσταση τύπου II, για την περίπτωση της λεκάνης του Πετρένια εκτιμήθηκε με τη βοήθεια της διαπερατότητας των εδαφών και της φυτοκάλυψης, ότι είναι ίσος με 74, οπότε η αποθήκευση S από τη σχέση (10) είναι ίση με 90 mm. Για τη λεκάνη του Πετρένια, για την περίπτωση της ραγδαίας βροχόπτωσης ο απορροϊκός συντελεστής αναφέρεται σε υγρασιακή κατάσταση τύπου III, οπότε ο CN_{III} υπολογίστηκε με τη σχέση (11) και για CN_{II} ίσο με 74 βρέθηκε ότι είναι ίσος με 88. Στη συνέχεια με την εφαρμογή της σχέσης (10) για $CN=CN_{III}$ βρέθηκε ότι η αποθήκευση S για τις συνθήκες των πλημμυρικών απορροών είναι ίση με 35 mm. Για $S=35$ mm, η σχέση (9) γίνεται:

$$Pe = (P - 7)^2 / (P + 28) \quad (13)$$

Με βάση τη σχέση (13) υπολογίζεται το βροχογράφημα της απορροϊκής βροχής της 23-25 Δεκεμβρίου 2003, για το σταθμό του Γοματίου. Με βάση τα συνθετικά μοναδιαία υδρογραφήματα διάρκειας $D=0.25$ ώρες της Sierra Nevada και της SCS και την απορροϊκή βροχή υπολογίζονται τα αντίστοιχα υδρογραφήματα πλημμύρας της λεκάνης του χειμάρρου Πετρένια και φαίνονται στο Σχήμα 4.



Σχήμα 4. Υδρογραφήματα πλημμύρας της απορροϊκής βροχόπτωσης της 23-25 Δεκεμβρίου 2003 της λεκάνης του Πετρένια

Στον Πίνακα 2 δίνονται το μέγεθος της αιχμής και ο χρόνος εμφάνισής της για τα υδρογραφήματα πλημμύρας που υπολογίζονται με τα δύο συνθετικά μοναδιαία υδρογραφήματα.

Πίνακας 2. Πλημμυρική αιχμή και χρόνος εμφάνισής της για τα υδρογραφήματα πλημμύρας της απορροϊκής βροχόπτωσης της 23-25 Δεκεμβρίου 2003 στη λεκάνη του Πετρένια

	Συνθετικό Μοναδιαίο Υδρογράφημα	
	Sierra Nevada	SCS
Πλημμυρική αιχμή (m^3/sec)	143.3	133.7
Χρόνος εμφάνισης αιχμής (ώρες)	42.5	43.0

Από τον Πίνακα 2 προκύπτει ότι το Σ.Μ.Υ. της SCS δίνει μικρότερη αιχμή, η οποία διαφέρει κατά 6.7% από αυτή του Σ.Μ.Υ. της Sierra Nevada. Ο χρόνος εμφάνισης της αιχμής στο υδρογράφημα πλημμύρας που υπολογίζεται με το Σ.Μ.Υ. της SCS υστερεί κατά μισή ώρα του χρόνου εμφάνισης στην περίπτωση του Σ.Μ.Υ. της Sierra Nevada.

Το μέγεθος της πλημμυρικής αιχμής εκτιμήθηκε επίσης και με τη μέθοδο της κλίσης επιφάνειας [2], η οποία βασίζεται στον προσδιορισμό της κλίσης της γραμμής ενέργειας σε ένα μήκος του ρεύματος, στον υπολογισμό της μέσης επιφάνειας διατομής και τη χρησιμοποίηση της εξίσωσης Manning για τον υπολογισμό της παροχής. Σύμφωνα με τα ίχνη της πλημμύρας, τα οποία καταγράφηκαν την επόμενη ημέρα από την εκδήλωσή της (26/12/2003) τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά δύο γειτονικών διατομών, τα οποία απέχουν απόσταση 200 m δίνονται στον Πίνακα 3, ενώ ο συντελεστής τραχύτητας n

πάρθηκε ίσος με 0.05 [11]. Στη συνέχεια με τη μέθοδο της κλίσης επιφάνειας υπολογίστηκε η πλημμυρική αιχμή, η οποία ήταν περίπου $153 \text{ m}^3/\text{sec}$.

Από τον Πίνακα 2 προκύπτει ότι η πλημμυρική αιχμή που υπολογίστηκε με τη βοήθεια του Σ.Μ.Υ. της Sierra Nevada προσεγγίζει πολύ καλά την πλημμυρική αιχμή που εκτιμήθηκε με τη μέθοδο της κλίσης επιφάνειας από τα ίχνη της πλημμύρας και η διαφορά τους ανέρχεται στο 6.3%, ενώ η αντίστοιχη διαφορά στην περίπτωση του Σ.Μ.Υ. της SCS ανέρχεται στο 12.6%. Επομένως, το Σ.Μ.Υ. της Sierra Nevada μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ικανοποιητική αξιοπιστία για την εκτίμηση πλημμυρικών απορροών στη λεκάνη του χειμάρρου Πετρένια, ενώ θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και σε άλλες υδρολογικές λεκάνες με διαφορετικές γεωμορφολογικές, υδρολογικές και εδαφολογικές συνθήκες με την προϋπόθεση της επιβεβαίωσης των αποτελεσμάτων με μετρημένες παροχές.

Πίνακας 3. Υδραυλικά χαρακτηριστικά γειτονικών διατομών για την πλημμύρα της 23-25 Δεκεμβρίου 2003 στη λεκάνη του Πετρένια

Μέγεθος	Ανάτη διατομή	Κατάτη διατομή
Συντελεστής τραχύτητας n	0.05	0.05
Εμβαδόν διατομής A (m^2)	72.5	71
Υδραυλική ακτίνα R (m)	1.8	1.4
Στάθμη νερού (m)	2.9	1.5

Με βάση τα παραπάνω προκύπτει ότι με τη χρησιμοποίηση του Σ.Μ.Υ. της Sierra Nevada και της απορροϊκής βροχόπτωσης του βροχογραφήματος της βροχόπτωσης της 23-25 Δεκεμβρίου 2003 υπολογίζεται ικανοποιητικά η πλημμυρική αιχμή σε σύγκριση με αυτήν που υπολογίζεται από τα ίχνη της πλημμύρας. Επομένως, μπορεί η παραπάνω μεθοδολογία να χρησιμοποιηθεί για τη διαστασιολόγηση των διαφόρων κατασκευών ασφαλείας του προτεινόμενου φράγματος (υπερχειλιστής και σήραγγα εκτροπής), όσο και για την επαναδιαστασιολόγηση υπαρχόντων έργων ή την κατασκευή νέων με σκοπό την αποτελεσματική αντιμετώπιση των πλημμυρικών φαινομένων της περιοχής μελέτης.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή έγινε εκτίμηση και συγκριτική αξιολόγηση των υδρογραφημάτων πλημμύρας, μιας ραγδαίας βροχόπτωσης, στο χειμάρρο Πετρένια Χαλκιδικής με τη χρησιμοποίηση των συνθετικών μοναδιαίων υδρογραφημάτων της S.C.S. και της Sierra Nevada. Η συγκριτική αξιολόγηση έγινε με τη βοήθεια της εκτιμημένης από τα ίχνη της πλημμύρας, πλημμυρική αιχμή με τη μέθοδο κλίσης επιφάνειας. Η ραγδαία βροχόπτωση που χρησιμοποιήθηκε είναι η βροχόπτωση της 23-25 Δεκεμβρίου 2003 που καταγράφηκε από τον εντός της λεκάνης του Πετρένια αυτόματο μετεωρολογικό σταθμό του Γοματίου και προκάλεσε πλημμυρικά φαινόμενα στην περιοχή. Στην εκτίμηση των υδρογραφημάτων πλημμύρας χρησιμοποιήθηκε η απορροϊκή βροχή που εκτιμήθηκε με τη βοήθεια του απορροϊκού συντελεστή (Curve Number). Από την ανάλυση προκύπτει ότι το Σ.Μ.Υ. της Sierra Nevada προσεγγίζει με ικανοποιητική αξιοπιστία την πλημμυρική αιχμή, η οποία υπολογίστηκε υδραυλικά βάσει των μετρηθέντων στοιχείων πλημμυρικής στάθμης και υδραυλικής κλίσης και υπερτερεί έναντι του Σ.Μ.Υ. της SCS. Το γεγονός αυτό αποδεικνύει ότι το Σ.Μ.Υ. της Sierra Nevada μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διαστασιολόγηση των διαφόρων κατασκευών ασφαλείας του προτεινόμενου φράγματος (υπερχειλιστής και σήραγγα εκτροπής), όσο

και για την επαναδιαστασιολόγηση υπαρχόντων έργων ή την κατασκευή νέων με σκοπό την αποτελεσματική αντιμετώπιση των πλημμυρικών φαινομένων της περιοχής μελέτης. Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε άλλες υδρολογικές λεκάνες με διαφορετικές γεωμορφολογικές, υδρολογικές και εδαφολογικές συνθήκες με την προϋπόθεση της επιβεβαίωσης των αποτελεσμάτων με μετρημένες παροχές.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

7. Maidment D.R.. 1993. Handbook of hydrology. McGraw-Hill Company, USA.
8. Παπαμιχαήλ Δ.Μ.. 2001. Τεχνική υδρολογία επιφανειακών υδάτων. Εκδόσεις Γιαχούδη-Γιαπούλη. 394 σελ.
9. Παπαμιχαήλ Δ.Μ. και Γεωργίου Π.Ε.. 1997. Διερεύνηση των σχέσεων βροχής - απορροής της υδρολογικής λεκάνης της Αλωπίας με την εφαρμογή ενός υδρολογικού μοντέλου. Πρακτικά 7^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου ΕΥΕ. Πάτρα. 68-76.
10. Καραμούζης Δ.Ν., Παρισόπουλος Γ., Παπαμιχαήλ Δ.Μ. και Γεωργίου Π.Ε.. 1999. Χωροθέτηση και προκαταρκτική διερεύνηση φράγματος Πετρένια Γοματίου Χαλκιδικής. Πακέτο εργασίας στο Ερευνητικό πρόγραμμα Διαχείριση Υδατικών Πόρων Υδρολογικής Λεκάνης Οlynθίου Χαλκιδικής, Θεσσαλονίκη.
11. Γεωργίου Π.Ε., Παπαμιχαήλ Δ.Μ. και Καραμούζης Δ.Ν. 2003. Συγκριτική ανάλυση των εκτιμήσεων των αιχμών απορροής με συνθετικά μοναδιαία υδρογραφήματα και με εμπειρικούς τύπους. Πρακτικά 3^{ου} Εθνικού Συνεδρίου Γεωργικής Μηχανικής, Θεσσαλονίκη. 11-19.
12. Παπαμιχαήλ Δ.Μ., Γεωργίου Π.Ε. και Καραμούζης Δ.Ν.. 2000. Σύγκριση συνθετικών μοναδιαίων υδρογραφημάτων με τη βοήθεια εκτιμήσεων πλημμυρικών απορροών. Πρακτικά 2^{ου} Εθνικού Συνεδρίου Γεωργικής Μηχανικής. Βόλος. 26-33.
13. Παπαμιχαήλ Δ.Μ., Γεωργίου Π.Ε. και Καραμούζης Δ.Ν.. 2001. Εκτίμηση των πλημμυρογραφημάτων της ραγδαίας βροχόπτωσης της 7-8 Οκτωβρίου 2000 στην περιοχή της Μεγάλης Παναγιάς Χαλκιδικής. Υδροτεχνικά. Τόμος 11. 47-60.
14. Kavalieratou S.N., Georgiou P.E., Papamichail D.M. and Karamouzis D.N.. 2004. Alternative GIS methods for the derivation of watershed physiographic information and its impact on Synthetic Unit Hydrographs. EWRA Symposium on "Water Resources Management: Risks and Challenges for the 21st Century". Izmir. Turkey. 743-754.
15. U.S.D.I.. 1987. Design of small dams. A Water Resources Technical Publication. 23-57.
16. Sobhani G.. 1976. A review of selected watershed design method for possible adoption to Iranian conditions. Thesis presented to Utah State University at Logan, Utah in partial fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science.
17. Gary D.M.. 1970. Handbook on the principles of hydrology. National Research Council of Canada.

**ΣΥΝΘΕΤΙΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΠΙΣΥΜΒΑΣΗΣ
ΗΜΕΡΗΣΙΩΝ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΕΩΝ ΜΕ ΤΗ ΒΟΗΘΕΙΑ
ΑΛΥΣΙΔΩΝ MARKOV**

Π.Ε. Γεωργίου* και Δ.Μ. Παπαμιχαήλ

Εργαστήριο Γενικής και Γεωργικής Υδραυλικής και Βελτιώσεων
Γεωπονική Σχολή Α.Π.Θ., 54124 Θεσσαλονίκη, * e-mail: pantaz@agro.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή γίνεται συνθετική παραγωγή της επισύμβασης ημερήσιων βροχοπτώσεων η οποία βασίζεται στις αλυσίδες Markov. Χρησιμοποιείται μια πρώτη τάξης, δύο καταστάσεων αλυσίδα Markov και υπολογίζονται οι πιθανότητες μετάβασης για κάθε ημέρα του έτους. Στη συνέχεια, με τη βοήθεια τυχαίων αριθμών ομοιόμορφης κατανομής γίνεται παραγωγή συνθετικών σειρών υγρών ή ξηρών ημερών. Η εφαρμογή της διαδικασίας έγινε στο σταθμό του Αγίου Μάμα Χαλκιδικής και η καταλληλότητά της επιβεβαιώθηκε από τη σύγκριση των συνθετικών σειρών επισύμβασης με την ιστορική σειρά.

**SYNTHETIC GENERATION OF DAILY
PRECIPITATION OCCURRENCE WITH MARKOV
CHAIN**

P.E. Georgiou* and D.M. Papamichail

Laboratory of General and Agricultural Hydraulics and Land Reclamation
Faculty of Agriculture, Aristotle University, 54124 Thessaloniki, Greece
* e-mail: pantaz@agro.auth.gr

ABSTRACT

In this paper, a first-order Markov chain for the synthetic generation of daily precipitation occurrence was used. Two transition probabilities for every day of the year from historical data were calculated. These probabilities, in combination with a random number generator were then used to generate series of wet and dry days. The process was applied on the Agios Mamas Halkidiki's daily precipitation data. The synthetic series of daily precipitation occurrence were compared with the historic series and the results demonstrate the ability of the above process for the synthetic generation.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Για το σωστό σχεδιασμό και τη μελέτη της λειτουργίας των έργων αξιοποίησης των υδατικών πόρων μιας λεκάνης απορροής, η ιστορική σειρά των δεδομένων συνήθως δεν επαρκεί. Κατά συνέπεια, θα πρέπει να προσομοιωθεί η ιστορική σειρά και να παραχθούν στοχαστικά, με τη βοήθεια τυχαίων αριθμών, συνθετικές σειρές, οι οποίες θα διατηρούν τα στατιστικά χαρακτηριστικά της ιστορικής σειράς και θα καλύπτουν χρονικά την οικονομική ζωή του έργου. Η διαδικασία αυτή χρησιμοποιείται για τη βροχόπτωση, η οποία είναι το γενεσιουργό αίτιο της απορροής. Η προσομοίωση και η δημιουργία συνθετικών σειρών ημερήσιων βροχοπτώσεων γίνεται σε δύο βήματα. Κατά το πρώτο βήμα γίνεται η προσομοίωση της επισύμβασης της βροχής δηλαδή αν η ημέρα είναι υγρή ή ξηρή και κατά το δεύτερο βήμα, στην περίπτωση που η ημέρα είναι υγρή, γίνεται η προσομοίωση του ύψους της βροχής.

Υγρή χαρακτηρίζεται μια ημέρα στην οποία η βροχόπτωση υπερβαίνει ένα ορισμένο ύψος, ένα κατώτατο όριο, συνήθως 1 mm. Ως *ξηρή* καθορίζεται η ημέρα στην οποία η βροχόπτωση είναι μικρότερη από αυτό το κατώτερο όριο ή όταν δεν υπάρχει καθόλου βροχόπτωση.

Όσον αφορά στα μοντέλα, τα οποία έχουν αναπτυχθεί για τη συνθετική παραγωγή της επισύμβασης της βροχόπτωσης, χωρίζονται σε δύο κατηγορίες [1,2]: α) Στα *μοντέλα διακριτής επισύμβασης της βροχόπτωσης* (discrete precipitation occurrence models) [3,4,5,6,7,8,9]. β) Στα *μοντέλα συνεχούς επισύμβασης της βροχόπτωσης* (continuous precipitation occurrence models) [10,11].

Η *διακριτή επισύμβαση* της βροχόπτωσης είναι μια απλοποίηση της παρατηρηθείσας διαδικασίας βροχόπτωσης, έτσι ώστε οι βροχοπτώσεις να υπολογίζονται κατά τη διάρκεια καθορισμένων χρονικών βημάτων, συνήθως της ημέρας, η οποία είναι και το πιο κοινά χρησιμοποιούμενο βήμα, σε μοντέλα, που χρησιμοποιούν συνθετικά δεδομένα. Σύμφωνα με τον Buishand, τα μοντέλα διακριτής επισύμβασης είναι δύο κατηγοριών [12]: α) Μοντέλα βασισμένα στη *διαδικασία των εναλλασσομένων επαναλήψεων* (alternating renewal process) και β) Μοντέλα βασισμένα στις *αλυσίδες Markov* (Markov chains).

Τα μοντέλα που βασίζονται στη διαδικασία των εναλλασσομένων επαναλήψεων, προσομοιώνουν τα μήκη των υγρών και ξηρών περιόδων με την υπόθεση ότι αυτά είναι ανεξάρτητα. *Ξηρή περίοδος*, ορίζεται μια σειρά από ξηρές ημέρες, η οποία περιορίζεται στην αρχή και στο τέλος από υγρή ημέρα. Ομοίως ορίζεται και η *υγρή περίοδος*. Στη διαδικασία των εναλλασσομένων επαναλήψεων για τις υγρές και ξηρές περιόδους γίνεται η υπόθεση ότι ακολουθούν την ίδια κατανομή. Στα μήκη των υγρών και ξηρών περιόδων, έχουν κατά καιρούς προσαρμοσθεί διάφορες κατανομές, μεταξύ των οποίων είναι η αποκομμένη αρνητική διωνυμική κατανομή (truncated negative binomial distribution) και η μετατοπισμένη αρνητική διωνυμική κατανομή (shifted negative binomial distribution) [12,13,14].

Τα μοντέλα που βασίζονται στις αλυσίδες Markov, θεωρούν ότι μια ημέρα ανήκει σε ένα συγκεκριμένο αριθμό καταστάσεων, οι οποίες καταστάσεις καθορίζονται από την ξηρή ημέρα ή περισσότερες από μία καταστάσεις της υγρής ημέρας, ανάλογα με το ύψος της βροχόπτωσης. Η πιθανότητα ότι μια ημέρα ανήκει σε μια συγκεκριμένη κατάσταση, εξαρτάται από την κατάσταση της προηγούμενης ημέρας. Από έρευνες που έγιναν βρέθηκε ότι η επισύμβαση της βροχόπτωσης προσομοιώνεται πολύ καλά με μια πρώτης τάξης, δύο καταστάσεων αλυσίδα Markov [13].

Τα μοντέλα *συνεχούς επισύμβασης* της βροχόπτωσης είναι πιο πολύπλοκα από τα μοντέλα *διακριτής επισύμβασης*. Συγκεκριμένα, ενώ στα μοντέλα *διακριτής*

επισύμβασης, μια βροχόπτωση θεωρείται ότι έπεσε σε ολόκληρο χρονικό διάστημα (π.χ. ημέρα), στα μοντέλα συνεχούς επισύμβασης, η βροχόπτωση θεωρείται ότι έπεσε κατά την πραγματική της διάρκεια. Επομένως, τα μοντέλα αυτά είναι πιο κοντά στη φυσική πραγματικότητα των βροχοπτώσεων, από ότι τα διακριτά μοντέλα. Ένα από τα περισσότερο γνωστά μοντέλα είναι το μοντέλο των ορθογώνιων θορύβων των Neyman-Scott (Neyman-Scott Rectangular Pulses Model) [10,11], το οποίο για την εφαρμογή του προϋποθέτει την ύπαρξη δεδομένων βροχογράφου.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται τα μοντέλα διακριτής επισύμβασης λόγω έλλειψης δεδομένων βροχογράφου και γίνεται συνθετική παραγωγή της επισύμβασης ημερήσιων βροχοπτώσεων η οποία βασίζεται στις αλυσίδες Markov. Χρησιμοποιείται μια πρώτη τάξης, δύο καταστάσεων αλυσίδα Markov και υπολογίζονται οι πιθανότητες μετάβασης για κάθε ημέρα του έτους. Στη συνέχεια με τη βοήθεια τυχαίων αριθμών ομοιόμορφης κατανομής γίνεται παραγωγή συνθετικών σειρών υγρών ή ξηρών ημερών. Η εφαρμογή της διαδικασίας έγινε στο σταθμό του Αγίου Μάμα Χαλκιδικής και η καταλληλότητά της επιβεβαιώθηκε από τη σύγκριση των συνθετικών σειρών επισύμβασης με την ιστορική σειρά.

2. ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Οι Markovιανές αλυσίδες ή αλυσίδες Markov που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία αυτή είναι μια πολύ σημαντική κατηγορία στοχαστικών διαδικασιών [2,15]. Οι εφαρμογές των Markovιανών αλυσίδων είναι σημαντικές και πολύ εκτεταμένες. Μπορεί κανείς εύκολα να βρει εφαρμογές των Markovιανών αλυσίδων σε εντελώς διαφορετικές επιστήμες, όπως στη δημιουργία συνθετικών ακολουθιών βροχής διαφόρων χρονικών βημάτων, στην καρκινογένεση, στις τάσεις της αγοράς, στην επιχειρησιακή έρευνα, στις αποφάσεις των ασφαλιστικών εταιριών, στα πληθυσμιακά προβλήματα, στη δημογραφία, στην αστρονομία κ.λπ. Χαρακτηριστικό όλων των παραπάνω περιπτώσεων είναι ότι έχουν την *ιδιότητα του Markov* ή τη *Markovιανή ιδιότητα*, η οποία με απλά λόγια λέει ότι η μελλοντική εξέλιξη του φαινομένου εξαρτάται από την παρούσα του κατάσταση και δεν εξαρτάται από το παρελθόν του.

Οι κλάσεις των στοχαστικών διαδικασιών με βάση τη διακριτοποίηση του χρόνου και του χώρου των καταστάσεων είναι τέσσερις: (α) Διακριτός χρόνος, χώρος καταστάσεων διακριτός, (β) Συνεχής χρόνος, χώρος καταστάσεων διακριτός, (γ) Διακριτός χρόνος, χώρος καταστάσεων συνεχής και (δ) Συνεχής χρόνος, χώρος καταστάσεων συνεχής. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται η κατηγορία των Markovιανών διαδικασιών σε χρόνο και χώρο καταστάσεων διακριτό, που καλούνται *Markovιανές αλυσίδες ή αλυσίδες Markov*. Ειδικά, όταν ο χώρος των καταστάσεων είναι ένα πεπερασμένο σύνολο, τότε έχουμε τις λεγόμενες πεπερασμένες Markovιανές αλυσίδες.

Μια απολύτως ακριβής εκτίμηση για τη βροχή της επόμενης ημέρας είναι η ακόλουθη: «*Αύριο είτε θα βρέξει είτε δε θα βρέξει*». Το προηγούμενο περικλείει τη βάση της θεωρίας των αλυσίδων Markov. Αυτή είναι η διάκριση δύο βασικών καταστάσεων που παρουσιάζει ένα φαινόμενο, οι οποίες δεν μπορούν να συμβούν ταυτόχρονα δηλαδή είτε *υγρή*, είτε *ξηρή* ημέρα. Δεν εξετάζεται το ύψος βροχής και ακόμη δεν ενδιαφέρει η εξέλιξη του στο χρόνο. Η εμφάνιση της μιας ή της άλλης κατάστασης καθώς και η μετάβαση από τη μια κατάσταση στην άλλη, προσδιορίζουν το βασικό *στοχαστικό* χαρακτήρα της βροχής.

Με βάση τα προαναφερθέντα, μια σειρά ημερήσιων υψών βροχής μετασχηματίζεται σε σειρά 0 και 1, με βάση το κριτήριο του, αν για καθεμία συγκεκριμένη ημέρα το ύψος βροχής ήταν μεγαλύτερο από ένα προκαθορισμένο κατώφλι (π.χ. 0.1 mm).

Η *τάξη* μιας αλυσίδας Markov περιγράφει τον αριθμό των προηγούμενων γεγονότων, που εξετάζονται. Επομένως, μια αλυσίδα Markov πρώτης τάξης είναι η διαδοχή δύο ημερών, που μπορεί να παρουσιάσει μια από τις ακόλουθες καταστάσεις:

00 01 10 11

όπου: 00 σημαίνει ότι μια ξηρή ημέρα ακολουθείται από μια ξηρή κ.ο.κ.

Επομένως, για ένα σύστημα X μπορούν τα συμβάντα του συστήματος να αποτυπωθούν από ένα αριθμό καταστάσεων C_n . Κατασκευάζεται, έτσι, ένας πίνακας πιθανοτήτων μετάβασης $[P(t)]$ μεγέθους $C_n * C_n$, ο οποίος περιγράφει τις πιθανότητες (p_{ij}) να συμβεί η κατάσταση C_j στο χρόνο t , όταν δίνεται η κατάσταση C_i στο χρόνο $t-1$, δηλαδή:

$$p_{ij}(t) = \text{prob}\{X(t) = C_j / X(t-1) = C_i\} \quad (1)$$

όπου: p_{ij} η πιθανότητα μετάβασης από την κατάσταση i στην κατάσταση j . Ο πίνακας πιθανοτήτων μετάβασης $P(t)$ είναι:

$$P(t) = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{1..} & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{2..} & p_{2n} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{3..} & p_{3n} \\ p_{..1} & p_{..2} & p_{..3} & p_{...} & p_{..n} \\ p_{n1} & p_{n2} & p_{n3} & p_{n..} & p_{nn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Σύμφωνα με τα προαναφερθέντα, για μια πρώτης τάξης αλυσίδα Markov, ο πίνακας των πιθανοτήτων μετάβασης στην περίπτωση της *επισύμβασης* ή όχι της βροχής, όπου υπάρχουν δύο καταστάσεις (υγρή και ξηρή) είναι ο εξής:

$$P(t) = \begin{bmatrix} p_{dd} & p_{dw} \\ p_{wd} & p_{ww} \end{bmatrix} \quad (3)$$

όπου:

p_{dd} = πιθανότητα υπό συνθήκη (conditional probability) ότι μια ξηρή ημέρα (dry day) ακολουθείται από μια ξηρή ημέρα ή αλλιώς η πιθανότητα μια ημέρα να είναι ξηρή όταν η προηγούμενη είναι ξηρή,

p_{dw} = πιθανότητα υπό συνθήκη ότι μια υγρή ημέρα (wet day) ακολουθείται από μια ξηρή ημέρα ή αλλιώς η πιθανότητα μια ημέρα να είναι ξηρή όταν η προηγούμενη είναι υγρή,

p_{wd} = πιθανότητα υπό συνθήκη ότι μια ξηρή ημέρα ακολουθείται από μια υγρή ημέρα ή αλλιώς η πιθανότητα μια ημέρα να είναι υγρή όταν η προηγούμενη είναι ξηρή και τέλος

p_{ww} = πιθανότητα υπό συνθήκη ότι μια υγρή ημέρα ακολουθείται από μια υγρή ημέρα ή αλλιώς η πιθανότητα μια ημέρα να είναι υγρή όταν η προηγούμενη είναι υγρή.

Για ομογενείς αλυσίδες Markov ισχύει ότι το άθροισμα των πιθανοτήτων κάθε στήλης του πίνακα μετάβασης είναι ίσο με 1. Επομένως, ισχύει:

$$p_{wd} = 1 - p_{dd} \quad (4)$$

και

$$p_{ww} = 1 - p_{dw} \quad (5)$$

Άρα μόνο δύο πιθανότητες μετάβασης απαιτούνται να υπολογιστούν από τα ιστορικά δεδομένα, οι οποίες υπολογίζονται [6]:

$$p_{wd}(i) = \frac{\sum_{p=1}^{p=n} \{X(i+1) = w / X(i) = d\}}{\sum_{p=1}^{p=n} \{X(i) = d\}} \quad (6)$$

και

$$p_{ww}(i) = \frac{\sum_{p=1}^{p=n} \{X(i+1) = w / X(i) = w\}}{\sum_{p=1}^{p=n} \{X(i) = w\}} \quad (7)$$

όπου:

$p_{wd}(i)$ = πιθανότητα ότι εάν η i ημέρα είναι ξηρή, τότε η ημέρα $i+1$ θα είναι υγρή και

$$\sum_{p=1}^{p=n} \{X(i+1) = D / X(i) = W\} = \text{άθροισμα των συμβάντων όπου μια ξηρή ημέρα}$$

ακολουθεί μια υγρή ημέρα, κατά την ημέρα i , για τα έτη από 1 μέχρι n .

Η μη δεσμευμένη πιθανότητα (unconditional probability) ότι η i ημέρα είναι υγρή μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$p_w(i) = \frac{1 - p_{dd}}{1 + p_{dw} - p_{dd}} \quad (8)$$

Με τον τρόπο που περιγράφηκε, μπορούν να υπολογιστούν οι πιθανότητες μετάβασης της επισύμβασης της βροχής (υγρή ή ξηρή) για κάθε ημέρα του έτους. Για να γίνει αυτό θα πρέπει να υπάρχουν αρκετά χρόνια μετρήσεων, ειδικότερα σε ξηρές και ημίξηρες περιοχές, έτσι ώστε να μπορεί κάθε ημέρα του έτους να χαρακτηριστεί με μία από τις δύο μεταβάσεις (δηλ. ww και wd) [6]. Σε πολλές περιπτώσεις, όμως, συνήθως δεν υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία, αλλά και όταν υπάρχουν οι προκύπτουσες χρονοσειρές των πιθανοτήτων μετάβασης, συνήθως, είναι αιχμηρές [3,6]. Για το λόγο αυτό, οι πιθανότητες μετάβασης υπόκεινται σε εξομάλυνση (smoothing) είτε με τη διαδικασία των σειρών Fourier [3] είτε με τη διαδικασία των κινούμενων μέσων όρων [6].

Κατ' αυτό τον τρόπο μπορούν να προσδιοριστούν οι χρονοσειρές των πιθανοτήτων μετάβασης για τις διάφορες καταστάσεις. Σε συνδυασμό με την παραγωγή τυχαίων αριθμών, χρησιμοποιούνται οι σειρές αυτές για την παραγωγή συνθετικών σειρών υγρών και ξηρών ημερών.

Για την περίπτωση της παραγωγής συνθετικών σειρών υγρών και ξηρών ημερών χρησιμοποιούνται τυχαίοι αριθμοί, οι οποίοι παράγονται από την *ομοιόμορφη κατανομή* στο διάστημα $(0,1)$ [2,5,16]. Στην κατανομή αυτή κάθε αριθμός έχει την ίδια πιθανότητα να συμβεί με οποιοδήποτε άλλο αριθμό μέσα στο διάστημα.

Η διαδικασία παραγωγής συνθετικών σειρών υγρών και ξηρών ημερών είναι η εξής: Δίνεται η κατάσταση της προηγούμενης ημέρας (υγρή w ή ξηρή d), παράγεται ένας τυχαίος αριθμός ομοιόμορφης κατανομής, ο οποίος συγκρίνεται με την κατάλληλη πιθανότητα (p_{wd} , αν η προηγούμενη ημέρα είναι ξηρή και p_{ww} , αν η προηγούμενη ημέρα είναι υγρή). Αν ο τυχαίος αριθμός είναι μεγαλύτερος από την πιθανότητα, τότε η ημέρα καταγράφεται ως υγρή, αλλιώς ως ξηρή. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρι το τέλος του έτους, ενώ η τελευταία ημέρα του έτους γίνεται προηγούμενη ημέρα για την έναρξη του επόμενου έτους.

Η κατάσταση της πρώτης ημέρας της συνθετικής προσομοίωσης παίρνεται απλά από την ιστορική πιθανότητα της 1^{ης} Ιανουαρίου να είναι υγρή. Η πιθανότητα αυτή δίνεται από τη σχέση:

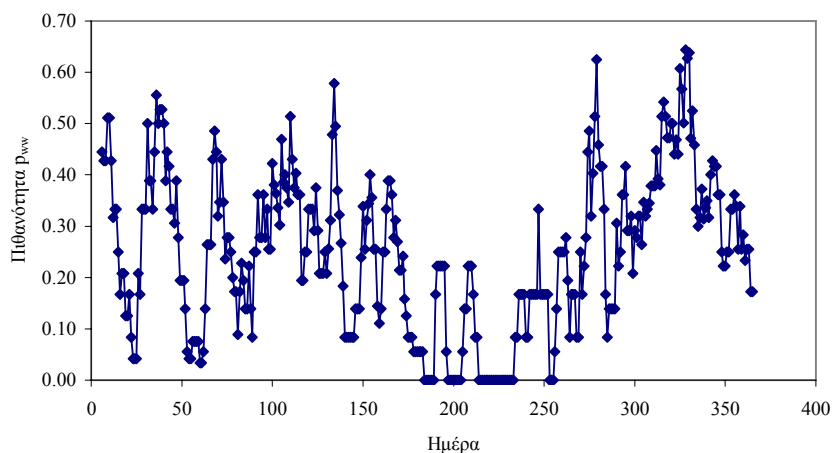
$$p_w(1) = \frac{\sum_{p=1}^{p=n} \{X(1) = w\}}{n} \quad (9)$$

Με τον τρόπο αυτό παράγονται συνθετικές σειρές υγρών ή ξηρών ημερών.

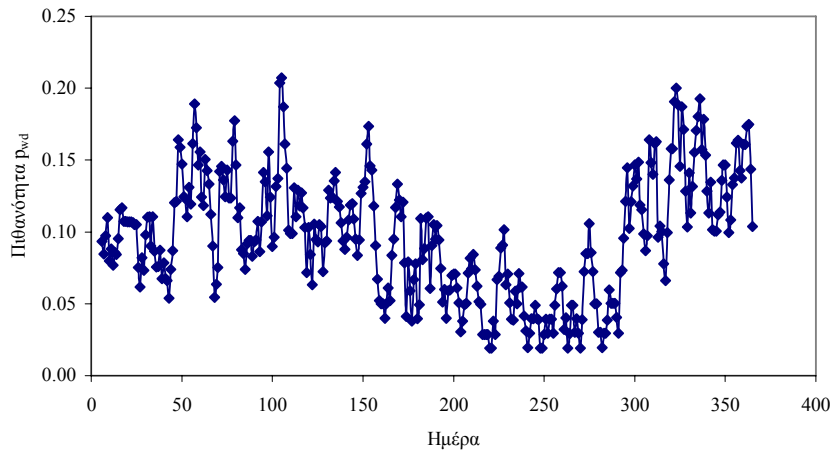
3. ΕΦΑΡΜΟΓΗ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η εφαρμογή αφορά την προσομοίωση και τη συνθετική παραγωγή της επισύμβασης των ημερήσιων βροχοπτώσεων για το σταθμό του Αγίου Μάμα Χαλκιδικής ($40^{\circ}15'$, $23^{\circ}20'$). Με τη βοήθεια των ημερήσιων δεδομένων βροχόπτωσης των ετών 1977 μέχρι 1997, του παραπάνω σταθμού, χαρακτηρίστηκε κάθε ημέρα, αν είναι υγρή ή ξηρή, χρησιμοποιώντας ως κατώφλι τα 0.1 mm. Στη συνέχεια, υπολογίστηκαν οι τιμές των πιθανοτήτων υπό τη συνθήκη ότι μια ξηρή ημέρα ακολουθείται από μια υγρή ημέρα (p_{wd}) και μια υγρή ημέρα ακολουθείται από μια υγρή (p_{ww}), για κάθε ημέρα σύμφωνα με τις σχέσεις (6) και (7), αντίστοιχα. Με βάση τις σχέσεις (4) και (5) υπολογίστηκαν και οι πιθανότητες υπό τη συνθήκη ότι μια ξηρή ημέρα ακολουθείται από μια ξηρή (p_{dd}) και μια υγρή ημέρα ακολουθείται από μια ξηρή (p_{dw}). Οι παραπάνω ημερήσιες πιθανότητες, όπως υπολογίστηκαν από τα ιστορικά δεδομένα της περιόδου 1977-1997, υπόκεινται σε εξομάλυνση με τη διαδικασία των κινούμενων μέσων (moving average) 5 ημερών για το λόγο ότι οι χρονοσειρές των πιθανοτήτων ήταν αιχμηρές. Σύμφωνα με τη διαδικασία αυτή, η πιθανότητα μιας ημέρας είναι ο μέσος όρος των πιθανοτήτων των πέντε (5) προηγούμενων ημερών. Οι εξομαλυνμένες ημερήσιες πιθανότητες p_{ww} και p_{wd} , που υπολογίστηκαν με τη διαδικασία των κινούμενων μέσων όρων 5 ημερών φαίνονται στα Σχήματα 1 και 2, αντίστοιχα.

Για την παραγωγή συνθετικών σειρών υγρών και ξηρών ημερών στο σταθμό του Αγίου Μάμα ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία: Δόθηκε η κατάσταση της προηγούμενης ημέρας (ξηρή ή υγρή) και παρήχθη ένας τυχαίος αριθμός ομοιόμορφης κατανομής στο διάστημα (0,1), ο οποίος συγκρίθηκε με την κατάλληλη πιθανότητα (p_{wd} , αν η προηγούμενη ημέρα είναι ξηρή και p_{ww} , αν η προηγούμενη ημέρα είναι υγρή). Αν ο τυχαίος αριθμός είναι μεγαλύτερος από την πιθανότητα, τότε η ημέρα καταγράφεται ως υγρή, αλλιώς ως ξηρή. Η διαδικασία συνεχίστηκε έως το τέλος του έτους και η τελευταία ημέρα του έτους έγινε προηγούμενη ημέρα για την έναρξη του επόμενου έτους. Με τον τρόπο αυτό παρήχθησαν 100 συνθετικές σειρές, 50 ετών η καθεμία (όση και η οικονομική ζωή του έργου) από τις οποίες προέκυψε μια μέση συνθετική σειρά.

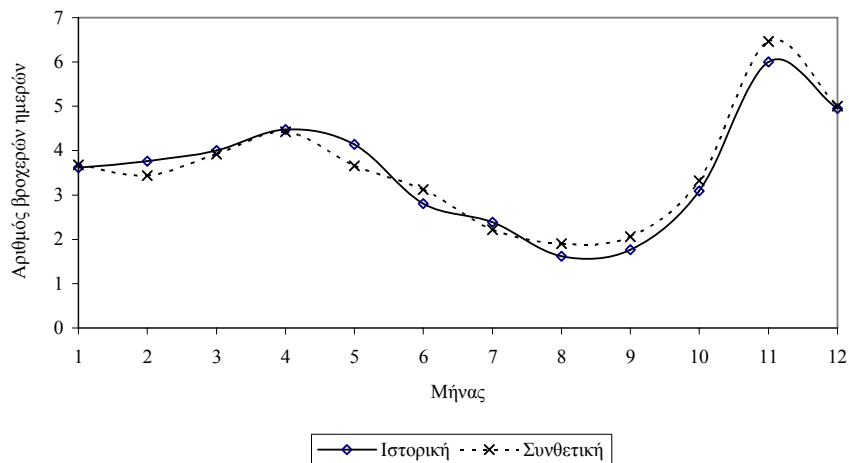


Σχήμα 1. Εξομαλυνμένες με τη διαδικασία των κινούμενων μέσων 5 ημερών ημερήσιες τιμές πιθανοτήτων p_{ww} της περιόδου 1977-1997 στο σταθμό του Αγίου Μάμα.



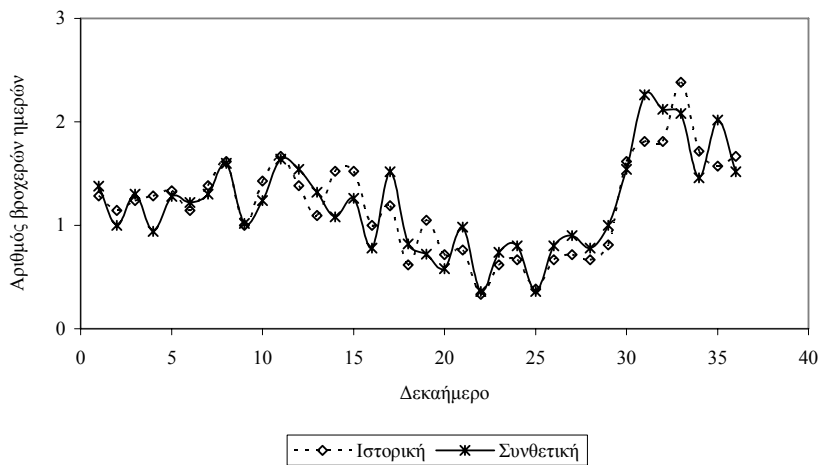
Σχήμα 2. Εξομαλυμένες με τη διαδικασία των κινούμενων μέσων 5 ημερών ημερήσιες τιμές πιθανοτήτων p_{wd} της περιόδου 1977-1997 στο σταθμό του Αγίου Μάμα.

Στο Σχήμα 3 φαίνεται ο μέσος μηνιαίος αριθμός των βροχερών ημερών της ιστορικής και της συνθετικής σειράς των βροχοπτώσεων του Αγίου Μάμα.

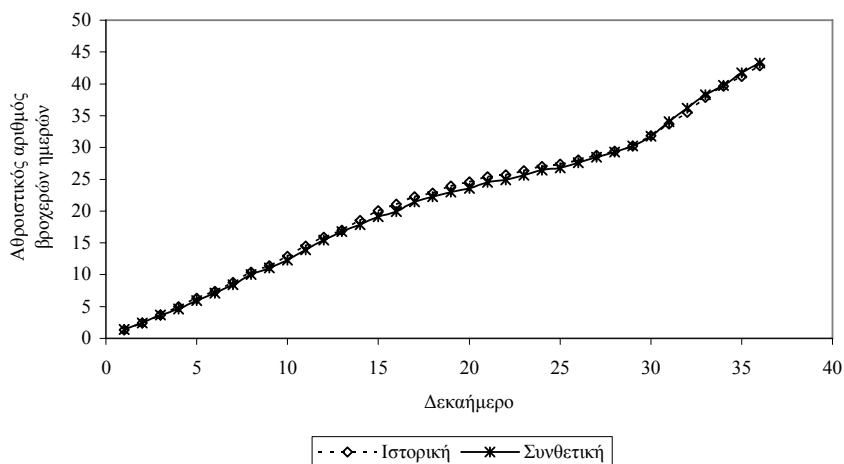


Σχήμα 3. Μέσος μηνιαίος αριθμός βροχερών ημερών ιστορικής και συνθετικής σειράς βροχόπτωσης στο σταθμό του Αγίου Μάμα.

Στα Σχήματα 4 και 5 φαίνονται ο μέσος αριθμός των βροχερών ημερών για κάθε δεκαήμερο και ο αθροιστικός αριθμός των βροχερών ημερών κάθε δεκαημέρου, για την ιστορική και τη συνθετική σειρά των βροχοπτώσεων του σταθμού του Αγίου Μάμα, αντίστοιχα.



Σχήμα 4. Μέσος αριθμός βροχερών ημερών δεκαημέρων ιστορικής και συνθετικής σειράς βροχόπτωσης στο σταθμό του Αγίου Μάμα.



Σχήμα 5. Αθροιστικός αριθμός βροχερών ημερών δεκαημέρων ιστορικής και συνθετικής σειράς βροχόπτωσης στο σταθμό του Αγίου Μάμα.

Από τα Σχήματα 3, 4 και 5, προκύπτει ότι η στοχαστική προσομοίωση της επισύμβασης της βροχόπτωσης είναι πολύ καλή.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία έγινε συνθετική παραγωγή της επισύμβασης ημερήσιων βροχοπτώσεων στο σταθμό του Αγίου Μάμα Χαλκιδικής χρησιμοποιώντας μοντέλα διακριτής επισύμβασης τα οποία βασίζονται στις αλυσίδες Markov. Χρησιμοποιείται μια πρώτη τάξης, δύο καταστάσεων αλυσίδα Markov και υπολογίζονται οι πιθανότητες

μετάβασης για κάθε ημέρα του έτους. Οι χρονοσειρές των πιθανοτήτων υπόκεινται σε εξομάλυνση με τη διαδικασία κινούμενων μέσων όρων 5 ημερών. Στη συνέχεια με τη βοήθεια τυχαίων αριθμών ομοιόμορφης κατανομής έγινε παραγωγή συνθετικών σειρών υγρών ή ξηρών ημερών. Από τη σύγκριση μεταξύ συνθετικής και ιστορικής σειράς του μέσου αριθμού των βροχερών κάθε μήνα και κάθε δεκαήμερου και του αθροιστικού αριθμού βροχερών ημερών των δεκαημέρων προκύπτει ότι η παραπάνω διαδικασία είναι κατάλληλη για τη συνθετική παραγωγή χρονοσειρών επισύμβασης ημερήσιων βροχοπτώσεων οποιασδήποτε διάρκειας. Πρέπει να σημειωθεί ότι για να ολοκληρωθεί η συνθετική παραγωγή της βροχόπτωσης απαιτείται και το ύψος της για κάθε υγρή ημέρα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Young M.D.B. 2002. Development and application of PARCHED-THIRST: A user-friendly agrohydrological model for dry land cropping system. Ph.D. Thesis. Newcastle Upon Tyne. University of Newcastle Upon Tyne. 230 p.
2. Γεωργίου Π.Ε.. 2004. Βελτιστοποίηση λειτουργίας ταμιευτήρων για αρδευτικούς σκοπούς. Διδακτορική Διατριβή. Τμήμα Γεωπονίας Α.Π.Θ. 341 σελ.
3. Richardson C.W.. 1981. Stochastic simulation of daily precipitation, temperature, and solar radiation. Water Resources Research. 17(1). 182-190.
4. Geng S., De Vries F.W.T.P. and Supit I.. 1986. A simple method for generating daily rainfall data. Agricultural and Forest Meteorology. 36. 363-376.
5. Παπαμιχαήλ Δ.Μ.. 1991. Στοχαστική υδρολογία. Πανεπιστημιακές Παραδόσεις στο Μεταπτυχιακό Τμήμα Εγγείων Βελτιώσεων. Τμήμα Γεωπονίας Α.Π.Θ.. Θεσσαλονίκη. 175 σελ.
6. Young M.D.B. and Gowing J.W.. 1996. The PARCHED-THIRST model – User Guide (Version 1.0). University of Newcastle Upon Tyne. U.K.. 109 p.
7. Nelson R.. 2002. ClimGen – Climate data generator User’s Manual. Washington State University.
8. Ochola W.O. and Kerkides P.. 2003. A Markov chain simulation model for predicting critical wet and dry spells in Kenya: Analysing rainfall events in the Kano Plains. Irrigation and Drainage. 52. 327-342.
9. Mimikou M.. 1983. Daily precipitation occurrences modeling with Markov chain of seasonal order. Hydrological Sciences – Journal. 28. 2 (6). 221-232.
10. Cowpertwait P.S.P., O’Connell P.E., Metcalfe A.V. and Mawdsley J.A.. 1996. Stochastic point process modelling of rainfall. I. Single-site fitting and validation. Journal of Hydrology. 175. 17-46.
11. Wang Z.M.. 1997. Conceptual stochastic streamflow models for Monte Carlo simulation and forecasting. Ph.D. Thesis. V.U.B. – Hydrologie. 192 p.
12. Buishand T.A.. 1978. Some remarks on the use of daily rainfall models. Journal of Hydrology. 36. 295-308.
13. Srikanthan R. and McMahon T.A.. 1983. Stochastic simulation of daily rainfall for Australian stations. Transactions of the ASAE. 754-766.
14. Tsakiris G., Agrafiotis G. and Kountouzis E.. 1984. Modeling the occurrence of wet and dry periods. Proc. 5th Int. Conf. Water Resources Planning and Management. Athens. 5.121-5.135.
15. Παπούλης Α.. 1994. Πιθανότητες, τυχαίες μεταβλητές και στοχαστικές διαδικασίες. Εκδόσεις Α. Τζιόλα. Θεσσαλονίκη. 818 σελ.

16. Press W.H., Flannery B.P., Teukolsky S.A. and Vetterling W.T.. 1987. Numerical recipes. Cambridge University Press. Cambridge. 963 p.

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΟΡΙΟΥ ΕΚΡΟΗΣ ΤΟΥ ΓΛΥΚΟΥ ΝΕΡΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΘΑΛΑΣΣΙΝΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΕ ΠΑΡΑΚΤΙΟΥΣ ΥΔΡΟΦΟΡΕΙΣ

Χ. Δουλγέρης και Θ. Ζήσης

Τομέας Εγγείων Βελτιώσεων, Εδαφολογίας και Γεωργικής Μηχανικής,
Τμήμα Γεωπονίας του Α.Π.Θ., 54124, Θεσσαλονίκη

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται δύο μέθοδοι υπολογισμού του ορίου εκροής του γλυκού νερού σε προβλήματα διείσδυσης του θαλασσινού νερού σε παράκτιους υδροφορείς. Εφαρμογή γίνεται στο κλασσικό διδιάστατο πρόβλημα του Henry, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Εξετάζεται η επίδραση του μεγέθους των στοιχείων, καθώς και διαφορετικών υδρογεωλογικών συνθηκών, στον καθορισμό του μεγέθους του ορίου εκροής. Στο όριο αυτό, το οποίο δεν είναι γνωστό εκ των προτέρων, εφαρμόζεται οριακή συνθήκη δευτέρου τύπου. Με τις μεθόδους αυτές είναι δυνατόν να λαμβάνεται υπόψη η μεταβολή του κατά τη διάρκεια των υπολογισμών μιας προσομοίωσης.

CALCULATION OF FRESHWATER OUTFLOW BOUNDARY ON SEAWATER INTRUSION IN COASTAL AQUIFERS

Ch. Doulgeris and T. Zisis

Dept. of Hydraulics, Soil Science and Agricultural Engineering,
School of Agriculture, Aristotle University, Thessaloniki, 54124, Greece

ABSTRACT

In this paper two methods are presented for the calculation of freshwater outflow boundary in problems of seawater intrusion in coastal aquifers. The methods were tested against the Henry problem using the finite element method. The effect of the element size and the effect of different hydrogeological conditions were studied on the variation of the freshwater outflow boundary size. The freshwater outflow boundary, where a second type boundary condition is required, is not known a priori and it may vary with time. By using these methods the variation of its size can be obtained during a model simulation.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο Henry [3] παρουσίασε μία ημιαναλυτική λύση που προσομοίωσε την κατανομή των αλάτων σε συνθήκες ισορροπίας ενός κλειστού υδροφορέα, θεωρώντας τη ροή ρευστού μεταβλητής πυκνότητας. Στη συνέχεια "το πρόβλημα του Henry" έχει ευρέως χρησιμοποιηθεί ως σημείο αναφοράς για τον έλεγχο αριθμητικών λύσεων προσομοίωσης της διείσδυσης του θαλασσινού νερού. Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων έχουν παρουσιασθεί λύσεις, μεταξύ άλλων, [6,2,4,7,5,10].

Στη λύση του Henry [3] η οριακή συνθήκη προς τη πλευρά της θάλασσας λαμβάνεται ως όριο γνωστής συγκέντρωσης. Στις αριθμητικές λύσεις των πεπερασμένων στοιχείων που προαναφέρθηκαν μόνο το κάτω τμήμα του ορίου θεωρείται όριο γνωστής συγκέντρωσης ενώ το υπόλοιπο λαμβάνεται ως όριο εκροής του γλυκού νερού. Το μέγεθος αυτού του ορίου εκροής λαμβάνεται διαφορετικό μεταξύ των διαφόρων αριθμητικών λύσεων.

Ο υπολογισμός του ορίου εκροής μπορεί να γίνει με βάση την κατεύθυνση των ταχυτήτων προς την πλευρά της θάλασσας. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται δύο μέθοδοι υπολογισμού του ορίου εκροής. Στον πρώτο τρόπο εξετάζονται οι ταχύτητες στο μέσο της πλευράς των στοιχείων, όπως προκύπτουν με παρεμβολή, από την εξίσωση Darcy και τις υπολογιζόμενες τιμές του φορτίου και της συγκέντρωσης στους κόμβους των στοιχείων. Στο δεύτερο τρόπο ελέγχονται οι ταχύτητες στους κόμβους του δικτύου, όπως υπολογίζονται με εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων στην εξίσωση Darcy. Εξετάζεται επίσης η επίδραση του μεγέθους των στοιχείων στον υπολογισμό του ορίου εκροής. Τέλος, εξετάζεται η επίδραση της παροχής επαναπλήρωσης του γλυκού νερού καθώς και της υδραυλικής αγωγιμότητας στη διαμόρφωση του ορίου εκροής.

2. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ – ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΕΠΙΛΥΣΗ

Θεωρώντας τη ροή ρευστού μεταβλητής πυκνότητας, οι εξισώσεις που διέπουν το φαινόμενο της διείσδυσης του θαλασσινού νερού σε παράκτιους υδροφορείς, προκύπτουν από την εξίσωση συνέχειας του ρευστού, την εξίσωση συνέχειας μίας διαλυμένης συντηρητικής ουσίας, την εξίσωση του Darcy και μία σχέση που συνδέει την πυκνότητα του ρευστού με τη συγκέντρωση της διαλυμένης ουσίας.

Η μερική διαφορική εξίσωση που περιγράφει τη ροή ρευστού μεταβλητής πυκνότητας γράφεται [1]:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[K_{i,j} \cdot \left(\frac{\partial h}{\partial x_j} + \beta'_c \cdot c \cdot \frac{\partial z}{\partial x_j} \right) \right] = S_s \cdot \frac{\partial h}{\partial t} + n \cdot \beta'_c \cdot \frac{\partial c}{\partial t} \quad (2.1)$$

όπου h είναι το υδραυλικό φορτίο αναφοράς ως προς το γλυκό νερό, $K_{i,j}$ είναι η υδραυλική αγωγιμότητα, β'_c είναι ο συντελεστής της μεταβολής της πυκνότητας με τη συγκέντρωση, c είναι η σχετική, αδιάστατη, συγκέντρωση που μεταβάλλεται από 0 έως 1, S_s είναι η ειδική αποθηκευτικότητα, n το πορώδες του μέσου, x_i ($i=1,2$) είναι οι συνιστώσες του καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων (x,z) και t ο χρόνος.

Η μερική διαφορική εξίσωση που χρησιμοποιείται για την περιγραφή της μεταφοράς των αλάτων γράφεται [1]:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[D_{i,j} \cdot \frac{\partial c}{\partial x_j} \right] = n \cdot \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho} \cdot \beta'_c \cdot c \right) \cdot \left[V_i \cdot \frac{\partial c}{\partial x_i} + \frac{\partial c}{\partial t} \right] \quad (2.2)$$

όπου $D_{i,j} = n D_{hij}$, D_{hij} είναι ο συντελεστής υδροδυναμικής διασποράς και V_i το διάνυσμα της ταχύτητας του ρευστού.

Το διάνυσμα της ταχύτητας, για μεταβλητής πυκνότητας ροή, προκύπτει με βάση την εξίσωση Darcy και είναι

$$V_i = -\frac{1}{n} \cdot K_{i,j}^0 \cdot \left(\frac{\partial h}{\partial x_j} + \beta'_c \cdot c \cdot \frac{\partial z}{\partial x_j} \right) \quad (2.3)$$

όπου $K_{i,j}^0 = \rho_0 \cdot g \cdot k_{i,j} / \mu$ είναι η υδραυλική αγωγιμότητα του γλυκού νερού.

Η σχέση που συνδέει την πυκνότητα με τη συγκέντρωση για προβλήματα διείσδυσης θαλασσινού νερού λαμβάνεται ως μια γραμμική σχέση της μορφής:

$$\rho = \rho_0 \cdot (1 + \beta'_c \cdot c) \quad (2.4)$$

Οι οριακές συνθήκες που χρησιμοποιούνται για τη μοναδικότητα της λύσης είναι είτε πρώτου τύπου (Dirichlet) είτε δευτέρου τύπου (Neuman).

Η αριθμητική επίλυση των εξισώσεων γίνεται με την εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων διακριτοποιώντας την περιοχή ροής με γραμμικά τετραπλευρικά στοιχεία. Χρησιμοποιείται η μέθοδος Galerkin για την επίλυση στο χώρο και ένα σχήμα πεπερασμένων διαφορών για την προσέγγιση στο χρόνο. Έτσι, από τη (2.1) και (2.2) προκύπτουν τα συστήματα των αλγεβρικών εξισώσεων που είναι, αντίστοιχα [10]:

$$A_{I,J} \cdot h_J^{k+1} = B_I \quad (2.5)$$

$$A'_{I,J} \cdot c_J^{k+1} = B'_I \quad (2.6)$$

όπου I, J είναι οι δείκτες των κόμβων ($I, J = 1, 2, \dots, N$), h_j, c_j οι τιμές του φορτίου και της συγκέντρωσης στους κόμβους, αντίστοιχα, N ο αριθμός των κόμβων του δικτύου των πεπερασμένων στοιχείων, Δt είναι το χρονικό βήμα, $k+1$ και k δηλώνουν τις τιμές των μεταβλητών σε διαδοχικές χρονικές στιγμές.

Τα μητρώα των (2.5) και (2.6) δίνονται από τις σχέσεις [10]:

$$A_{I,J} = \sum_e A_{I,J}^e = \sum_e \int_{U^e} (K_{i,j} \cdot \frac{\partial N_I}{\partial x_i} \cdot \frac{\partial N_J}{\partial x_j} + \frac{S_S}{\Delta t} \cdot N_I \cdot N_J) dU \quad (2.7\alpha)$$

$$B_I = \sum_e B_I^e = \sum_e \left[\int_{R^e} N_i \cdot q_n dR - \int_{U^e} (\beta'_c \cdot K_{i,j} \cdot N_J \cdot c_J^{k+1} \cdot \frac{\partial N_I}{\partial x_i} \cdot \eta_j + \frac{n \cdot \beta'_c}{\Delta t} \cdot N_I \cdot N_J \cdot (c_J^{k+1} - c_J^k) - \frac{S_S}{\Delta t} \cdot N_I \cdot N_J \cdot h_J^k) dU \right] \quad (2.7\beta)$$

$$A'_{I,J} = \sum_e A'_{I,J}^e = \sum_e \int_{U^e} [D_{i,j} \cdot \frac{\partial N_I}{\partial x_i} \cdot \frac{\partial N_J}{\partial x_j} + Wc \cdot (V_I \cdot N_I \cdot \frac{\partial N_J}{\partial x_i} + \frac{1}{\Delta t} N_I \cdot N_J)] dU \quad (2.8\alpha)$$

$$B'_I = \sum_e B'^e_I = \sum_e \left[\int_{R^e} N_I \cdot (D_{i,j} \cdot \frac{\partial c}{\partial x_j}) n_i dR + \int_{U^e} \frac{1}{\Delta t} Wc \cdot N_I \cdot N_J \cdot c_j^k dU \right] \quad (2.8\beta)$$

όπου U^e είναι ο χώρος του στοιχείου e με όριο R^e , q_n είναι η εισερχόμενη παροχή ανά μονάδα επιφάνειας κάθετη στο όριο R^e , N_I είναι οι γραμμικές συναρτήσεις μορφής, $\eta_j=1$ για την κατακόρυφη διεύθυνση και $\eta_j=0$ για την οριζόντια, ενώ η άθροιση αναφέρεται στην συνένωση των στοιχείων.

Ο υπολογισμός των ταχυτήτων γίνεται στα σημεία ολοκλήρωσης από τη (2.3) [2,4,7].

Ένας άλλος τρόπος υπολογισμού των ταχυτήτων είναι αυτός που περιλαμβάνει επίλυση της εξίσωσης Darcy [εξ. (2.3)] με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων [8]. Έτσι από τη (2.3) παίρνουμε [9]:

$$A''_{I,J} \cdot V_J^{k+1} = B''_{I,J} \quad (2.9)$$

όπου τα μητρώα της (2.9) δίνονται από τις σχέσεις:

$$A''_{I,J} = \sum_e A''^e_{I,J} = \sum_e \int_{U^e} N_I \cdot N_J dU \quad (2.10\alpha)$$

$$B''_{I,J} = \sum_e B''^e_{I,J} = \sum_e \int_{U^e} -\frac{\rho_0}{\rho \cdot n} \cdot N_J \cdot (K_{i,j} \cdot (\frac{\partial N_I}{\partial x_j} \cdot h_j^{k+1} + \beta'_c \cdot N_J \cdot c_j^{k+1} \cdot \eta_j)) dU \quad (2.10\beta)$$

Για την επίλυση των εξισώσεων εφαρμόζεται μία επαναληπτική διαδικασία. Αρχικά επιλύεται το σύστημα των εξισώσεων (2.5) με δεδομένη τη συγκέντρωση. Γίνεται υπολογισμός των ταχυτήτων με τη βοήθεια της (2.3) ή (2.9), και στη συνέχεια επιλύεται το σύστημα των εξισώσεων (2.6). Μετά την επίτευξη σύγκλισης και τις νέες τιμές των συγκεντρώσεων επιλύεται εκ νέου η (2.5) κ.ο.κ..

Η εφαρμογή όλων των παραπάνω έγινε με τη βοήθεια του μαθηματικού μοντέλου που έχει παρουσιασθεί από τους [9,10].

3. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΟΡΙΟΥ ΕΚΡΟΗΣ

Κατά την εφαρμογή των οριακών συνθηκών απαιτείται να είναι γνωστό το μέγεθος του ορίου εκροής του γλυκού νερού. Το όριο εκροής μπορεί υπολογισθεί με βάση την κατεύθυνση των ταχυτήτων με δύο διαφορετικούς τρόπους.

Σύμφωνα με τον πρώτο τρόπο, ο υπολογισμός των ταχυτήτων γίνεται στο μέσο της πλευράς των στοιχείων, που βρίσκονται στο όριο της θάλασσας, από τη (2.3). Εάν η ταχύτητα έχει κατεύθυνση προς την θάλασσα τότε η πλευρά του στοιχείου θεωρείται όριο εκροής, όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 1α.

Σύμφωνα με το δεύτερο τρόπο ελέγχονται οι τιμές των ταχυτήτων στους κόμβους των στοιχείων που προκύπτουν από τη (2.7). Εάν η κατεύθυνση της ταχύτητας στον κόμβο είναι προς την πλευρά του υδροφορέα τότε στον κόμβο αυτό εφαρμόζεται οριακή συνθήκη γνωστής συγκέντρωσης, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1β.

Το όριο εκροής δεν είναι γνωστό εκ των προτέρων για συγκεκριμένες υδρογεωλογικές συνθήκες και διαστάσεις του υδροφορέα. Στην παρούσα λύση χρησιμοποιείται μία διαδικασία η οποία συνοψίζεται ως εξής: 1) Γίνεται επίλυση του προβλήματος με συγκεκριμένες οριακές συνθήκες για ένα χρονικό βήμα, 2) ελέγχεται η κατεύθυνση των ταχυτήτων στους κόμβους ή τις πλευρές των στοιχείων που βρίσκονται σε επαφή με τη

διαφορετικές προσεγγίσεις προς τη πλευρά της θάλασσας, οι υπόλοιπες οριακές συνθήκες και οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται για το πρόβλημα του Henry. Το μέγεθος του ορίου εκροής του γλυκού νερού προς τη πλευρά της θάλασσας εμφανίζεται διαφορετικό μεταξύ των διαφόρων ερευνητών. Στον Πίνακα 1 παρουσιάζεται το μέγεθος του ορίου εκροής που χρησιμοποιείται στις λύσεις αυτών, όπως εξάγεται από τα αποτελέσματα που παρουσιάζουν.

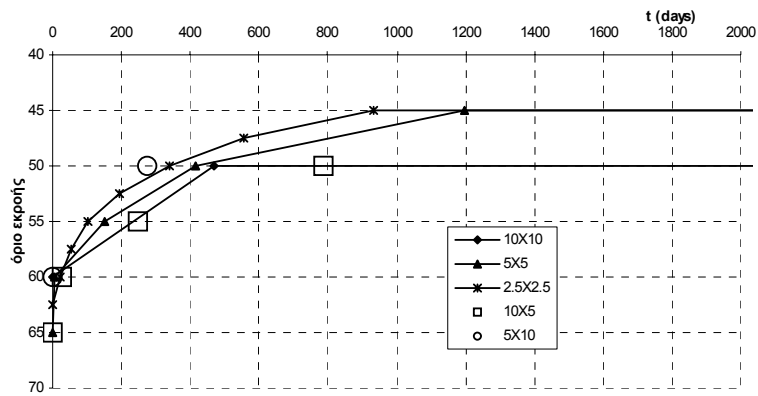
Πίνακας 1. Μέγεθος ορίου εκροής στις διάφορες λύσεις

Αριθμητική λύση	Όριο (%)
Segol et al. (1975)	40
Frind (1982)	30
Hyakorn et al. (1987)	30
Voss and Souza (1987)	40
Kolditz et al. (1998)	50
Ζήσης και Δουλγέρης (2003)	30

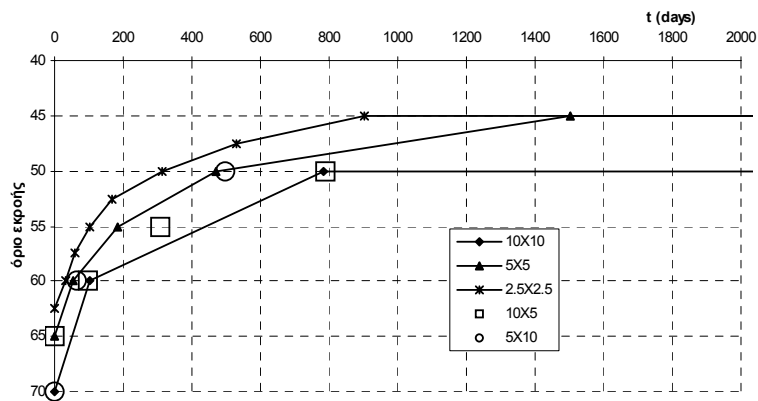
4.2. Υπολογισμός του ορίου εκροής

Αρχικά θεωρείται ότι η συγκέντρωση είναι μηδέν και το φορτίο αναφοράς 100 m σε όλη την περιοχή ροής. Η προώθηση του μετώπου υφαλμύρινσης ξεκινά θεωρώντας ότι το όριο εκροής του γλυκού νερού είναι μηδέν. Οι υδρογεωλογικές παράμετροι που χρησιμοποιούνται αναφέρονται στο Σχήμα 2. Για τη διακριτοποίηση της περιοχής χρησιμοποιήθηκαν πέντε διαφορετικά ομοιόμορφα δίκτυα, διαστάσεων 10x10, 5x5, 2.5x2.5, 10x5, και 5x10 m, ενώ το χρονικό βήμα ήταν σταθερό και ίσο με $\Delta t=5$ ημέρες. Στο Σχήμα 3α παρουσιάζεται η μεταβολή του ορίου εκροής σύμφωνα με τον πρώτο τρόπο όπου ελέγχεται το διάνυσμα της ταχύτητας στα μέσα των πλευρών των στοιχείων. Παρατηρούμε ότι για το δίκτυο των 10x10 m το όριο σταθεροποιείται σε χρόνο λίγο μετά τις 400 ημέρες στο 50% του μήκους του ορίου, και παραμένει στην τιμή αυτή καθ' όλη την διάρκεια της προσομοίωσης. Εάν χρησιμοποιηθεί όμως το δίκτυο των 5x5 m το όριο εκροής είναι 50% στις 400 ημέρες, αλλά σε χρόνο 1200 ημερών μειώνεται στο 45%. Η μεταβολή αυτή που παρατηρείται με το δίκτυο των 5x5 m οφείλεται στην πυκνότερη διακριτοποίηση ως προς τον κατακόρυφο άξονα. Επίσης, χρησιμοποιώντας το πιο πυκνό δίκτυο των 2.5x2.5 m το όριο σταθεροποιείται στο 45% αλλά σε μικρότερο χρόνο απ' ότι με το δίκτυο των 5x5 m. Η εφαρμογή των άλλων δύο δικτύων, των 10x5 m και 5x10 m επιβεβαιώνει την ισχύ της μεθόδου και για μη τετραγωνικά στοιχεία.

Παρόμοια συμπεράσματα εξάγονται και από το Σχήμα 3β, όπου ο υπολογισμός του ορίου γίνεται με βάση το διάνυσμα των ταχυτήτων στους κόμβους των στοιχείων. Έτσι, για τις υδρογεωλογικές συνθήκες του προβλήματος του Henry το όριο εκροής σταθεροποιείται στο 50% για δίκτυο στοιχείων 10x10 m και στο 45% για στοιχεία μεγέθους 5x5 και 2.5x2.5 m και για τις δύο μεθόδους υπολογισμού του ορίου εκροής. Στα Σχήματα 4α,β παρουσιάζονται τα διανύσματα των ταχυτήτων στους κόμβους των στοιχείων κοντά στο όριο εκροής για το δίκτυο των 5x5 m στους χρόνους 400 και 1000 ημέρες, αντίστοιχα, όπου παρατηρούνται οι διαφορετικές κατανομές των διανυσμάτων της ταχύτητας.

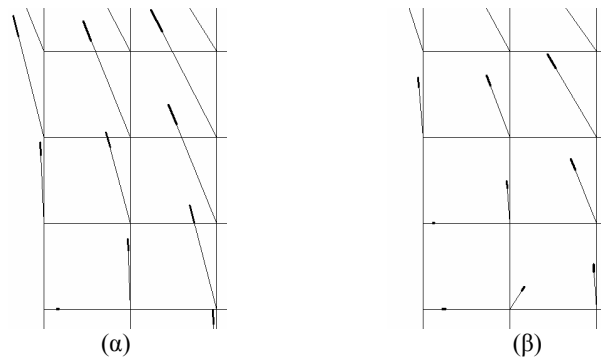


(α)



(β)

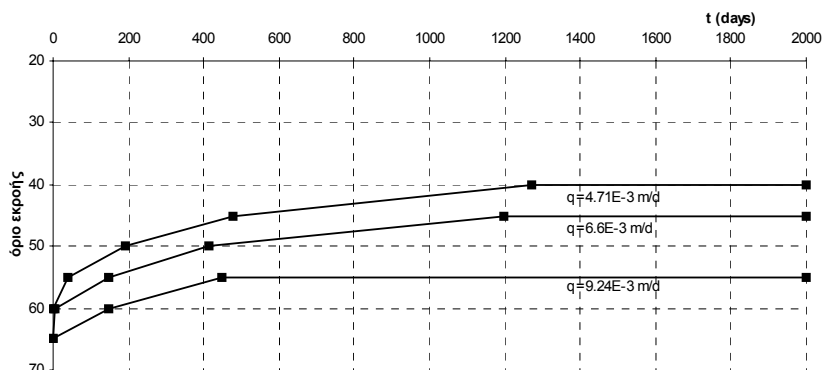
Σχήμα 3. Μεταβολή του ορίου εκροής με το χρόνο με βάση α) τις ταχύτητες στα μέσα των πλευρών των στοιχείων και β) τις ταχύτητες στους κόμβους των στοιχείων



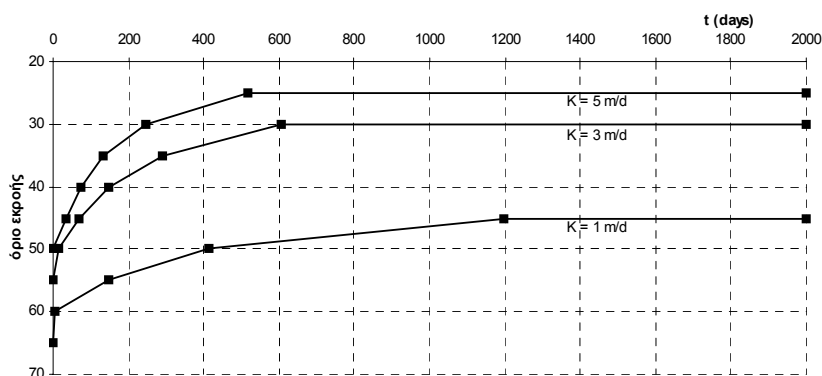
(α)

(β)

Σχήμα 4. Ταχύτητες προς τη πλευρά της θάλασσας σε χρόνο α) 400 και β) 1000 ημέρες



(α)



(β)

Σχήμα 5. Μεταβολή του ορίου εκροής με το χρόνο για διαφορετικές τιμές
α) ειδικής παροχής επαναπλήρωσης και β) υδραυλικής αγωγιμότητας

Χρησιμοποιώντας το δίκτυο των 5x5 m και μεταβάλλοντας τις υδρογεωλογικές παραμέτρους του Σχήματος 2, ελέγχθηκε η επίδραση στον καθορισμό του ορίου εκροής στις εξής διαφορετικές περιπτώσεις:

i. Για μεταβαλλόμενη τιμή του συντελεστή υδροδυναμικής διασποράς. Θέτοντας $D_m=0$ m^2/d και $\alpha_L=\alpha_T=3.5$ m [2,4], το μέγεθος του ορίου εκροής έχει αντίστοιχη μεταβολή με αυτή του Σχήματος 3.

ii. Για μεταβολή $\pm 40\%$ της τιμής της ειδικής παροχής επαναπλήρωσης του γλυκού νερού. Με μείωση ή αύξηση της παροχής, $q=4.71 \cdot 10^{-3}$ m/d ή $q=9.24 \cdot 10^{-3}$ m/d, έχουμε αντίστοιχα μείωση ή αύξηση του ορίου εκροής, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 5α. Αν λάβουμε υπόψη ότι η παροχή επαναπλήρωσης μπορεί να μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια ενός υδρολογικού έτους, τότε πρέπει να αναμένουμε και αντίστοιχη μεταβολή του ορίου εκροής του γλυκού νερού.

iii. Για διαφορετικές τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5β, παρατηρείται σημαντική μείωση του ορίου εκροής με την αύξηση της τιμής της υδραυλικής αγωγιμότητας.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Κατά την εφαρμογή αριθμητικών μοντέλων προσομοίωσης της διείσδυσης του θαλασσινού νερού, πρέπει να είναι γνωστό το όριο εκροής του γλυκού νερού προς τη θάλασσα. Το όριο εκροής, στο οποίο εφαρμόζεται οριακή συνθήκη δευτέρου τύπου, δεν είναι γνωστό εκ' των προτέρων για συγκεκριμένες υδρογεωλογικές συνθήκες και διαστάσεις του υδροφορέα. Δύο διαφορετικές μέθοδοι υπολογισμού του ορίου εκροής εφαρμόστηκαν με επιτυχία στο πρόβλημα του Henry. Η πύκνωση του δικτύου των πεπερασμένων στοιχείων είχε ως αποτέλεσμα ακριβέστερο υπολογισμό του ορίου εκροής.

Το όριο εκροής του γλυκού νερού έχει διαφορετικές τιμές για διαφορετικές υδρογεωλογικές συνθήκες. Έτσι, με τη εφαρμογή των μεθόδων αυτών στα μαθηματικά μοντέλα προσομοίωσης της διείσδυσης του θαλασσινού νερού, μπορεί να λαμβάνεται υπόψη η μεταβολή του ορίου εκροής με το χρόνο κατά την πορεία των υπολογισμών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Bear, J.. 1999. Conceptual and Mathematical Modeling. Chap. 5 in J. Bear, A. H-D. Cheng, S. Sorek, D. Quaraz, and I. Herrera (Eds.). Seawater intrusion in coastal aquifers – concepts methods and practices. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht. 127-162.
2. Frind, E. O.. 1982. Simulation of long-term transient density-dependent transport in groundwater. *Advances in Water Resources*. 5. 73-88.
3. Henry, H. R.. 1964. Effects of dispersion on salt encroachment in coastal aquifers. in *Sea Water in Coastal Aquifers*. US Geological Survey Water Supply Paper. 1613-C.
4. Huyakorn, P., Andersen, P., Mercer, J. and White, H. 1987. Saltwater intrusion in aquifers: Development and testing of a three-dimensional finite element model. *Water Resources Research*. 23(2). 293-312.
5. Kolditz, O., Ratke, R., Diersch, H-J. and Zielke, W. 1998. Coupled groundwater flow and transport: 1. Verification of variable density flow and transport models. *Advances in Water Resources*. 21(1). 27-46.
6. Segol, G., Pinder, G. and Gray, W.. 1975. A Galerkin-Finite Element Technique for Calculating the Transient Position of the Saltwater Front. *Water Resources Research*. 11(2). 343-347.
7. Voss, C. and Souza, W.. 1987. Variable-Density Flow and Solute Transport Simulation of Regional Aquifers Containing a Narrow Freshwater-Saltwater Transition Zone. *Water Resources Research*. 23 (10). 1851-1866.
8. Yeh, G. T..1981. On the computation of darcian velocity and mass balance in the finite element modeling of groundwater flow. *Water Resources Research*. 17(5). 1529-1534.
9. Δουλγέρης, Χ. και Ζήσης, Θ.. 2004. Προσομοίωση ροής ρευστού μεταβλητής πυκνότητας και μεταφοράς διαλυμένων ουσιών σε πορώδη μέσα – το πρόβλημα του Elder. *Υδροτεχνικά*. 14. 3-15.
10. Ζήσης, Θ. και Δουλγέρης, Χ.. 2003. Διδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων για ροή μεταβλητής πυκνότητας σε παράκτιους υδροφορείς. 9^ο Πανελλήνιο συνέδριο ΕΥΕ. Θεσσαλονίκη. 329-336.

ΕΝΔΟΔΑΣΙΚΗ ΚΙΝΗΣΗ ΕΛΚΥΣΤΗΡΩΝ ΣΕ ΑΔΙΑΤΑΡΑΚΤΑ ΕΔΑΦΗ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΤΟΥ ΞΥΛΟΥ

Κωνσταντίνος Καραγιάννης*

*Τμήμα Δασολογίας και Φυσικού Περιβάλλοντος, ΑΠΘ, ΤΚ 541 24, Θεσσαλονίκη

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή μελετάται η βατότητα λεπτόκοκκων δασικών εδαφών από ελκυστήρες ελαφρού τύπου κατά τη μετατόπιση του ξύλου. Πάρθηκαν και μελετήθηκαν η αντοχή του εδάφους, ο αριθμός διαδρομών, η παραμόρφωση του εδάφους, το βάθος του ίχνους των τροχών. Οριοθετήθηκαν τα εδάφη σε βατά και μη από ελκυστήρες. Μελετήθηκε η απόσταση μεταξύ των παρόδων μετατόπισης σε εξάρτηση από τη μεταφερόμενη ποσότητα ξύλου, από την αντοχή του εδάφους και τον τύπο του ελκυστήρα. Τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα της εργασίας θα αποτελέσουν χρήσιμο εργαλείο για την πράξη.

Λέξεις κλειδιά: Βατότητα εδαφών, κίνηση ελκυστήρων, παραμόρφωση εδαφών, βάθος ίχνους τροχών, απόσταση παρόδων μετατόπισης.

INTER-FOREST CIRCULATION OF TRACTORS ON UNDISTURBED SOILS FOR WOOD SKIDDING

Karayannis Konstantinos*

* School of Forestry and Natural Environment, Aristotle University of Thessaloniki,
Thessaloniki 541 24

ABSTRACT

In this paper is investigated the accessibility of thin-grained forest soils by light-type tractors during wood skidding. There have been taken and studied the tolerance of soil, the number of routes, the deformation of soil and the depth of wheels' tracks. Also, the soils, were delimited into accessible and non-accessible for tractors. Next was studied the distance between the skidding paths in dependence from the transported amount of wood, the tolerance of soil and the type of tractor.

The results and the conclusions of the paper will constitute a useful tool in practice.

Keywords: Accessibility of soils, circulation of tractors, deformation of soils, depth of wheel tracks, distance of skidding paths.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η προσέγγιση ενός δασικού συμπλέγματος για την κάρπωση των οικονομικών και κοινωνικών αποδόσεων του δάσους επιτυγχάνεται με τη σύνδεση του με το επαρχιακό οδικό δίκτυο, με τη διάνοιξη των επιμέρους δασικών τμημάτων και συστάδων (βασικό δίκτυο) και με τη σύνδεση και διάνοιξη των επιμέρους συστάδων με το βασικό δίκτυο (λεπτοφυής διάνοιξη).

Η μετατόπιση του ξύλου από τις επιμέρους συστάδες μέχρι το δασικό δρόμο είναι δυνατόν να γίνει με ζώα έλξεως δια μέσου συρτών, με ελκυστήρες δια μέσου ελκυστοδρόμων ή πάνω σε αδιατάρακτα εδάφη (πάροδοι μετατόπισης) καθώς και σχοινογερανούς [5]. Η κίνηση ελκυστήρων στις παρόδους μετατόπισης αποτελεί και αντικείμενο μελέτης της παρούσας εργασίας.

Οι πάροδοι μετατόπισης είναι λωρίδες φυσικού αδιατάρακτου εδάφους ελεύθερης βλάστησης και εμποδίων, στις οποίες εφόσον το έδαφος είναι βατό μπορούν να κινηθούν μηχανήματα μετατόπισης χωρίς διαμόρφωση του καταστρώματος [7].

Ένα φυσικό έδαφος χαρακτηρίζεται ως βατό, από δασοπονική άποψη, όταν αυτό διευκολύνει την κίνηση των ελκυστήρων μετατόπισης με βάση εδαφοτεχνικά κριτήρια, τεχνικά χαρακτηριστικά των ελκυστήρων και με βάση βιολογικές και κλιματικές συνθήκες [2,3].

Η βατότητα των εδαφών επηρεάζεται [1,2,9] από το είδος και τις ιδιότητες των εδαφών (κυρίως από την αντοχή), από τον τύπο, το βάρος και το φορτίο αξόνων των οχημάτων, το κλίμα και την εποχή του έτους καθώς και από την εγκάρσια κλίση της πλαγιάς και τη διαμόρφωση της επιφάνειας του εδάφους. Από την άποψη της βατότητας τα εδάφη, με κριτήριο το διαφορετικό βάθος του ίχνους των τροχών και την αντοχή του εδάφους, χαρακτηρίζονται [2] μη βατά για πολύ κακή αντοχή ($CBR < 1\%$), προβληματικά για κακή αντοχή ($CBR = 1-2\%$), προβληματικά έως χωρίς προβλήματα βατότητας, ανάλογα με την περιεκτικότητα σε νερό, για αντοχή ($CBR = 2-3\%$) και εδάφη χωρίς προβλήματα βατότητας για αντοχή εδάφους ($CBR > 3\%$).

Με κριτήρια την υδατοδιαπερατότητα, τη συμπιεστότητα και την αντοχή σε διάτμηση για μέσες καιρικές συνθήκες και χωρίς χιόνια η βατότητα και το βάθος ίχνους των τροχών επηρεάζονται κατά φθίνουσα σειρά από τα χονδρόκοκκα (διαρκή και καλή βατότητα) προς τα λεπτόκοκκα (κρίσιμη βατότητα) εδάφη [3].

Ο Καραγιάννης (1993) αναφέρει ότι σε πρώην γεωργικά εδάφη και νυν δασοσκεπής έκταση για τις ίδιες εδαφικές συνθήκες αυξάνει το βάθος του ίχνους των τροχών με την αύξηση των διαδρομών στις ίδιες αυλακώσεις, ενώ σε διαφορετικές αυλακώσεις δημιουργούνται διάφορα βάθη ίχνους τροχών και προτείνει την εκλογή μικρών αποστάσεων μεταξύ παρόδων μετατόπισης σε εδάφη με κακή αντοχή, ώστε να επιτυγχάνεται μείωση του αριθμού των διαδρομών ανά πάροδο μετατόπισης.

Ο Nirkow (1983) μελέτησε την αλληλεπίδραση των μηχανημάτων μετατόπισης του ξύλου και του εδάφους και κατέληξε ότι σε εδάφη με κακή αντοχή ($CBR = 1-2\%$) μειώνονται οι επιδράσεις των μηχανημάτων στο έδαφος, όταν αυτά είναι μέσου βάρους με μεγάλο πλάτος ελαστικών και σε εδάφη με πολύ κακή αντοχή ($CBR = 0-1\%$) μπορούν να κυκλοφορούν μηχανήματα με μεγάλα ελαστικά (Terrareifen).

Στην παρούσα εργασία σε δασικό λεπτόκοκκο έδαφος μελετήθηκε η βατότητά του με κριτήριο την αντοχή του ($CBR\%$), η παραμόρφωσή του από το βάθος του ίχνους των τροχών, η επίδραση του αριθμού των διαδρομών του ελκυστήρα στο βάθος του ίχνους των τροχών, ο επιτρεπόμενος αριθμός διαδρομών (όρια βατότητας) και ο καθορισμός της απόστασης μεταξύ των παρόδων μετατόπισης. Για την πραγματοποίηση των παραπάνω πάρθηκαν και μελετήθηκαν ή συνδυάστηκαν κατάλληλα στοιχεία πεδίου κατά τη μετατόπιση του ξύλου με ελκυστήρα.

2. ΥΛΙΚΑ – ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

2.1. Υλικά

Χρησιμοποιήθηκε ελκυστήρας ελαφρού τύπου (Fiat 640) για τη μετατόπιση του ξύλου καθώς και το χειροκίνητο όργανο (πενετόμετρο) για τη μέτρηση της αντοχής του εδάφους (CBR-τιμή %).

Πάρθηκαν στοιχεία πεδίου που αφορούσαν το βάθος του ίχνους των τροχών εντός των παρόδων μετατόπισης και ο αριθμός των διαδρομών που έγιναν καθώς και τιμές αντοχής του εδάφους εντός των παρόδων μετατόπισης.

2.2. Μέθοδος εργασίας

Σε συγκεκριμένη δασική περιοχή των Πιερίων (Ριζώματα) καθορίστηκαν δύο πάροδοι μετατόπισης με κατά μήκος κλίσεις 25-30% και μήκους 150 μέτρων.

Μετρήθηκε με το πενετόμετρο η αντοχή του εδάφους κατά μήκος των παρόδων και σε απόσταση 30 μέτρων τόσο σε διαφορετικά βάθη, όσο και σε σταθερό βάθος των 40 εκατοστών. Η τελική τιμή που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο μέσος όρος τριών μετρήσεων για κάθε σημείο. Οι μετρήσεις έλαβαν χώρα προ και μετά τη μετατόπιση κατά το μήνα Ιούνιο.

Η αντοχή του εδάφους μετρήθηκε πριν τη μετατόπιση και κατά τους μήνες Αύγουστο, Νοέμβριο, Φεβρουάριο και Απρίλιο, επειδή εξαρτάται και από την εποχή του έτους [2,6].

Μετρήθηκε η κατά μήκος παραμόρφωση του εδάφους (βάθος ίχνους των τροχών) μετά από 15 διαδρομές σε αποστάσεις ανά τριάντα μέτρα καθώς και στις πιο ευαίσθητες θέσεις (θέσεις μικρής αντοχής και υγρές), η παραμόρφωση του εδάφους εγκάρσια ως προς τον άξονα των παρόδων μετατόπισης (βάθος αυλάκωσης και ανύψωση εδάφους).

Η επίδραση του αριθμού των διαδρομών στο βάθος του ίχνους των τροχών μελετήθηκε με βάση τις σχέσεις 1 και 2 [2]

$$t = \text{CBR-τιμή \%} \times 0,7 \text{ Kp/cm}^2 \quad (1)$$

$$V = P/t \quad (2)$$

Η τιμή CBR επί τοις %, η οποία μετρήθηκε πριν από τη μετατόπιση (Ιούνιο), μετατράπηκε στην ονομαζόμενη τιμή αντοχής (t) με βάση τη σχέση (1) και συσχετίστηκε με την πίεση (P) των ελαστικών με τη σχέση (2). Η τιμή της σχέσης (P/ t) εκφράζει τις συνθήκες του εδάφους κάτω από τον τροχό και για εδάφη με μικρή αντοχή δίνει μεγάλες τιμές και αντίθετα.

Ως βάθος ίχνους τροχών πάρθηκε η μέση τιμή των μετρήσεων από τις εγκάρσιες παραμορφώσεις του εδάφους.

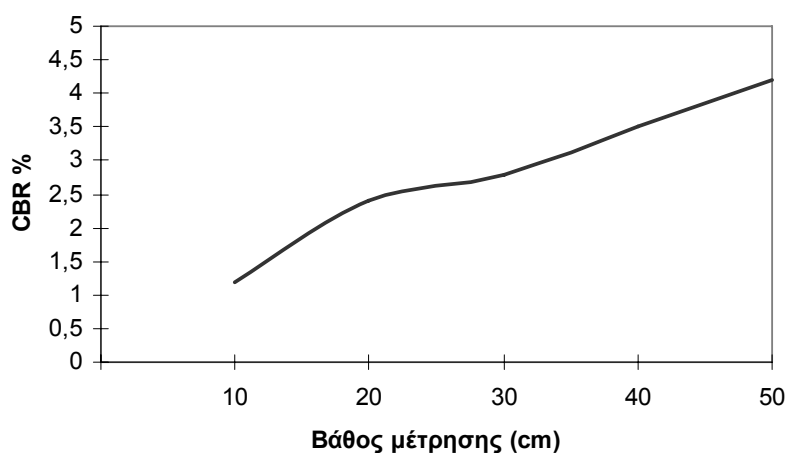
Ο καθορισμός των ορίων βατότητας ή του επιτρεπόμενου αριθμού διαδρομών προσδιορίστηκε σε συνάρτηση της πίεσης των ελαστικών (P), της τιμής αντοχής (t) και για ελεύθερο ύψος του ελκυστήρα από το έδαφος 40 εκατοστών (τεχνικό όριο της βατότητας του εδάφους) [2].

Ο καθορισμός της απόστασης μεταξύ των παρόδων μετατόπισης έγινε με βάση την ποσότητα του ξύλου που θα μετατοπιστεί (m^3), τον τύπο του ελκυστήρα (ελαφρού ή βαρέων τύπου) που θα χρησιμοποιηθεί, την αντοχή του εδάφους και σε συνδυασμό με τα όρια βατότητας.

Για όλες τις περιπτώσεις της μεθοδολογίας συντάχτηκαν τα απαραίτητα σχήματα.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στο σχήμα 1 δείχνεται η μεταβολή της μέσης αντοχής του εδάφους κατά θέση και πάροδο πριν από τη μετατόπιση, η οποία αυξάνει από θέση σε θέση μετά του βάθους των παρόδων. Η μεταβολή αυτή αποδίδεται στη μείωση της υδατοχωρητικότητας μετά του βάθους [2] και στην κατάσταση του εδάφους (ξηρά ή υγρά κατάσταση). Η μέση συνολική τιμή της αντοχής του εδάφους (CBR-τιμή %) ανέρχεται σε 3%.



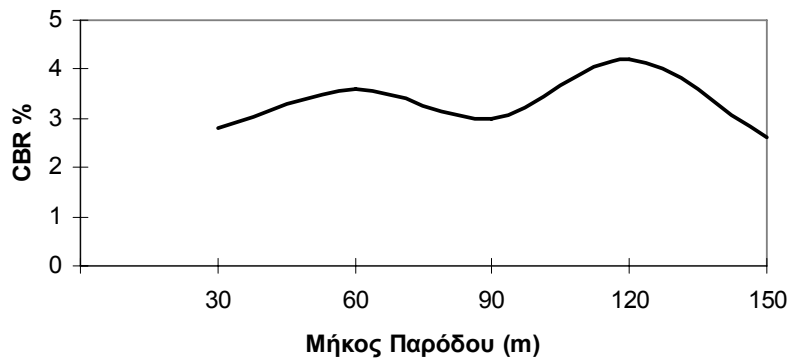
Σχήμα 1. Τιμή CBR % του εδάφους με αύξηση του βάθους μέτρησης

Στο σχήμα 2 δείχνεται η μεταβολή της αντοχής του εδάφους σε σταθερό βάθος των 40 εκατοστών μετά τη μετατόπιση και σε αποστάσεις των 30 εκατοστών κατά μήκος των παρόδων που παρουσιάζει μια κυματοειδής μορφή. Η μέση τιμή της αντοχής του εδάφους ανέρχεται σε 3,24%. Οι προεξοχές (μεγάλες τιμές CBR %) αντιστοιχούν σε ξηρά εδάφη ή στην ύπαρξη ριζικού συστήματος.

Οι τιμές (CBR %) της αντοχής του εδάφους μετά τη μετατόπιση γενικά δεν παρουσίασαν αξιόλογη διαφορά από τις τιμές πριν από τη μετατόπιση. Σε μερικές περιπτώσεις ήταν μικρότερες από τις τιμές πριν από τη μετατόπιση που σημαίνει ότι η συμπίεση του εδάφους δεν καλύτερεύει για κάθε περίπτωση την αντοχή του εδάφους. Οι δε τιμές σε υγρές θέσεις δεν ήταν κατά πολύ υψηλές από τις τιμές αντοχής πριν από τη μετατόπιση. Αυτό πιθανόν να οφείλεται στη μετάθεση της υγρασίας του εδάφους προς τα άνω.

Οι εποχιακές τιμές της αντοχής του εδάφους (CBR %) πριν από τη μετατόπιση παρουσίασαν μια διακύμανση από 1 – 4,5%, δηλαδή από μία κακή αντοχή έως μεγάλη αντοχή [2].

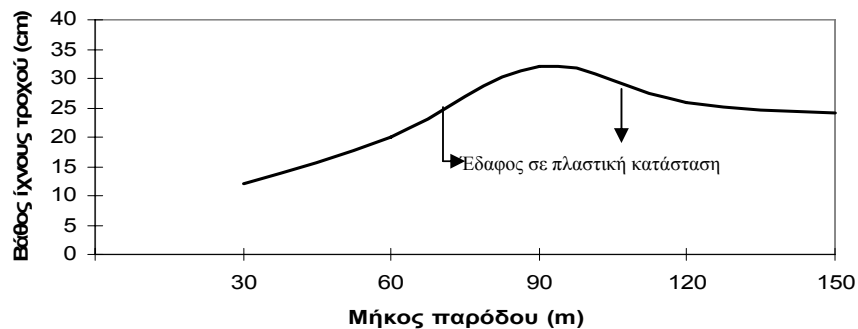
Κατά τη θερινή περίοδο (Αύγουστο) πάρθηκαν μεγάλες τιμές αντοχής (3-5%). Η ποσότητα βροχής που πέφτει την εποχή αυτή αποβαίνει αρνητική σε σχέση με τη ξηρασία.



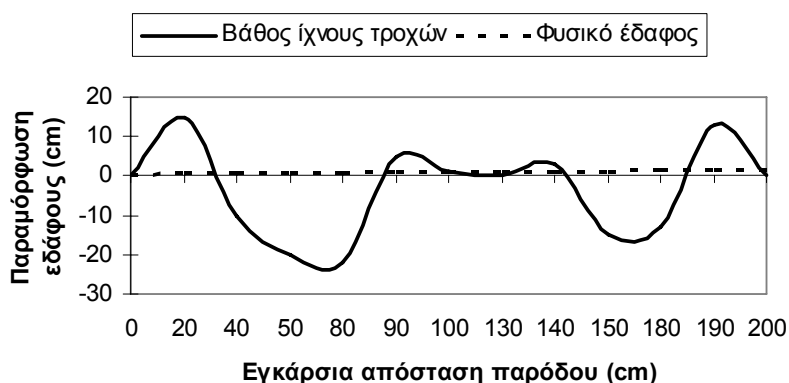
Σχήμα 2. Τιμή CBR % του εδάφους σε σταθερό βάθος μέτρησης.

Κατά τη φθινοπωρινή περίοδο (Νοέμβρη) πάρθηκαν μέσες τιμές αντοχής (2-3%) λόγω υγρασίας του εδάφους, τη χειμερινή περίοδο (Φεβρουάριο) κακές αντοχές (1-2 %) με εξαίρεση περιόδους με ψυχρούς και ξηρούς ανέμους. Κατά τον Απρίλιο το έδαφος είχε αποκτήσει ικανοποιητική αντοχή (2-3%) λόγω μείωσης της υγρασίας του εδάφους.

Στα σχήματα 3 και 4 δείχνονται αντίστοιχα η κατά μήκος και η εγκάρσια παραμόρφωση του εδάφους που είναι διαφορετική από θέση σε θέση των παρόδων μετατόπισης και περίπου ανάλογη με τη μείωση της αντοχής του εδάφους και την αύξηση της υγρασίας του. Από παρατηρήσεις που έγιναν σε ορισμένες θέσεις με μεγάλη υγρασία, με μικρή αντοχή του εδάφους μετά από 7-8 διαδρομές, το βάθος του ίχνους των τροχών ελάμβανε τιμές 45-50 εκατοστά και το έδαφος καθίστατο μη βατό. Στην περίπτωση αυτή πραγματοποιήθηκε το τεχνικό όριο της βατότητας του εδάφους [2]. Επίσης παρατηρήθηκε ότι, όταν οι συνθήκες του εδάφους είναι οι ίδιες αυξάνει το βάθος του ίχνους των τροχών με την αύξηση των διαδρομών στις ίδιες αυλακώσεις, ενώ αντίθετα δημιουργούνται διάφορα βάθη ίχνους τροχών σε διαφορετικές αυλακώσεις.

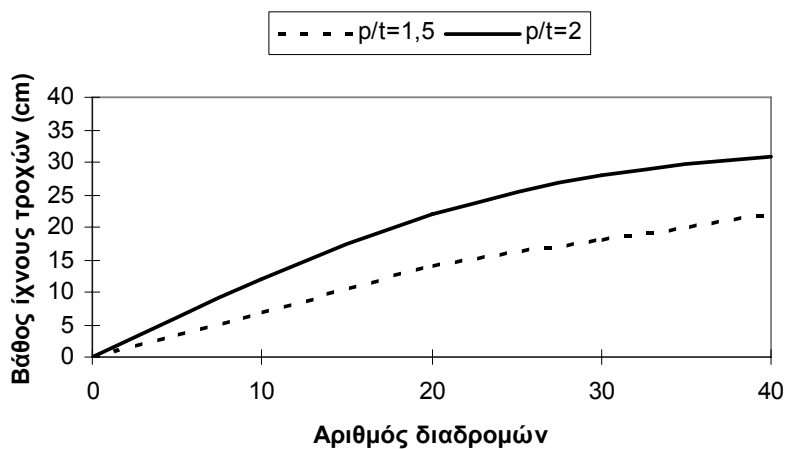


Σχήμα 3. Κατά μήκος παραμόρφωση του εδάφους.



Σχήμα 4. Εγκάρσια παραμόρφωση του εδάφους.

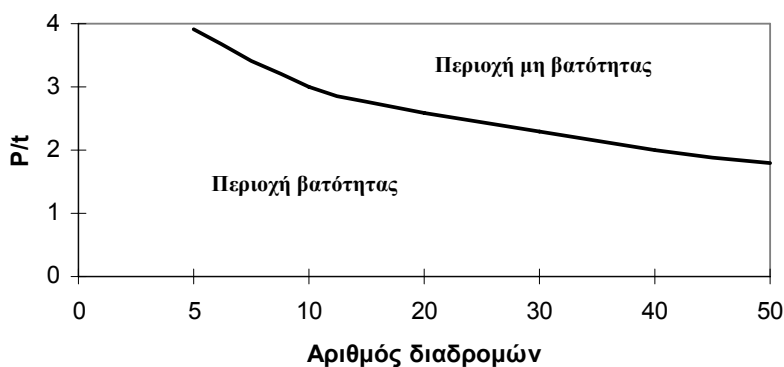
Το σχήμα 5 που παριστάνει την επίδραση του αριθμού των διαδρομών στο βάθος του ίχνους των τροχών σε εξάρτηση από την πίεση των ελαστικών (P) και την αντοχή του εδάφους (t), δείχνει ότι στις πρώτες δέκα διαδρομές το βάθος του ίχνους των τροχών αυξάνεται απότομα σε σχέση με την περαιτέρω αύξηση του αριθμού των διαδρομών, για τις ίδιες διαδρομές όσο αυξάνει η τιμή της σχέσης (P/t) αυξάνει και το βάθος του ίχνους των τροχών και ότι το βάθος του ίχνους των τροχών μετά από ορισμένες διαδρομές γίνεται ίσο με το ελεύθερο ύψος του ελκυστήρα για ορισμένη τιμή της σχέσης (P/t).



Σχήμα 5. Βάθος ίχνους των τροχών σε συνάρτηση της πίεσης των ελαστικών (P) και της αντοχής (t).

Εάν θεωρήσουμε ότι η τιμή (P) αυξάνεται (χρησιμοποίηση άλλου ελκυστήρα) και η τιμή (t) παραμένει η ίδια, τότε η τιμή της σχέσης (P/t) αυξάνει και οι καμπύλες μετατίθενται προς τα πάνω με σύγχρονη αύξηση του βάθους του ίχνους των τροχών.

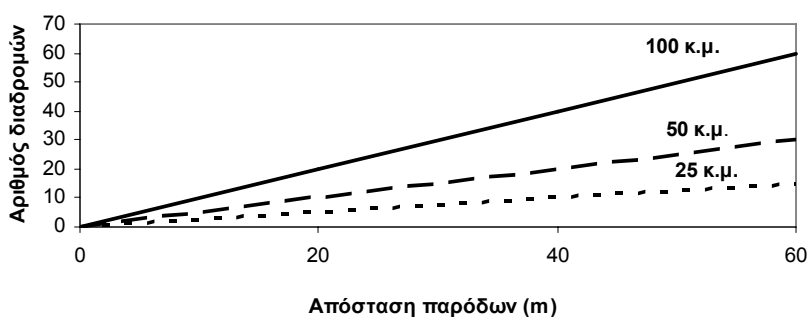
Στο σχήμα 6, όπου καθορίζονται τα όρια βατότητας, δηλ. ο επιτρεπόμενος αριθμός διαδρομών σε συνάρτηση με τη σχέση (P/t), η καμπύλη οριοθετεί τα εδάφη στην περιοχή μη βατότητας και στην περιοχή βατότητας (περίπτωση ελκυστήρα ελαφρού τύπου). Στην περιοχή βατότητας όσο τα εδάφη παρουσιάζουν μικρή αντοχή (η τιμή (P/t) αυξάνει) τόσο ελαττώνεται ο αριθμός διαδρομών.



Σχήμα 6. Όρια βατότητας σε συνάρτηση του αριθμού των διαδρομών και της σχέσης P/t.

Εάν θεωρήσουμε ότι χρησιμοποιούμε ελκυστήρα βαρέως τύπου (μεγαλύτερο ίδιο βάρος και φορτίο μεταφοράς ανά διαδρομή σε σύγκριση με ελαφρού τύπου ελκυστήρα) για τις ίδιες εδαφικές συνθήκες και τον ίδιο αριθμό διαδρομών, τότε η καμπύλη οριοθέτησης θα κείται χαμηλότερα από την καμπύλη του ελκυστήρα ελαφρού τύπου.

Στο σχήμα 7 που παριστάνει τη μεταβολή του αριθμού των διαδρομών σε συνάρτηση με την απόσταση μεταξύ των παρόδων μετατόπισης και τον όγκο που θα μετατοπιστεί, δείχνει ότι, όταν η απόσταση μεταξύ των παρόδων είναι η ίδια ή αυξάνει, όσο αυξάνει ο όγκος του ξύλου (m^3) για μετατόπιση τόσο αυξάνει ο απαιτούμενος αριθμός διαδρομών.



Σχήμα 7. Διαδρομές σε συνάρτηση της απόστασης των παρόδων και του όγκου προς μετατόπιση

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Η αντοχή του εδάφους επιτρέπει τη χρησιμοποίηση ελκυστήρων ελαφρού τύπου κατά τη θερινή περίοδο χωρίς προβλήματα βατότητας των εδαφών
- Οι μικρές αποστάσεις μεταξύ των παρόδων μετατόπισης σε εδάφη με μικρή αντοχή συμβάλλουν στη μείωση της κατά μήκος και της εγκάρσιας παραμόρφωσης του εδάφους, ώστε να επιτυγχάνεται μείωση του αριθμού των διαδρομών ανά πάροδο μετατόπισης, οι κατάλληλες θέσεις για παρόδους μετατόπισης ως προς την υγρασία του εδάφους, τα ελαφρού τύπου μηχανήματα, τα μικρά φορτία μετατόπισης και η κατάλληλη εποχή του έτους για τη μετατόπιση του ξύλου (Μάιος έως Σεπτέμβριος)
- Η χρησιμοποίηση ελκυστήρα βαρέως τύπου σε εδάφη με τις ίδιες εδαφικές συνθήκες και τον ίδιο αριθμό διαδρομών δημιουργεί ίχνη τροχών μεγαλύτερου βάθους και το εύρος της περιοχής βατότητας γίνεται μικρότερο σε σύγκριση με αυτό των ελκυστήρων ελαφρού τύπου, επομένως η χρησιμοποίηση των ελκυστήρων βαρέως τύπου σε εδάφη με μικρή αντοχή είναι προβληματική
- Από τα όρια βατότητας και τη μεταβολή του αριθμού των διαδρομών σε συνάρτηση με την απόσταση των παρόδων μετατόπισης και του όγκου προς μετατόπιση συνάγονται:
 1. Όταν τα εδάφη παρουσιάζουν μικρή αντοχή [μεγάλη τιμή (P/t)], ανεξάρτητα από τον τύπο του ελκυστήρα και την ποσότητα του ξύλου προς μετατόπιση, απαιτείται γενικά μικρή απόσταση μεταξύ των παρόδων μετατόπισης μέσα στην περιοχή βατότητας
 2. Στα εδάφη με μικρή αντοχή και με μικρές αποστάσεις μεταξύ των παρόδων μετατόπισης, για τη μεταφορά μεγάλης ποσότητας ξύλου, απαιτείται η χρησιμοποίηση ελαφρού τύπου ελκυστήρων (μικρό ίδιο βάρος καθώς και μικρότερο φορτίο/διαδρομή)
 3. Για την ίδια ποσότητα ξύλου προς μεταφορά και τον ίδιο τύπο ελκυστήρα αυξάνεται ο αριθμός των διαδρομών με την αύξηση της απόστασης μεταξύ των παρόδων μετατόπισης. Η αύξηση αυτή προϋποθέτει μετάβαση σε εδάφη με σχετικά υψηλότερη αντοχή του εδάφους [μικρή τιμή(P/t)] μέσα στην περιοχή βατότητας. Η χρησιμοποίηση βαρέως τύπου ελκυστήρα στην περίπτωση αυτή είναι δυνατή.
 4. Για τις περιπτώσεις ελληνικών παραγωγικών δασών κρίνονται ικανοποιητικές αποστάσεις μεταξύ παρόδων μετατόπισης 30-40 μέτρα. Οι αποστάσεις αυτές αντιστοιχούν σε μήκος σύρσης εκτός παρόδων μετατόπισης 15-20 μέτρων και σε 15-20 διαδρομές. Οι διαδρομές αυτές δίνουν τη δυνατότητα χρησιμοποίησης τόσο ελκυστήρων ελαφρού τύπου, όσο και βαρέως τύπου με προτίμηση τους πρώτους.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Dietz P.- Knigge W. – Löffler H.. 1984. Walderschließung. Verlag Paul Parey. Hamburg und Berlin.
2. Erdas O.. 1976. Bodenmechanische Probleme der Befahrbarkeit, der Bodentragfähigkeit und des Holzurückens in natürlichen Böden des schweizerischen Mittellandes. ETH, Diss. nt. 5830.

3. Löffler H.. 1982.. Terrain classification and ist relation to operational methods. Joint committee on Forest Workin Techniques and Training of Forest Workers, IUFRO Division III, seminar on the planning and technique of transport, Oslo.
4. Löffler H.. 1983. Risiken moderner forstlicher Arbeitsverfahren für Boden und Bestand. Forstw. Cbl. 102. H.2, S. 65-148.
5. Heinimann H-R.. 1986. Seilkraneinsatz in der Schweizer Alben. Eine Untersuchung über die Geländeverhältnisse, die Erschließung und den Einsatz verschiedener Seilanlagen. Diss. ETH Nr. 7929.
6. Καραγιάννης Κ.. 1991. Εκτίμηση του βαθμού διάνοιξης του δάσους στις ορεινές περιοχές της Ελλάδας. Διδακτορική διατριβή. Θεσσαλονίκη.
7. Καραγιάννης Κ.. 1992. Χαρακτηριστικά στοιχεία των παρόδων μετατόπισης του ξύλου και η αλληλοεπίδρασή τους. Επιστ. Επετ. Τμήματος Δασολογίας και Φ.Π. Τόμος ΛΕ/2. Αριθ. 27.
8. Καραγιάννης Κ.. 1993. Καθορισμός των παρόδων μετατόπισης σε φυσικά εδάφη. Επιστ. Επετ. Τμήματος Δασολογίας και Φ.Π. Τόμος ΛΣΤ.
9. Kuonen V.. 1983.. Wald- und Güterstrassen. Pfaffhausen, Eigenverlag des Verfassers.
10. Nipkow F. 1983.. Vorteile und Breitreifen für Forstschlepper auf schlecht tragfähigen Waldböden. Forstw. Cbl. 102. H. 2, S. 65-148.

ΤΟ ΥΣΤΕΡΗΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ PARLANGE. ΧΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΑΔΥΝΑΜΙΕΣ

Κάργας Γ., Φασούλη Β., Κερκίδης Π., Ι. Αργυροκαστρίτης

ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων & Γεωργικής Μηχανικής

Τομέας Διαχείρισης Υδατικών Πόρων

Ιερά Οδός 75, Αθήνα 11855

e-mail: lhyd4kag@aua.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία γίνεται μία γενική επισκόπηση της βιβλιογραφίας στο ενδιαφέρον και σχετικά δύσκολο θέμα του φαινομένου της υστέρησης, που παρατηρείται στις υδραυλικές ιδιότητες των πορωδών μέσων. Σε πρόσφατες ερευνητικές εργασίες στο πιο πάνω θέμα, απασχολεί η δυνατότητα πρόβλεψης της υστερητικής συμπεριφοράς $\Theta(H)$ από τα πειραματικά δεδομένα ενός μόνο οριακού κλάδου του βρόχου υστέρησης, είτε αυτού της διαβροχής είτε αυτού της στράγγισης. Το υστερητικό μοντέλο του Parlange παρέχει τη δυνατότητα αυτή καταλήγοντας σε εξισώσεις με τις οποίες μπορεί κάποιος να προβλέψει και κάθε τάξης διερευνητικές καμπύλες. Η εφαρμογή του μοντέλου Parlange, διευκολύνεται αν τα πειραματικά δεδομένα της ΧΚΥ προσαρμοστούν σε γνωστές αναλυτικές σχέσεις π.χ van Genuchten (1980) ή Brooks and Corey (1964). Για το σκοπό αυτό έχουν πραγματοποιηθεί πειράματα προσδιορισμού της ΧΚΥ στο εργαστήριο και οι προβλέψεις του μοντέλου Parlange συγκρίνονται με τα πειραματικά δεδομένα. Φαίνεται, ότι το μοντέλο Parlange, παρά την απλοικότητά του, είναι δυνατό σε ορισμένες περιπτώσεις πορωδών μέσων να δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Λέξεις κλειδιά: Χαρακτηριστική καμπύλη υγρασίας, Υστέρηση, διερευνητικές καμπύλες, Σημεία καμπής, Σημεία αναστροφής.

THE HYSTERETIC PARLANGE MODEL. USEFULNESS AND WEAKNESSES

Kargas G, Fasouli B, Kerkides P and Argyrokastritis I

AGRICULTURAL UNIVERSITY OF ATHENS

Sector of water resources management

ABSTRACT

The problem of hysteresis in the hydraulic properties of porous materials is investigated in the light of some recent research attempts. According to these attempts the prediction of the hysteretic loop, as a whole, could be achieved from the exploitation of only one main hysteretic branch, either that of wetting or that of drying. In this present work, elaborate experiments on the hysteretic moisture retention curve, were performed. The main hysteretic branches, were curve-fitted to an analytical expression of a van-Genuchten form and subsequently the hysteretic Parlange model was employed for the determination of the hysteretic loop, from only one main hysteretic branch. It seems that Parlange's hysteretic model, although very simple but ambitious, could give adequate predictions for some special porous materials.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μελέτη των προβλημάτων της ακόρεστης ροής του νερού στα πορώδη μέσα προϋποθέτει την γνώση των υδραυλικών ιδιοτήτων τους. Σ' αυτές περιλαμβάνεται η σχέση μεταξύ της περιεκτικότητας σε νερό (Θ) του εδάφους και του φορτίου πίεσης (H) καθώς και η σχέση μεταξύ της υδραυλικής αγωγιμότητας (K) και της (Θ) ή του (H). Οι σχέσεις αυτές όμως χαρακτηρίζονται από το φαινόμενο της υστέρησης. Η ενσωμάτωσή της, στην επίλυση προβλημάτων τα οποία περιλαμβάνουν διαδοχικούς κύκλους διαβροχής και αποστράγγισης απαιτεί την γνώση μεγάλης ποσότητας πειραματικών δεδομένων τα οποία είναι και ιδιαίτερα δύσκολο να αποκτηθούν. Συνήθως οι δυσκολίες αυτές οδηγούν στην παράλειψη του φαινομένου. Όμως έχει δείχθει ότι η αγνόηση του φαινομένου οδηγεί σε σημαντικά σφάλματα στην πρόβλεψη της κατανομής του νερού, των διαλυτών αλάτων και των διαφόρων ρύπων στα πορώδη μέσα (Hoa et. al., 1977 Nielsen et al. 1986; Parker and Lenhard, 1987; Russo et al., 1989; Si and Kachanoski, 2000). Το γεγονός αυτό οδήγησε στην δημιουργία μοντέλων ώστε να είναι δυνατή η πρόβλεψη των διερευνητικών καμπύλων Θ - H με την λιγότερη δυνατή ποσότητα πειραματικών δεδομένων. Σημαντικός σταθμός σ' αυτή την προσπάθεια ήταν η εφαρμογή της θεωρίας των ανεξάρτητων στοιχείων στο σύστημα πορώδες μέσο-νερό (Poulovassilis, 1962). Στην περίπτωση των ανεξάρτητων στοιχείων η σχέση Θ - H μπορεί να υπολογισθεί από τα πειραματικά των δύο οριακών κλάδων και μίας οικογένειας διερευνητικών καμπύλων A' τάξης είτε στράγγισης είτε διαβροχής.

Ο J.Philip (1964) παρουσίασε ένα υπολογιστικό σχήμα, όπου οι υστερητικές διαδρομές υπολογίζονται από τα δεδομένα μόνο των δύο οριακών καμπύλων στράγγισης και διαβροχής αντίστοιχα. Οι μαθηματικές δυσκολίες στην εφαρμογή του μοντέλου υπήρξαν σημαντικό εμπόδιο στην χρησιμοποίησή του.

Στην συνέχεια, αρκετοί ερευνητές παρουσίασαν υπολογιστικά σχήματα στα οποία οι υστερητικές διαδρομές υπολογίζονται από τα δεδομένα μόνο των δύο οριακών καμπύλων στράγγισης και διαβροχής αντίστοιχα (Mualem, 1973, 1974; Mualem and Dagan, 1975; Mualem, 1977; Mualem and Miller, 1979; Scott et al. 1983; Mualem, 1984; Poulovassilis and Kargas, (2000), Κάργας (2002). κ.α).

Στην παρούσα εργασία γίνεται μία πρώτη προσπάθεια αξιολόγησης της μεθόδου που παρουσίασε ο Parlange (1976). Η μεθοδολογία απαιτεί την γνώση των πειραματικών δεδομένων μόνο μίας οριακής καμπύλης για την πρόβλεψη των διερευνητικών καμπύλων. Για λόγους ευκολίας στους υπολογισμούς έγινε προσαρμογή των πειραματικών δεδομένων της χρησιμοποιούμενης οριακής καμπύλης διαβροχής στην εξίσωση Van Genuchten. Για το έλεγχο της αξιοπιστίας του μοντέλου εξετάστηκαν τέσσερα πορώδη μέσα με διαφορετικά χαρακτηριστικά.

2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

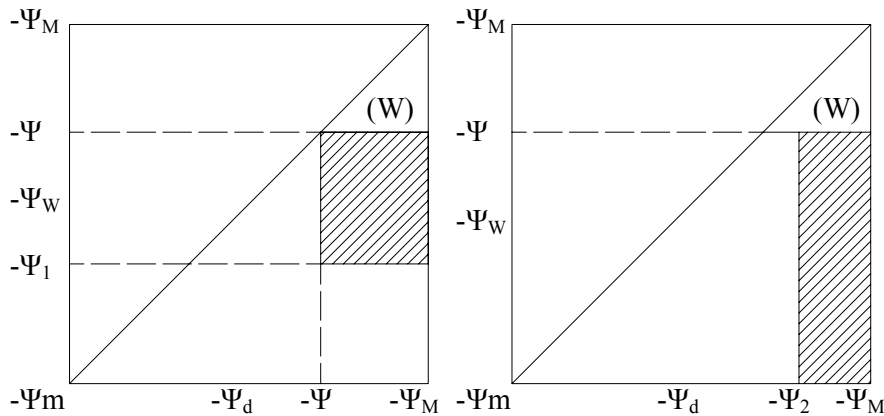
2.1. Η προτεινόμενη μεθοδολογία στηρίζεται στην υπόθεση ότι η συνάρτηση κατανομής f των στοιχείων του νερού εξαρτάται μόνο από την τιμή του φορτίου πίεσης κατά την στράγγιση. Είναι προφανές ότι η παραπάνω υπόθεση είναι μία χονδρική προσέγγιση η οποία μπορεί να ισχύει μόνο εάν η διακύμανση του μεγέθους του ανοίγματος των πόρων είναι πολύ μεγαλύτερη από την διακύμανση του μεγέθους της εσωτερικής διαμέτρου των πόρων. Η συγκεκριμένη υπόθεση έγινε γιατί διευκολύνει τους υπολογισμούς. Εάν γίνουν άλλες δυνατές υποθέσεις π.χ ότι η f εξαρτάται από την ψ_w τότε θα έχουμε λιγότερο απλουστευμένες μορφές. Επιπλέον ο Parlange τονίζει ότι η ατέλεια του μοντέλου μπορεί να εξαλειφεται σε μακροσκοπικό επίπεδο. Όπως,

αναφέρει, κάτι ανάλογο συμβαίνει και με την πολύ γνωστή εξίσωση διήθησης των Green and Ampt (1911) η οποία υποθέτει ότι το πορώδες μέσο έχει μόνο ένα μέγεθος πόρου. Παρόλα αυτά η εξίσωση μπορεί να περιγράψει ικανοποιητικά το φαινόμενο της διήθησης σε πραγματικά εδάφη.

Με βάση την υπόθεση ότι η f είναι συνάρτηση μόνο του φορτίου πίεσης κατά την στράγγιση ψ_d , η περιεκτικότητα σε υγρασία σ' ένα φορτίο πίεσης ψ κατά μήκος μίας διερευνητικής καμπύλης στράγγισης πρώτης τάξης, η οποία ξεκινά από ένα φορτίο πίεσης ψ_1 της οριακής καμπύλης διαβροχής, θα δίνεται από την εξίσωση

$$\Theta_d(\psi, \psi_1) = \Theta_w(\psi) + \int_{\psi_1}^{\psi} d\psi_w \int_{\psi}^{\psi_M} f(\psi_d, \psi_w) d\psi_d \quad (1)$$

Η εξίσωση (1) προκύπτει από την ολοκλήρωση στην αντίστοιχη περιοχή του σχήματος (1)



Σχήμα 1: Παρουσίαση του τρόπου υπολογισμού της f . Το τρίγωνο (W) είναι η περιοχή ολοκλήρωσης της f που ορίζει την Θ_w (Parlange, 1976).

Επειδή όμως η f είναι συνάρτηση μόνο του Θ_d η εξίσωση (1) μετατρέπεται στην

$$\Theta_d(\psi, \psi_1) = \Theta_w(\psi) - (\psi - \psi_1) \left(\frac{d\Theta_w}{d\psi} \right) \quad (2)$$

διότι από τον ορισμό της f είναι φανερό ότι ισχύει

$$\frac{d\Theta_w}{d\psi} = - \int_{\psi}^{\psi_M} f(\psi_d) d\psi \quad (3)$$

όπου ψ_M η μέγιστη τιμή του φορτίου πίεσης.

Από την εξίσωση (2) μπορούμε να προσδιορίσουμε τις καμπύλες στράγγισης οι οποίες ξεκινούν από μία καμπύλη διαβροχής σε κάθε τιμή του φορτίου πίεσης $\psi = \psi_1$.

Με την ολοκλήρωση της εξίσωσης (2) προσδιορίζονται οι διερευνητικές καμπύλες διαβροχής $\Theta_w(\psi, \psi_1, \psi_2)$ οι οποίες προκύπτουν από μία καμπύλη στράγγισης

$\Theta_d(\psi, \psi_1)$ στο σημείο $\psi = \psi_2$, όπου $\Theta_w = \Theta_d = \Theta_2$ (Parlange, 1980)

$$\Theta_w(\psi, \psi_1, \psi_2) - \Theta_2 = (\psi - \psi_1) \int_{\psi}^{\psi_2} [\Theta(\psi, \psi_1) - \Theta_2] / (\psi_1 - \psi)^2 d\psi \quad (4)$$

Είναι φανερό ότι εάν $\psi_1 = \psi_m$ (ΣΧ.1) τότε η εξίσωση (2) μπορεί να μας δώσει την οριακή καμπύλη στράγγισης εάν είναι γνωστή η οριακή καμπύλη διαβροχής. Αντίστοιχα η εξίσωση (4) όταν το $\psi_2 \rightarrow \infty$, μπορεί να μας δώσει την οριακή καμπύλη διαβροχής εάν είναι γνωστή η οριακή καμπύλη στράγγισης. Επειδή όμως σπάνια συμβαίνει το $\psi_2 \rightarrow \infty$ η οριακή καμπύλη διαβροχής στην ουσία είναι μία διερευνητική καμπύλη διαβροχής πρώτης τάξης. Συνήθως είναι γνωστή η οριακή καμπύλη στράγγισης και προτείνεται η εξίσωση (4) για την πρόβλεψη της οριακής καμπύλης διαβροχής. Για την πρόβλεψη των διερευνητικών καμπύλων στράγγισης αξιοποιείται η εξίσωση (2) όπου όμως σαν οριακή καμπύλη διαβροχής χρησιμοποιείται η προβλεπόμενη από την οριακή καμπύλη στράγγισης και όχι η πραγματικά μετρούμενη. Για την πρόβλεψη των διερευνητικών καμπύλων διαβροχής αξιοποιείται η εξίσωση (4) κατάλληλα τροποποιημένη όπου σαν Θ_2 παίρνουμε την περιεκτικότητα σε υγρασία από την οποία ξεκινά η διερευνητική καμπύλη διαβροχής. Όπως φαίνεται ο υπολογισμός των οριακών καμπύλων και των διερευνητικών προϋποθέτει και την ακριβή γνώση της τιμής ψ_m , δηλαδή του σημείου που τέμνονται οι δύο οριακές καμπύλες. Συνεπώς χρειαζόμαστε για τους υπολογισμούς τουλάχιστον ένα σημείο της οριακής καμπύλης διαβροχής. Πρακτικά αυτό σημαίνει μέτρηση και της οριακής καμπύλης διαβροχής.

2.2 Οι Y. Mualem and H.J. Morel-Seytoux (1978) τεκμηρίωσαν ότι το μοντέλο Parlange αντιστοιχεί σε μία ειδική περίπτωση της υπόθεσης ομοιότητας (similarity hypothesis) την οποία εισηγήθηκε ο Philip (1964) και εφάρμοσε ο Mualem (1973) όπου $f(\psi_w, \psi_d) = h(\psi_w)l(\psi_d)$. Σ' αυτήν την ειδική περίπτωση η $h(\psi_w)$ θεωρείται ίση με την μονάδα για όλες τις τιμές του ψ . Έτσι η κλίση της οριακής καμπύλης διαβροχής θα δίνεται από την

$$\frac{d\Theta_w}{d\psi} = \int_{\psi_{\min}}^{\psi} h(\psi_w)l(\psi_d) d\psi_d = L(\psi) \quad (5)$$

όπου $L(\psi) = \int_{\psi_{\min}}^{\psi} l(\psi) d\psi$ και συνεπώς

$$l(\psi) = \frac{d^2\Theta_w(\psi)}{d\psi^2} \quad (6)$$

Η συνάρτηση κατανομής των στοιχείων f οφείλει να είναι παντού θετική. Όμως αφού η $h(\psi)$ είναι ίση με την μονάδα πρέπει η $l(\psi)$ να είναι παντού θετική. Αυτό σημαίνει ότι η $L(\psi)$ καθώς επίσης και η κλίση από την εξίσωση (5) πρέπει να είναι μονοτονικά αυξανόμενη συνάρτηση του ψ . Όμως στα πορώδη μέσα που παρουσιάζουν σιγμοειδή οριακή καμπύλη διαβροχής αυτό δεν μπορεί να συμβαίνει. Τα πορώδη μέσα τα οποία έχουν καμπύλη σχήματος S θα εμφανίζουν σημείο καμπής (inflection point) πράγμα το οποίο σημαίνει αντιστροφή των κλίσεων. Μάλιστα το σημείο αντιστροφής των κλίσεων μπορεί να παρατηρηθεί και σε σχετικά μικρές τιμές υγρασίας. Έτσι στην περίπτωση αυτή θα έχουμε μία μεγάλη περιοχή αρνητικών τιμών της f . (Mualem and Morel-Seytoux, 1978). Αυτή είναι και η θεωρητική βάση της «παραδοξότητας» που παρατηρείται στην πρόβλεψη της $\Theta_d(\psi, \psi_1)$ όταν γνωρίζουμε τον οριακό κλάδο διαβροχής.

Αντίθετα εάν είναι γνωστός ο οριακός κλάδος στράγγισης τότε η προβλεπόμενη οριακή καμπύλη διαβροχής δεν έχει σχήμα S και παρουσιάζει την μέγιστη κλίση στο ψ_m όπου έπρεπε να είχε μηδενική κλίση. Επίσης πρέπει να υπογραμμίσουμε την σημασία της ακριβούς εκτίμησης της τιμής ψ_m διότι διαφορετικές τιμές όπως είναι φανερό παράγουν και διαφορετικές οριακές καμπύλες διαβροχής.

2.3 Το μειονέκτημα της πρόβλεψης της οριακής καμπύλης διαβροχής χωρίς σημείο καμπής εντοπίστηκε και όταν διάφοροι ερευνητές (W.L Hogarth et al., 1988), (R. D. Braddock et al., 2000) προσπάθησαν να βρουν αναλυτικές λύσεις στο μοντέλο Parlange όταν η χαρακτηριστική καμπύλη υγρασίας περιγράφεται από αναλυτικές εξισώσεις. Οι Hogarth et al. (1988) υπέθεσαν ότι η χαρακτηριστική καμπύλη υγρασίας περιγράφεται από την εξίσωση Brooks and Corey (1964) ενώ οι Braddock et al. (2000) από την εξίσωση van Genuchten (1980).

3.ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Για τον έλεγχο του προτεινόμενου μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν τα πειραματικά δεδομένα από τέσσερα πορώδη μέσα.

1. Διαταραγμένο εδαφικό δείγμα με 50% άμμο, 43% άργιλο και 7% ιλύ (Αμμώδης Αργίλος).
2. Εδαφικό υπόστρωμα που χρησιμοποιείται στα γήπεδα γκόλφ με 85% άμμο, 5% άργιλλο και 8% τύρφη.
3. Αδιατάρακτο εδαφικό δείγμα με 48,2% άμμο, 28,8% άργιλλο και 23% ιλύ (Αμμώδης αργιλοπηλός).
4. Δεδομένα που παρουσιάστηκαν από Poulouvassilis and Childs (1971)

Η επιλογή των πορωδών μέσων έγινε με τρόπο ώστε να καλύπτεται ένα ευρύ φάσμα τους και να έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά ώστε τα συμπεράσματα να είναι όσο το δυνατόν ασφαλέστερα. Τα πειραματικά δεδομένα για τα τρία πρώτα πορώδη μέσα αποκτήθηκαν στο Εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής του Γ.Π.Α. Τα δεδομένα για τα πορώδη μέσα 1 και 3 αποκτήθηκαν από κύτταρο πίεσης ενώ για το 2 από συσκευή Haines. Στα πορώδη μέσα 1 και 2 αποκτήθηκαν μόνο οι οριακοί κλάδοι του βρόχου υστέρησης ενώ στο 3 και οι διερευνητικές καμπύλες στράγγισης και διαβροχής πρώτης τάξης.

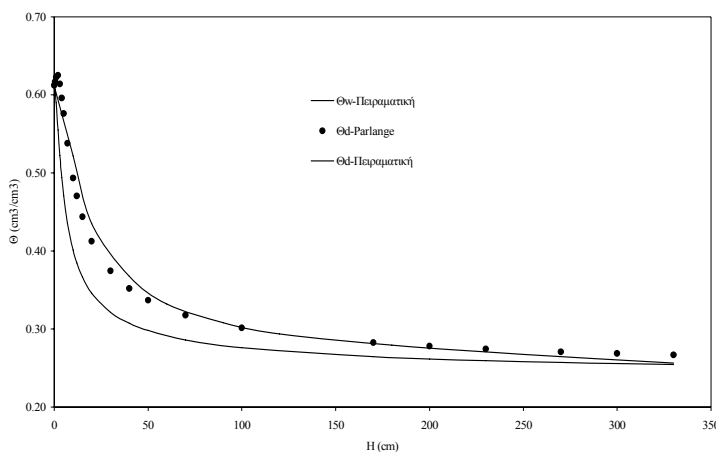
ΠΙΝΑΚΑΣ 1

	1	2	3	4
Θ_s	0,612	0,585	0,397	0,311
Θ_r	0,236	0,13	0,339	0,084
a	0,337	0,123	0,116	0,04275
n	1,637	1,579	1,449	5,726
m	0,389	0,366	0,309	0,825
R^2	0,998	0,991	0,996	0,999

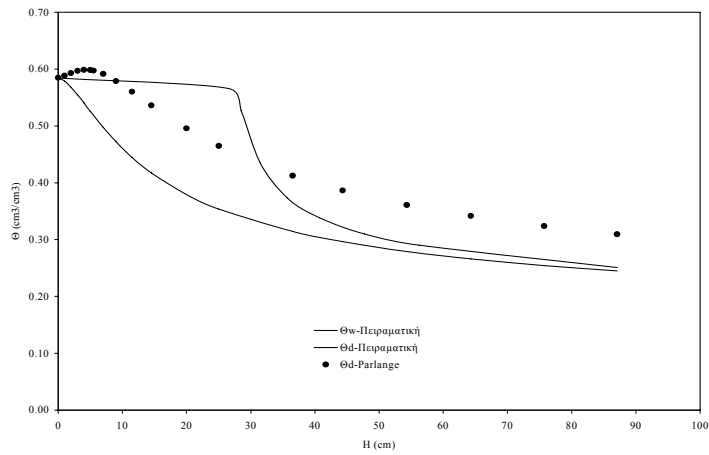
Στο πίνακα 1 παρουσιάζονται οι τιμές των διαφόρων παραμέτρων της εξίσωσης van Genuchten που υπολογίστηκαν από την προσαρμογή των πειραματικών δεδομένων του οριακού κλάδου διαβροχής. Αυτό έγινε για να αποφευχθούν λάθη στον υπολογισμό των κλίσεων στην εύρεση της οριακής καμπύλης στράγγισης από τα δεδομένα της οριακής καμπύλης διαβροχής.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

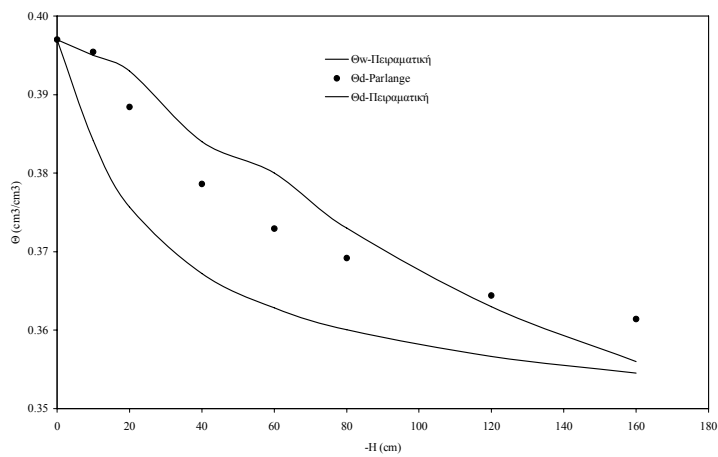
Στα σχήματα 2,3,4 και 5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που έδωσε το εξεταζόμενο μοντέλο για τις οριακές καμπύλες διαβροχής όταν είναι γνωστές οι οριακές καμπύλες στράγγισης.



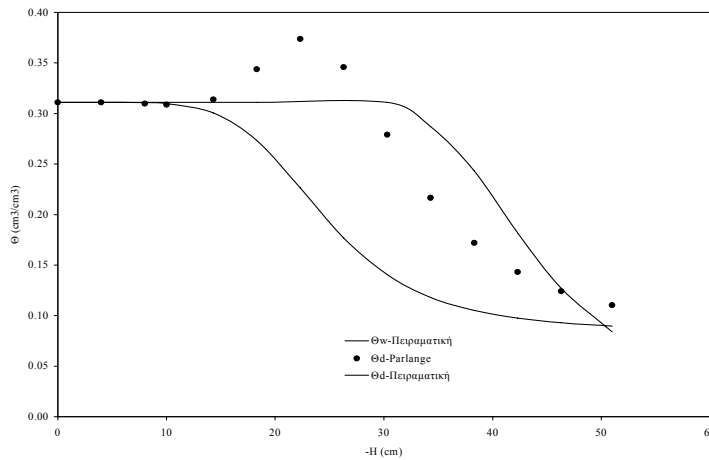
Σχ.2. Σύγκριση μεταξύ μετρούμενης και υπολογιζόμενης οριακής καμπύλης στράγγισης από τα δεδομένα της οριακής καμπύλης διαβροχής για το σώμα 1.



Σχ.3. Σύγκριση μεταξύ μετρούμενης και υπολογιζόμενης οριακής καμπύλης στράγγισης από τα δεδομένα της οριακής καμπύλης διαβροχής για το σώμα 2.



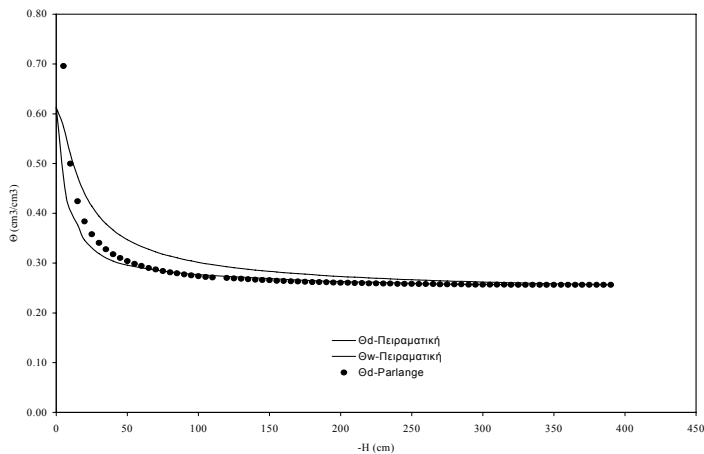
Σχ.4. Σύγκριση μεταξύ μετρούμενης και υπολογιζόμενης οριακής καμπύλης στράγγισης από τα δεδομένα της οριακής καμπύλης διαβροχής για το σώμα 3.



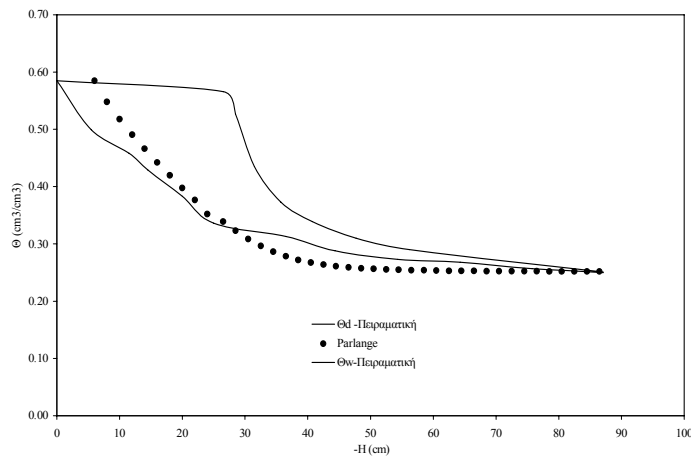
Σχ.5. Σύγκριση μεταξύ μετρούμενης και υπολογιζόμενης οριακής καμπύλης στράγγισης από τα δεδομένα της οριακής καμπύλης διαβροχής για το σώμα 4.

Από τα παραπάνω φαίνεται ότι το μοντέλο προβλέπει σχετικά καλά την οριακή καμπύλη στράγγισης στο σώμα 1 και κάπως αποδεκτά στο σώμα 3. Στα σώματα 2 και 4 αποτυγχάνει πλήρως. Από τις συγκρίσεις επιβεβαιώνονται οι παρατηρήσεις που έγιναν στο θεωρητικό μέρος για τις αδυναμίες του μοντέλου. Στα σώματα 2 και 4 επειδή οι καμπύλες διαβροχής έχουν σχήμα S θα υπάρχει ένα μέρος της περιοχής του φορτίου πίεσης όπου η f είναι αρνητική. Έτσι δικαιολογείται η μορφή της υπολογισμένης οριακής καμπύλης στράγγισης όπου προβλέπονται τιμές μεγαλύτερες και από την υγρασία κορεσμού.

Στα σχήματα 6,7,8 και 9 παρουσιάζονται οι υπολογισμένες οριακές καμπύλες διαβροχής από τα δεδομένα των οριακών καμπύλων στράγγισης.

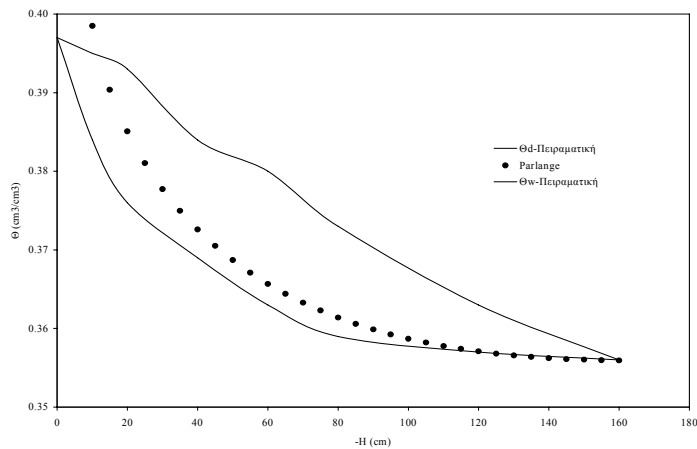


Σχ.6. Σύγκριση μεταξύ μετρούμενης και υπολογιζόμενης οριακής καμπύλης διαβροχής από τα δεδομένα της οριακής καμπύλης στράγγισης για το σώμα 1.

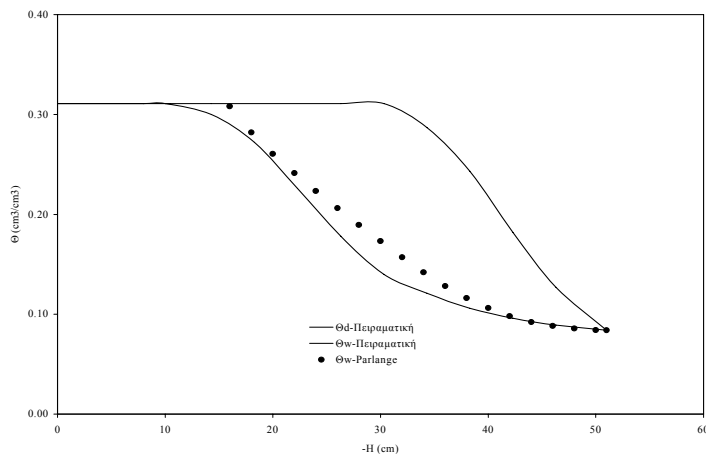


Σχ.7. Σύγκριση μεταξύ μετρούμενης και υπολογιζόμενης οριακής καμπύλης διαβροχής από τα δεδομένα της οριακής καμπύλης στράγγισης για το σώμα 2.

Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι σ' όλες τις περιπτώσεις το μοντέλο Parlange δίνει οριακή καμπύλη διαβροχής χωρίς σημείο καμψής και ότι ο βρόχος υστέρησης που προκύπτει είναι γενικά μικρότερος από τον πειραματικό. Επίσης οι προβλέψεις των καμπύλων διαβροχής είναι αρκετά καλύτερες σε σχέση με την πρόβλεψη των οριακών καμπύλων στράγγισης. Οι εμφανιζόμενες αποκλίσεις εντοπίζονται βασικά κοντά στην περιοχή του κορεσμού ενώ σε σχετικά μεγάλες τιμές του φορτίου πίεσης υπάρχει σχεδόν ταύτιση πειραματικών και υπολογισμένων τιμών.



Σχ.8. Σύγκριση μεταξύ μετρούμενης και υπολογιζόμενης οριακής καμπύλης διαβροχής από τα δεδομένα της οριακής καμπύλης στράγγισης για το σώμα 3.



Σχ.9. Σύγκριση μεταξύ μετρούμενης και υπολογιζόμενης οριακής καμπύλης διαβροχής από τα δεδομένα της οριακής καμπύλης στράγγισης για το σώμα 9.

Το γεγονός αυτό είναι αρκετά ενθαρρυντικό διότι στις περισσότερες περιπτώσεις πειραματικά προσδιορισμένη είναι η οριακή καμπύλη στράγγισης. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι το μοντέλο Parlange μπορεί να αποτελέσει χρήσιμο εργαλείο στην περίπτωση που δεν υπάρχουν επαρκή πειραματικά δεδομένα. Βέβαια για πιο ασφαλή συμπεράσματα χρειάζεται εξέτασή του σε περισσότερα πορώδη μέσα. Για να εκτιμηθεί η βαρύτητα των αποκλίσεων σκόπιμο θεωρείται να γίνει αριθμητική επίλυση της εξίσωσης Richards π.χ στην περίπτωση της κατάκλυσης ώστε να γίνουν οι απαραίτητες συγκρίσεις. Το ζήτημα αυτό βέβαια μπορεί να αποτελέσει αντικείμενο μελλοντικής εργασίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

24. Braddock R.D., et al. 2000. Application of a soil water hysteresis model to simple retention curves, *Transport in porous media* 44: 407-420.
25. Brooks R.H and Corey, A.J., 1964. Hydraulic properties of porous media. *Hydrol. Pap. 3*, Colo. State univ., Fort collins, Colo.
26. Hoa, N. T., et. al. 1977. Influence of hysteresis effects on transient flows in saturated-unsaturated porous media, *Water. Res. Research.*, 13: 992-996.
27. Hogarth W. L., et al. 1988. Application of a simple soil-water hysteresis model, *Journal of Hydrology*, 98:21-29.
28. Κάργας Γ., 2002 Η επίδραση της υστέρησης στην κατανομή των υγρών μέσα σε πορώδη μέσα, Διδακτορική διατριβή, Γ.Π.Α
29. Nielsen, D.R et al., 1986. Water flow and solute transport processes in the unsaturated zone, *Water. Res. Research*, 22: 89-108.
30. Mualem, Y. 1973. Modified approach to capillary hysteresis based on a similarity hypothesis, *Water Resour. Res.*, 9 : 1324-1331.
31. Mualem, Y. 1974. A conceptual model of hysteresis, *Water Resour. Res.*, 10: 514-520.

32. Mualem, Y., and G. Dagan. 1975. A dependent domain model of capillary hysteresis, *Water Resour. Res.*, 11 : 452-460.
33. Mualem, Y., 1977. Extension of the similarity hypothesis used for modelling the soil water characteristics, *Water Resour. Res.*, 13: 773-780.
34. Mualem, Y and Morel-Seytoux H. J. 1978. Analysis of a capillary hysteresis model based on a one variable distribution function, *Water Resour. Res.*, 14:605-610.
35. Mualem, Y., and Miller, E.E. 1979. A hysteresis model based on an explicit domain-dependence function, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 43: 1067-1073.
36. Mualem, Y. 1984. A modified dependent-domain theory of hysteresis. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 137: 283-291.
37. Parker, J. C., and R. J. Lenhard, 1987. A model of hysteresis constitutive relations governing multiphase flow. 1. Saturation-pressure relations, *Water Res. Research.*, 23:2187-2196.
38. Parlange J.Y., 1976. Capillary hysteresis and relationship between drying and wetting curves, *Water Res. Research*, 12:224-228.
39. Parlange J.Y., 1980. Water transport in soils, *Ann. Rev. Fluid Mec.* 12:77-102
40. Philip, J.R. 1964. Similarity hypothesis for capillary hysteresis in porous materials, *J. Geophys. Res.*, 69: 1553-1562.
41. Poulouvalis, A. 1962. Hysteresis of pore water, an application of concept of independent domains, *Soil Sci.*, 93: 405-412.
42. Poulouvalis, A., and Childs, E.E. 1971. The hysteresis of pore water: The non-independence of domains, *Soil Sci.*, 112: 301-312.
43. Poulouvalis, A and G. Kargas, 2000. A Note on calculating hysteretic behaviour, *Soil. Sci. Soc. Am. J.*, 64: 1947-1950.
44. Russo, D. W et al. 1989. Numerical analysis of solute transport during transient irrigation: 1. Effect of hysteresis and profile heterogeneity, *Water. Res. Research.*, 25:2109-2118.
45. Si, B. C. and Kachanoski R.G., 2000. Unified solution for infiltration and drainage with hysteresis: Theory and field test. *SSSAJ* 64: 30-36.
46. Scott, P. S., et. al. 1983. Hysteresis effect on net infiltration , *Advances in infiltration*, *Am. Soc. Agric. Eng., Publ.* 11-83, 163-170.
47. van Genuchten, M. Th., 1980. A closed form equation for the predicting the hydraulic conductivities of unsaturated soils, *SSSAJ* 44:892-898