



Ε.Γ.Μ.Ε.

Εταιρία Γεωργικών Μηχανικών Ελλάδος

ΠΡΑΚΤΙΚΑ
5ου ΕΘΝΙΚΟΥ ΣΥΝΕΔΡΙΟΥ
ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

Συνεδριακό κέντρο ΤΕΙ Λάρισας
18-20 Οκτωβρίου 2007

ΠΡΑΚΤΙΚΑ

5^ο ΕΘΝΙΚΟΥ ΣΥΝΕΔΡΙΟΥ ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ
ΕΤΑΙΡΕΙΑ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΛΛΑΔΟΣ (ΕΓΜΕ)
Βόλος, 10 Οκτωβρίου 2007.

Επιμέλεια πρακτικών: Νικόλαος Κατσούλας,
Γ. Γραμματέας ΕΓΜΕ
Λέκτορας Πανεπιστημίου Θεσσαλίας
τηλ. 2421093249, e-mail: nkatsoul@uth.gr

Επιμέλεια εξώφυλλου πρακτικών και αφίσας συνεδρίου:
Δρ. Χρήστος Καβαλάρης,
ΙΔΑΧ Πανεπιστημίου Θεσσαλίας

**ΕΤΑΙΡΕΙΑ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΛΛΑΔΟΣ (ΕΓΜΕ)
HELLENIC SOCIETY OF AGRICULTURAL
ENGINEERS (HelAgEng)**

**ΠΡΑΚΤΙΚΑ
5^ο ΕΘΝΙΚΟΥ ΣΥΝΕΔΡΙΟΥ ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ
ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ**

*«Η συμβολή των Γεωργικών Μηχανικών σε μια
ανταγωνιστική γεωργία»*

Λάρισα, 18-20 Οκτωβρίου 2007

Υπό την Αιγίδα του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας
Συνδιοργάνωση: ΤΕΙ Λάρισας

5^ο Εθνικό Συνέδριο Γεωργικής Μηχανικής

Οργανωτική Επιτροπή

Πρόεδρος:

Γέμτος Θ. Α., Καθηγητής Π.Θ.

Αντωνόπουλος Β., Καθηγητής Α.Π.Θ.

Σακελλαρίου Μακραντωνάκη Μ., Καθηγήτρια Π.Θ.

Κίττας Κ., Καθηγητής Π.Θ

Κατσούλας Ν., Λέκτορας Π.Θ

Φουντάς Σ., Δρ. Π.Θ.

Καβαλάρης Χ., Δρ. Π.Θ.

Καραμούτης Χ., Δρ. Π.Θ.

Λέλλης Θ., Αν. Καθηγητής, ΤΕΙ Λάρισας

Ντιούδης Π., Αν. Καθηγητής, ΤΕΙ Λάρισας

Πατέρας Δ., Αν. Καθηγητής, ΤΕΙ Λάρισας

Γράβαλος Ι., Επ. Καθηγητής, ΤΕΙ Λάρισας

Γιαλαμάς Θ., Καθ. Εφαρμογών, ΤΕΙ Λάρισας

Τούλιος Λ., Ερευνητής, ΙΧΤΕΛ ΕΘΙΑΓΕ

Καλφούντζος Δ., Ερευνητής, ΙΧΤΕΛ ΕΘΙΑΓΕ

Επιστημονική Επιτροπή

Πρόεδρος:

Αντωνόπουλος Β., Καθηγητής Α.Π.Θ.

Αναστασιάδου-Παρθενίου Ε., Καθηγήτρια Α.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.

Βουγιούκας Στ., Επικ. Καθηγητής ΑΠΘ

Γέμτος Θ., Καθηγητής Π.Θ.

Γεωργακάκης Δ., Καθηγητής Γ.Π.Α.

Γιαννόπουλος Στ., Καθηγητής Α.Π.Θ.

Δημήρκου Ανθ., Αν. Καθηγήτρια Π.Θ.

Ζήσης Θ., Καθηγητής Α.Π.Θ.

Καλφούτζος Δ., ΙΧΤΕΛ ΕΘΙΑΓΕ

Καραντούνιας Γ., Καθηγητής Γ.Π.Α.

Κατσούλας Ν., Λέκτορας Π.Θ.

Κερκίδης Π., Καθηγητής Α.Π.Θ.

Κίττας Κ., Καθηγητής Π.Θ.

Κυρίτσης Σ., Ομ. Καθηγητής Γ.Π.Α.

Λιακατάς Α., Καθηγητής Γ.Π.Α.

Μαρτζόπουλος Γ., Καθηγητής Α.Π.Θ.

Μισοπολινός Ν., Καθηγητής Α.Π.Θ.

Μπαμπατζιμόπουλος Χ., Καθηγητής Α.Π.Θ.
Μπαρτζάνας Θ., Δρ. Π.Θ.
Μπριασούλης Δ., Καθηγητής Γ.Π.Α.
Νικήτα-Μαρτζοπούλου Χ., Καθηγήτρια Α.Π.Θ.
Παναγάκης Π., Επ. Καθηγητής Γ.Π.Α.
Παναγιωτόπουλος Κ., Καθηγητής Α.Π.Θ.
Πανώρας Α., Ερευνητής Ι.Ε.Β. ΕΘΙΑΓΕ
Παπαδάκης Γ., Αν. Καθηγητής Γ.Π.Α.
Παπαμιχαήλ Δ., Καθηγητής Α.Π.Θ.
Παρισόπουλος Γ., Δ/ντης Ι.ΓΕ.Μ.Κ., ΕΘ.Ι.ΑΓ.Ε.
Πατέρας Δ., Αν. Καθηγητής ΤΕΙ Λάρισας
Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη Μ., Καθηγήτρια Π.Θ.
Συγριμής Ν., Καθηγητής Γ.Π.Α.
Συλλαίος Ν., Καθηγητής Α.Π.Θ.
Τζιμόπουλος Χ., Καθηγητής Α.Π.Θ.
Τούλιος Λ., ΙΧΤΕΛ ΕΘΙΑΓΕ
Τσατσαρέλης Κ., Καθηγητής Α.Π.Θ.
Φουντάς Σ., Δρ. Π.Θ.
Χουλιάρης Ν., Καθηγητής ΤΕΙ Λάρισας

Κατάλογος αξιολογητών των εργασιών

Αλεξανδρίδης Θ.	Μιμίδης Θ.
Αλεξίου Ι.	Μπαμπατζιμόπουλος Χ
Αντωνόπουλος Β.	Μπαρμπαγιάννης Ν.
Αργυροκαστρίτης Ι.	Μπαρτζάνας Θ.
Βουγιούκας Στ.	Μυγδάκος Ε.
Γέμτος Θ.	Μυστριώτης Α.
Γεωργίου Π.	Νάνος Γ.
Γιαννόπουλος Στ.	Παναγόπουλος Α.
Δομενικιώτης Ι.	Πανώρας Α.
Ελμαλόγλου Σ.	Παπαδάκης Γ.
Θεοχάρης Μ.	Παπαμιχαήλ Δ.
Καλφούντζος Δ.	Πατέρας Δ.
Καραθάνος Β.	Παυλάτου-Βε Α.
Καραμούζης Δ.	Προδρόμου Κ.
Καρυδάς Χ.	Σακελλαρίου - Μακραντωνάκη Μ.
Κατσούλας Ν.	Σταυρινός Ε.
Κερκίδης Π.	Συλλαίος Ν.
Κιοσέ-Καμπασακάλη Ε.	Τούλιος Λ.
Κίττας Κ.	Τσατσαρέλης Κ.
Κόκκορας Ι.	Τσιούρης Σ
Κωτσόπουλος Σπ.	Φουντάς Σπ.
Λουκάς Α.	Χαλκίδης Η.
Μαρτζοπούλου Χρ.	Ψιλοβίκος Α.
Ματσή Θεοδώρα	

5^ο Εθνικό Συνέδριο Γεωργικής Μηχανικής

Χορηγοί του συνεδρίου

- Υπουργείο Εθνικής Παιδείας και Θρησκευμάτων
- Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
- ΠΛΑΣΤΙΚΑ ΚΡΗΤΗΣ Α.Ε.
- Κ/Ε ΒΕΡΜΙΟΝ ΑΤΕΕ – ΧΑΥΔΑΣ - ΩΡΟΛΟΓΟΠΟΥΛΟΣ ΑΤΕ,
Ρουπακιάς Ι.
- SCIENTACT Α.Ε.
- ΚΑΜΕΛΙΔΗΣ Α.Τ.Ε.
- ΚΑΡΑΤΖΟΥΝΗΣ ΑΤΕΒΕ
- ΑΓΡΕΚ Κ. ΣΑΜΑΝΤΟΥΡΟΣ Α.Ε.
- AGROMA, Σ. Πέtkος & ΣΙΑ Ο.Ε.
- Κέντρο Έρευνας Τεχνολογίας και Ανάπτυξης Θεσσαλίας (Κ.Ε.ΤΕ.Α.Θ.)
- TERRA Α.Ε.
- Ι. Εσκιάδης και ΣΙΑ Α.Ε.Β.Ε.
- Ένωση Κατασκευαστών Γεωργικών Μηχανημάτων Ελλάδος
(Ε.ΚΑ.ΓΕ.Μ.)
- Δαλακούρας Γ., Πολιτικός Μηχανικός
- Κούτη Ευτυχία – Κηποτεχνικά.

Υπό την αιγίδα του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας και του ΤΕΙ Λάρισας

Χορηγοί:



<http://lacec.agr.uth.gr/egme2007.htm>

Πρόλογος

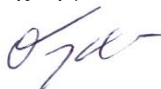
Το 5^ο Εθνικό Συνέδριο της Εταιρείας Γεωργικών Μηχανικών Ελλάδας (ΕΓΜΕ) οργανώνεται στο ΤΕΙ Λάρισας με συνδιοργανωτές το Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας και το ΤΕΙ Λάρισας. Πολλές συζητήσεις έγιναν για την αναγκαιότητα του συνεδρίου καθώς στους επόμενους οκτώ μήνες θα διεξαχθεί το Ευρωπαϊκό συνέδριο της Ευρωπαϊκής Εταιρείας Γεωργικών Μηχανικών (Ιούνιος 2008 στην Κρήτη), την οργάνωση του οποίου έχει αναλάβει η ΕΓΜΕ. Επικράτησε όμως η άποψη ότι το Εθνικό συνέδριο έχει διαφορετικούς και αυτοτελείς σκοπούς, όπως τη γνωριμία των νέων Ελλήνων ερευνητών που θα τους δοθεί ένα φιλικό βήμα να παρουσιάσουν τις εργασίες, τη γνωριμία των ερευνητικών ομάδων και του έργου τους, στοιχεία ιδιαίτερα σημαντικά για των επίτευξη των στόχων της Εταιρείας.

Το φετινό συνέδριο πραγματοποιείται μετά από μια ιδιαίτερα ξηρή χρονιά και ένα ιδιαίτερα θερμό καλοκαίρι που προκάλεσε σημαντικές ζημιές στις γεωργικές καλλιέργειες αλλά και στα δασικά οικοσυστήματα πολλών περιοχών της χώρας. Οι κλιματικές αλλαγές κάνουν έντονη την παρουσία τους και στη χώρα μας. Η εταιρεία μας έχει να παίξει σημαντικό ρόλο στην προσπάθεια της άμβλυνσης των αρνητικών τους επιπτώσεων. Η διαχείριση των υδάτινων και εδαφικών πόρων αποκτούν ιδιαίτερη σημασία και πολλές από τις εργασίες του συνεδρίου δίνουν νέες ιδέες και λύσεις. Η εκμηχάνιση της γεωργίας συμβάλλει στη διατήρηση μιας οικονομικά βιώσιμης γεωργίας στη χώρα μας. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας συμβάλλουν στη μείωση της κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων, που τόσο ρυπαίνουν την ατμόσφαιρα και αυξάνουν το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Σημαντική συμβολή στη βελτίωση της ανταγωνιστικότητας της γεωργίας της χώρας, στη μείωση των αρνητικών επιπτώσεων στο περιβάλλον και στην καλύτερη αξιοποίηση των φυσικών πόρων προσφέρουν οι εφαρμογές των νέων τεχνολογιών στη γεωργία, η τεχνολογία των καλλιεργειών υπό κάλυψη και η συντήρηση και μεταποίηση των προϊόντων. Θεωρούμε ότι το 5^ο Συνέδριο θα συμβάλλει ουσιαστικά στην προώθηση κατάλληλων λύσεων στα παραπάνω θέματα.

Στο συνέδριο υπεβλήθησαν 137 περιλήψεις και τελικά έγιναν δεκτές 110 πλήρεις εργασίες που θα παρουσιαστούν προφορικά στις τρεις παράλληλες συνεδριάσεις του συνεδρίου. Πιστεύω ότι το συνέδριο θα ακολουθήσει την επιτυχία των προηγούμενων.

Με την ευκαιρία αυτή θέλω να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στους αξιολογητές των εργασιών που υπεβλήθησαν και στους συντελεστές της οργάνωσης αυτού του συνεδρίου. Ο Λέκτορας του Π.Θ. κ. Ν. Κατσούλας και ο Δρ. κ. Σπ. Φουντάς διακαίονται τις περισσότερες, καθώς χάρη στην εργασία τους έγινε δυνατή η καλή οργάνωση του συνεδρίου. Ο Αν. Καθηγητής κ. Θ. Λέλλης και η ομάδα του ΤΕΙ Λάρισας είχαν σημαντική συμβολή. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους χορηγούς του συνεδρίου.

Ν. Ιωνία, 10 Οκτωβρίου 2007
Ο πρόεδρος της Οργανωτικής Επιτροπής



Καθηγητής Θ.Α. Γέμτος

Περιεχόμενα

ΕΝΟΤΗΤΑ 1: ΓΕΩΡΓΙΚΑ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΑ – ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΙ19

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΡΙΕΤΟΥΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ ΒΙΟΛΟΓΙΚΟΥ ΚΑΙ ΣΥΜΒΑΤΙΚΟΥ ΒΑΜΒΑΚΙΟΥ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ: ΝΕΟΤΕΡΑ ΟΙΚΟΝΟΜΟΤΕΧΝΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	21
Μυγδάκος Ε., Πατσιαλή Σ., Αυγουλάς Χ., Μυγδάκος Γ. ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΑΠΟΔΟΣΗ ΚΑΙ ΤΟ ΚΟΣΤΟΣ ΣΥΓΚΟΜΙΔΗΣ ΜΙΑΣ ΒΑΜΒΑΚΟΣΥΛΛΕΚΤΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ	31
Ε. Γρ. Μυγδάκος ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΜΕΤΡΗΤΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ.....	44
Ι. Γράβαλος, Θ. Γιαλαμάς, Ζ. Κουτσοφίτης, Α. Αυγουστής, Δ. Κατέρης, Π. Ξυραδάκης, Ζ. Τσιρόπουλος	44
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΕΛΚΥΣΤΗΡΩΝ ΣΕ ΔΑΣΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ	52
Ε. Λάμπου, Κ. Ζάννης και Ε. Καραγιάννης ΣΥΓΧΡΟΝΑ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΑ ΙΣΟΠΕΔΩΣΗΣ ΣΕ ΑΓΡΟΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ	58
Κ. Ζάννης, Δ. Μπόχτης, Ε. Λάμπου και Αθ. Καραγιάννης ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΑΝΑΠΤΥΣΣΟΜΕΝΗΣ ΕΛΞΗΣ ΚΑΙ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ ΜΕ ΟΜΟΙΩΜΑ ΤΡΟΧΟΦΟΡΟΥ ΕΛΚΥΣΤΗΡΑ	65
Θ.Α. Γιαλαμάς, Ι. Γράβαλος, Α. Ανδρέου, Σ. Τσάντζος, Δ. Κατέρης, Κ.Α. Τσατσαρέλης, Θ. Α. Γέμτος ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΥΔΡΑΥΛΙΚΟΥ ΑΝΕΛΚΥΣΤΗΡΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΑΓΡΟΤΙΚΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ	73
Θ. Α. Γιαλαμάς, Ε. Παπαχρήστου, Ι. Γράβαλος, Δ. Κατέρης, Χ. Δημητριάδης, Κ.Α. Τσατσαρέλης ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΔΟΝΗΣΕΩΝ ΣΤΟ ΘΑΛΑΜΟ ΧΕΙΡΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΕΛΚΥΣΤΗΡΩΝ	80
Θ.Α. Γιαλαμάς, Ι. Γράβαλος, Δ. Κατέρης, Π. Ξυραδάκης, Κ.Α.Τσατσαρέλης, Θ.Α. Γέμτος ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΓΩΝΙΩΝ ΕΥΣΤΑΘΙΑΣ ΓΙΑ ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΚΙΝΗΣΗ ΣΕ ΚΕΚΛΙΜΕΝΟ ΕΠΙΠΕΔΟ	87
Θ.Α. Γιαλαμάς, Δ. Κατέρης, Ι. Γράβαλος, Π. Ξυραδάκης, Κ.Α. Τσατσαρέλης ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ, ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΟΣ ΣΥΓΚΟΜΙΔΗΣ ΤΟΥ ΑΝΘΟΥΣ ΤΗΣ ΛΕΒΑΝΤΑΣ.....	95
Χ. Ι. Δημητριάδης, J. L. Brighton, Ι. Κόκκορας, Ι. Γράβαλος, Θ.Α. Γιαλαμάς ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΩΝ ΚΟΠΗΣ ΠΕΡΙΠΟΙΗΣΗΣ ΚΑΙ ΔΕΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΧΟΡΤΟΥ	103
Χ.Κ. Κοτσακιώτη, Δ.Δ. Μπόχτης, Ι.Α. Σπανομήτρος, Ι.Γ. Αμπατζίδης και Κ.Α. Τσατσαρέλης ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΩΝ ΚΥΡΙΑΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ..	111
Α.Γ. Ντιρογιάννης, Ι.Γ. Αμπατζίδης, Δ.Δ. Μπόχτης, Ι.Α. Σπανομήτρος και Κ.Α. Τσατσαρέλης ΘΟΡΥΒΟΣ ΚΑΙ ΚΡΑΔΑΣΜΟΙ ΚΑΤΑ ΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΕΛΚΥΣΤΗΡΩΝ ΣΤΟ ΧΩΡΑΦΙ.....	119
Θ.Α. Γέμτος, Σπ. Φουντάς, Χρ. Παπανικολάου, Ν. Νάνμος, Β. Βλάχος ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ, ΤΑ ΦΥΤΑ ΚΑΙ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ	127
Καβαλάρης Χρ., Καραμούτης Χρ., Κ. Αγγελοπούλου, Θ.Α. Γέμτος ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΔΟΚΙΜΗ ΕΝΟΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΑ ΙΣΧΥΟΔΟΤΟΥΜΕΝΟΥ ΔΙΕΙΣΔΥΣΙΟΜΕΤΡΟΥ.....	135

Χ. Καραμούτης, Χ. Καβαλάρης, Δ. Παράφορος, Ο. Παπαδοπούλου, Κ. Κολιπέτσας και Θ.Α. Γέμτος	
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΝΟΣ ΝΕΟΥ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΑΤΑΠΟΛΕΜΗΣΗ ΤΩΝ ΖΙΖΑΝΙΩΝ ΣΤΗ ΓΡΑΜΜΗ ΣΠΟΡΑΣ	143
Α. Π. Δεδούσης, R. J. Godwin	
Η ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΤΩΝ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΕΛΚΥΣΤΗΡΩΝ ΚΑΙ Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΣΤΗΝ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΩΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ.....	152
Α. Νάτσης, Θ. Γέμτος, Ε. Μυγδάκος, Η. Νάτσης	
ΕΝΟΤΗΤΑ 2: ΥΔΑΤΙΚΟΙ ΠΟΡΟΙ	163
ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΘΗΤΑ PROBE ML2 ΣΕ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΑΝΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ.....	165
Γ. Κάργας, Α. Σγουμποπούλου, Β. Φασούλη και Π. Κερκίδης	
ΥΠΟΓΕΙΑ ΑΡΔΕΥΣΗ ΣΕ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΒΑΜΒΑΚΙΟΥ ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΔΟΣΕΙΣ ΑΡΔΕΥΣΗΣ.....	173
Μ. Σακελλαρίου – Μακραντωνάκη, Χ. Παπανικολάου και Σ. Πατελοδήμου	
ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΣΤΑΓΔΗΝ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΣΕ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΖΑΧΑΡΟΤΕΥΤΛΩΝ.....	181
Μ. Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, Κ. Α. Δημοπούλου, Θ. Βούλγαρης	
ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΚΟΠΤΟΜΕΝΗΣ ΣΤΑΓΔΗΝ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΣΤΗΝ ΠΡΟΩΘΗΣΗ ΤΟΥ ΜΕΤΩΠΟΥ ΔΙΑΒΡΟΧΗΣ ΚΑΙ ΣΤΙΣ ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΝΕΡΟΥ ΛΟΓΩ ΒΑΘΙΑΣ ΔΙΗΘΗΣΗΣ	189
Ε. Διαμαντόπουλος, Σ. Ελμαλόγλου	
ΑΠΛΕΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΤΙΚΕΣ ΛΥΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΔΙΗΘΗΣΗ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΕ ΑΚΟΡΕΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ.....	196
Α. Λουκάς	
ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΡΔΕΥΤΙΚΟΥ ΝΕΡΟΥ ΜΕ ΤΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΧΕΣΕΩΝ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ – ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΝΕΡΟΥ	205
Π.Ε. Γεωργίου και Δ.Μ. Παπαμιχαήλ	
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΔΙΑΚΟΠΤΟΜΕΝΗΣ ΠΑΡΟΧΗΣ ΝΕΡΟΥ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΤΑΓΔΗΝ ΑΡΔΕΥΣΗΣ.....	213
Π. Βύρλας και Μ. Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη	
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΑΖΩΤΟΥ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ ΑΓΡΟΥ ΚΑΛΛΙΕΡΓΟΥΜΕΝΟΥ ΜΕ ΚΑΛΑΜΠΟΚΙ ΕΝΣΙΡΩΣΗΣ.....	221
Β. Αντωνόπουλος, Ε. Λεκάκης και Α. Παυλάτου-Βε	
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΑΖΩΤΟΥ ΣΕ ΟΡΥΖΩΝΑ ΜΕ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ GLEAMS	229
Β.Ζ. Αντωνόπουλος, Β.Γ. Ασχονίτης, Μ.Η. Rahil, Ε.Η. Λεκάκης	
ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΡΔΕΥΟΜΕΝΗΣ ΓΕΩΡΓΙΑΣ ΣΤΗΝ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΤΩΝ ΣΤΡΑΤΙΣΤΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ	237
Β. Αντωνόπουλος, Β. Λίτσкас, Β. Ασχονίτης και Σ. Τσιούρης	
ΜΟΝΙΜΗ ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ ΡΟΗ ΣΕ ΑΝΟΙΚΤΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ ΤΡΑΠΕΖΟΕΙΔΟΥΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ.....	245
Μ. Θεοχάρης	
ΜΟΝΙΜΗ ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ ΡΟΗ ΣΕ ΑΝΟΙΚΤΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ.....	253
Μ. Θεοχάρης	
ΤΕΧΝΗΤΗ ΕΠΑΝΑΠΛΗΡΩΣΗ ΦΡΕΑΤΙΚΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ ΜΕ ΦΡΕΑΤΙΑ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΠΑΡΟΧΗΣ	262
Δ.Ν. Καραμούζης και Π.Ε. Γεωργίου	

ΣΧΕΔΙΟ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΗΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΥΔΡΟΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ Ν. ΚΑΛΥΜΝΟΥ	270
Δ. Κ. Καρπούζος	
Η ΚΟΣΤΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΑΡΔΕΥΤΙΚΟΥ ΝΕΡΟΥ ΩΣ ΜΕΤΡΟ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ	
ΟΔΗΓΙΑΣ 2000/60/ΕΕ ΚΑΙ ΤΗΣ ΚΟΙΝΗΣ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΠΟΛΙΤΙΚΗΣ	280
Ε. Σταυρινός	
ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΑΡΔΕΥΣΗΣ, ΣΤΡΕΣ ΦΥΤΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΘΕΣΙΜΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ	
ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΜΕΝΗΣ ΜΕ GIS ΣΤΗΝ ΑΠΟΔΟΣΗ ΑΡΑΒΟΣΙΤΟΥ	288
Αγ. Φιλίντας, Π. Ντιούδης, Θ. Λέλλης, Αρ. Παπαδόπουλος και Ι. Χατζόπουλος	
ΝΕΟΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΤΗΣ	
ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ	296
Β. Άμπας, Ε. Μπαλτάς και Δ. Παπαμιχαήλ	
ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΥΠΟΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΚΑΙ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΣΤΑΓΔΗΝ	
ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΣΕ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΚΑΛΑΜΠΟΚΙΟΥ	304
Δ. Καλφούντζος, Ι. Αλεξίου, Σ. Κωτσόπουλος	
ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΣΤΟΝ ΧΕΙΜΑΡΡΟ	
ΛΥΚΟΡΡΕΜΑ ΤΟΥ ΟΡΟΥΣ ΠΕΝΤΕΛΗΣ	312
Κ. Σούλης, Ν. Δέρκας, Ι. Δ. Βαλιάντζας	
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ ΤΟΥ Τ.Ο.Ε.Β. ΠΗΝΕΙΟΥ ΣΤΗΝ	
ΚΑΛΥΨΗ ΑΡΔΕΥΤΙΚΩΝ ΑΝΑΓΚΩΝ	320
Σ. Κωτσόπουλος, Ι. Αλεξίου, Φ. Λόκκας, Γ. Γραβάνης και Σ. Μαγαλιός	
ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΟΥ ΑΡΔΕΥΤΙΚΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΤΟ	
ΠΛΑΙΣΙΟ ΤΗΣ ΟΔΗΓΙΑΣ 2000/60	328
Ν. Δέρκας, Π. Λόντρα και Α. Καραμάνος	
ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ	
ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΛΑΜΠΟΚΙΟΥ ΜΕ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ WAVE	337
Ι. Αλεξίου, Δ. Παπαμιχαήλ και Β. Αντωνόπουλος	
PLEIADES –ΒΟΗΘΗΤΙΚΑ ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΓΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΝΕΡΟΥ ΣΤΗ ΓΕΩΡΓΙΑ ΚΑΙ	
ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΑΠΟΦΑΣΗΣ	345
Α. Μπλάντα, Χ. Δομενικιώτης και Ν. Δαλέζιος	
ΑΔΡΟΜΕΡΗΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΤΗΣ ΞΗΡΑΣΙΑΣ ΣΤΗ ΓΕΩΡΓΙΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ	
ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΞΗΡΑΣΙΑΣ RDI	353
Γ. Τσακίρης, Δ. Τίγκας	
ΕΝΟΤΗΤΑ 3: ΑΓΡΟΤΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ	362
ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΜΗΣΗΣ ΦΩΤΟΔΙΑΣΠΩΜΕΝΩΝ ΦΥΛΛΩΝ ΕΔΑΦΟΚΑΛΥΨΗΣ...	364
Ι. Κυρίκου, Δ. Μπριασούλης και Μ. Χισκάκης	
ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑ ΜΕ ΗΛΙΑΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ	
ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΟ ΜΕ ΥΔΡΟΡΡΟΗ ΥΔΡΟΠΟΝΙΑΣ ..	372
Γ. Ντίνας, Π. Κούγιας, Χ. Νικήτα- Μαρτζοπούλου	
ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΣΤΟΝ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟ ΤΩΝ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΩΝ ΜΕ CO ₂	
ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΑΝΟΙΞΙΑΤΙΚΗ ΚΑΛΛΙΕΡΓΗΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟ	380
Δ. Βαφειάδης, Μ. Μπότας, Χ. Παπαμάνθος και Χ. Νικήτα- Μαρτζοπούλου	
Η ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΑΝΤΛΙΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗ ΜΕΙΩΣΗ ΤΗΣ ΣΧΕΤΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ	
ΣΤΟ ΧΩΡΟ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ	387
Ι. Λυκοσκούφης, Γ. Μαυρογιαννόπουλος	
ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΑΝΕΜΟΥ ΓΥΡΩ ΑΠΟ	
ΥΠΕΡΥΨΩΜΕΝΟ ΠΕΡΑΤΟ ΠΕΤΑΣΜΑ	395
Α. Γιαννούλης, Α. Μυστριώτης και Δ. Μπριασούλης	

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΑΝΑΓΚΩΝ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑΚΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ ΠΙΠΕΡΙΑΣ	403
I. Λ. Τσιρογιάννης, Ν. Κατσούλας, Κ. Κίττας και Δ. Σάββας	
ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΕΙΚΟΝΑΣ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑ ΓΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΟΥ ΚΑΛΛΙΕΡΓΗΤΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ	411
Βέντζας Δ., Παναγιωτίδη Αικ.	
ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΤΟΞΩΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ	421
Κ. Μπαξεβάνου, Θ. Μπαρτζάνας, Δ. Φειδαρος, Κ. Κίττας	
ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ	429
N. Tadj, Θ. Μπαρτζάνας, B .Draoui και Κ. Κίττας	
ΟΡΘΟΛΟΓΙΚΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟ ΜΕ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΗ ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΚΑΙ ΑΕΡΙΣΜΟΥ	437
Θ. Μπαρτζάνας και Κ. Κίττας	
ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΒΙΟΛΟΓΙΚΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ ΤΟΜΑΤΑΣ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΟΥ ΧΕΙΜΩΝΑ	445
Κ. Κίττας, Γ. Δημόκας και Μ. Tchamitchian	
ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΚΑΙ ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΜΙΚΡΟΚΛΙΜΑΤΟΣ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗ ΧΕΙΜΕΡΙΝΗ ΠΕΡΙΟΔΟ	453
Γ. Δημόκας, Κ. Κίττας, Ν. Κατσούλας και Ν. Δημόκας	
ΜΕΛΕΤΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ ΤΟΜΑΤΑΣ ΓΙΑ ΟΡΘΟΛΟΓΙΚΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΟΥ ΚΛΙΜΑΤΟΣ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟ ΣΠΟΡΟΦΥΤΩΝ	462
Ν. Κατσούλας, Κ. Πεπονάκης, Δ. Πετσάνη, Κ. Κίττας	
ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΑΝΤΙΣΤΑΓΟΝΙΚΩΝ ΦΥΛΛΩΝ ΚΑΛΥΨΗΣ ΣΤΟ ΜΙΚΡΟΚΛΙΜΑ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ ΜΕ ΥΔΡΟΠΟΝΙΚΗ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΑΓΓΟΥΡΙΟΥ	469
Κ. Κίττας, Ν. Κατσούλας, Χ. Μανωλαράκη, Θ. Μπαρτζάνας	
ΕΝΟΤΗΤΑ 4: ΕΛΑΦΙΚΟΙ ΠΟΡΟΙ.....	478
ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗ ΒΟΡΙΟΥ ΑΠΟ ΥΔΡΟΞΕΙΔΙΑ ΚΑΙ ΟΞΕΙΔΙΑ ΤΟΥ ΜΑΓΓΑΝΙΟΥ	480
Κ. Π. Προδρόμου και Χ. Λάκης	
ΟΔΗΓΙΕΣ ΛΙΠΑΝΣΗΣ ΚΑΙ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΑΓΡΟΤΕΜΑΧΙΟ ΜΕΣΩ ΕΔΑΦΟΛΟΓΙΚΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΔΗΜΩΝ Ν. ΚΟΖΑΝΗΣ	487
Φ. Παπαδόπουλος, Α. Παπαδόπουλος και Π. Τζιαχρή	
ΧΩΡΟ-ΧΡΟΝΙΚΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΕΠΙΠΕΔΩΝ Cd ΚΑΙ Cr ΣΕ ΓΕΩΡΓΙΚΑ ΕΔΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΑΛΜΥΡΟΥ ΜΑΓΝΗΣΙΑΣ	495
Ε. Ε. Γκόλια , Α. Δημήρκου, Στ. Α. Φλωράς, Κ. Παπαδήμας, Γ. Σκαμαγκούλης και Ι. Κ. Μήτσιος†	
ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΕΠΙΠΕΔΩΝ ΜΑΚΡΟ- ΚΑΙ ΜΙΚΡΟ-ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΕ ΕΔΑΦΗ ΚΑΙ ΝΕΡΑ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΤΟΥ ΑΛΜΥΡΟΥ, ΝΟΜΟΥ ΜΑΓΝΗΣΙΑΣ.	503
Α. Δημήρκου, Ε. Ε. Γκόλια , Στ. Α. Φλωράς, Χ. Ηλιόπουλος, Γ. Σκαμαγκούλης και Ι. Κ. Μήτσιος†	
ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΕΝΣΩΜΑΤΟΥΜΕΝΗΣ ΦΥΤΙΚΗΣ ΜΑΖΑΣ ΡΙΓΑΝΗΣ ΚΑΙ ΒΑΣΙΛΙΚΟΥ ΣΤΙΣ ΧΗΜΙΚΕΣ ΚΑΙ ΒΙΟΛΟΓΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΣΕ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΕΣ ΒΑΜΒΑΚΙΟΥ ΚΑΙ ΑΡΑΒΟΣΙΤΟΥ	511
Ν. Χουλιάρης, Φ. Γραβάνης, Η. Αναστασόπουλος, Ι. Βασιλάκογλου, Ν. Γκουγκουλιάς, Ι. Βαγγέλας, Α. Τσιτσιγιάννης και Ε. Βογιατζή	

Η ΕΠΟΧΙΚΗ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΤΟΥ ΒΙΟΔΙΑΘΕΣΙΜΟΥ ΦΩΣΦΟΡΟΥ (BioP), ΣΕ ΑΜΠΕΛΩΝΕΣ ΜΕ ΔΥΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ - ΟΡΓΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΜΒΑΤΙΚΗΣ	519
Σιήμης Α. και Παυλάτου –Βε Α. Η ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΤΗΣ ΜΙΚΡΟΒΙΑΚΗΣ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΕΝΑΝ ΟΡΥΖΩΝΑ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΗΤΙΚΗΣ ΠΕΡΙΟΔΟΥ	527
Αλαμάνου Μ., Παυλάτου-Βε Α., Ασκονίτης Β., Λίτσας Β. και Αντωνόπουλος Β. Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΣΤΗ ΣΥΜΠΙΕΣΤΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΤΑΣΗ ΠΡΟΣΥΜΠΙΕΣΗΣ ΕΔΑΦΩΝ ALFISOL ΚΑΙ VERTISOL	535
Κ. Π. Παναγιωτόπουλος και Γ. Τσολάκη	
ΕΝΟΤΗΤΑ 5: ΑΓΡΟΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑ	542
ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ, ΜΕΣΩ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ	544
Α. Άνθης, Ι. Βαφειάδης ΧΩΡΙΚΗ ΚΑΙ ΧΡΟΝΙΚΗ ΠΙΘΑΝΟΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΞΗΡΑΣΙΑΣ ΣΤΗ ΘΕΣΣΑΛΙΑ Χ. Ζαραγκότας, Α. Λουκάς, Λ. Βασιλειάδης και Π. Μήτσιου ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ ΣΤΗ ΔΡΙΜΥΤΗΤΑ ΞΗΡΑΣΙΑΣ ΣΤΗ ΘΕΣΣΑΛΙΑ	550 558
Γ.Τζαμπύρας, Α.Λουκάς και Λ.Βασιλειάδης	
ΕΝΟΤΗΤΑ 6: ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ	566
ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΞΥΛΟΥ ΜΕ ΕΛΚΥΣΤΗΡΕΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ ΤΩΝ ΔΑΣΙΚΩΝ ΕΔΑΦΩΝ	568
Α. Καραγιάννης, Ε. Λάμπου και Π. Καραρίζος ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΛΥΜΑΤΩΝ ΣΕ ΟΙΚΟΛΟΓΙΚΑ ΕΥΑΙΣΘΗΤΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ. Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΟΥ ΔΗΜΟΥ ΠΡΕΣΠΩΝ	575
Γ. Σαπουντζάκης, Μ. Γιαμούρη , Α. Παπαγιαννοπούλου, Φ. Παπαδόπουλος και Γ. Παρισόπουλος ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΑΖΩΤΟΥ ΣΕ ΑΓΡΟ ΑΡΑΒΟΣΙΤΟΥ ΑΡΔΕΥΟΜΕΝΟ ΜΕ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΜΕΝΑ ΛΥΜΑΤΑ	583
Β. Ζ. Αντωνόπουλος και Μ. Η. Rahil ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΣΥΛΛΟΓΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΥΠΑΙΘΡΟΥ ΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ ΚΑΙ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ	592
Γ. Τζιαφάς, Χ. Τοπάλογλου, Ο. Χρίστου και Ν. Συλλαίος ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΦΩΤΟΚΑΤΑΛΥΤΙΚΗΣ ΟΞΕΙΔΩΣΗΣ ΜΕ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΤΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΣΤΟΝ ΑΓΡΟΤΙΚΟ ΤΟΜΕΑ	600
Ι. Πούλιος, Ι. Τρυπαναγνωστόπουλος ΕΠΙΘΕΩΡΗΣΗ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΦΥΤΟΦΑΡΜΑΚΩΝ - ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΑΠΟ ΤΗ ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ ΤΗΣ Ε.Ε.	607
Α. Παπαγιαννοπούλου, Γ. Παρισόπουλος, Χ. Σακκάς ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΔΙΑΦΡΑΓΜΑΤΩΝ ΟΠΗΣ ΣΕ ΔΕΞΑΜΕΝΗ ΧΛΩΡΙΩΣΗΣ ΑΣΤΙΚΩΝ ΛΥΜΑΤΩΝ	615
Δ. Φειδαρος, Α. Μπαξεβάνου, Α. Ζαγορίτης, Π.-Ε. Μπίσκα	
ΕΝΟΤΗΤΑ 7: ΜΕΤΑΣΥΛΛΕΚΤΙΚΗ / ΜΕΤΑΣΥΓΚΟΜΙΣΤΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ	626

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΣΧΕΣΕΙΣ ΚΑΙ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΤΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΜΑΖΑΣ ΨΥΧΡΟΣΥΝΤΗΡΟΥΜΕΝΩΝ ΜΗΛΩΝ <i>PILAFI DELICIOUS</i> ΚΑΙ <i>GRANNY SMITH</i>	628
Θ. Θεοδωρίδης, Ε. Μανωλοπούλου, Γρ. Λαμπρινός και Ε. Αραβαντινός-Καρλάτος ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΣΥΣΚΕΥΑΣΙΑΣ ΣΤΗΝ ΠΟΙΟΤΗΤΑ «ΕΛΑΧΙΣΤΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΜΕΝΟΥ» ΜΑΡΟΥΛΙΟΥ	634
Ε. Μανωλοπούλου, Ν. Καπετάνιος, Ν. Χαλασοχώρη, Γρ. Λαμπρινός ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΣΥΣΚΕΥΑΣΙΑΣ ΣΤΑ ΠΟΙΟΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ «ΕΛΑΧΙΣΤΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΜΕΝΗΣ ΠΙΠΕΡΙΑΣ».....	642
Ε. Μανωλοπούλου, Θ. Σαμαράς, Ν. Χαλασοχώρη, Γρ. Λαμπρινός Η ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΣΥΝΤΗΡΟΥΜΕΝΩΝ ΜΗΛΩΝ ΠΟΙΚΙΛΙΑΣ <i>GRANNY SMITH</i> ΩΣ ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΠΟΙΟΤΙΚΗΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ.....	651
Δ. Μητρόπουλος και Γ. Λαμπρινός ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΜΗΛΩΝ <i>DELICIOUS</i> <i>PILAFI</i> ΣΕ ΠΑΡΑΔΟΣΙΑΚΕΣ ΑΠΟΘΗΚΕΣ	658
Δ. Μητρόπουλος και Γ. Λαμπρινός ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΗΣ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΨΥΞΗ ΑΣΥΣΚΕΥΑΣΤΩΝ ΟΠΩΡΟΛΑΧΑΝΙΚΩΝ	666
Γ. Ξανθόπουλος, Γρ. Λαμπρινός, Δ. Μητρόπουλος, Ε. Χατζής ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΜΗΛΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΚΑΙ ΤΟΝ ΧΡΟΝΟ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ.....	675
Ν. Πεντάρης, Ε. Μανωλοπούλου, Γ. Ξανθόπουλος, Δ. Μητρόπουλος και Γρ. Λαμπρινός ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΟΥ ΧΡΩΜΑΤΟΣ ΣΥΝΤΗΡΟΥΜΕΝΗΣ ΒΙΟΛΟΓΙΚΗΣ ΤΟΜΑΤΑΣ ΜΕ ΑΝΑΛΥΣΗ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΕΙΚΟΝΑΣ	682
Ε. Χατζής, Σ. Ψυχोगιού, Γ. Ξανθόπουλος και Γρ. Λαμπρινός	

ΕΝΟΤΗΤΑ 8: ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ690

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΑΠΕΥΘΕΙΑΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΩΣΜΩΣΗΣ ΜΕ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ	692
Εσσάμι Μωχάμεντ, Γ. Παπαδάκης, Ε. Μαθιουλάκης και Β. Μπελεσσιώτης ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΑΠΟ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΒΙΟΝΤΙΖΕΛ ΩΣ ΚΑΥΣΙΜΟ ΣΕ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟ-ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΓΕΩΡΓΙΚΟΥ ΕΛΚΥΣΤΗΡΑ.....	699
Ι. Γράβαλος, Θ. Γιαλαμάς, Ζ. Κουτσοφίτης, Α. Αυγουστής, Γ. Λιανός, Δ. Κατέρης, Π. Ξυραδάκης, Ζ. Τσιρόπουλος, Θ. Λέλλης ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ ΤΩΝ ΚΛΑΔΟΔΕΜΑΤΩΝ ΕΛΙΑΣ	707
Π. Ξένος-Κοκολέτσης, Ε. Χατζής και Γρ. Λαμπρινός ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΣΤΗΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΔΥΟ ΠΟΙΚΙΛΙΩΝ ΗΛΙΑΝΘΟΥ ΣΤΗΝ ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΕΛΛΑΔΑ.....	716
Τσιάνος Ν., Θ. Γέμτος, Χ. Καβαλάρης και Χ. Καραμούτης ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΕΛΑΙΟΚΡΑΜΒΗΣ (<i>Brassica sp.</i>) ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΒΙΟΝΤΙΖΕΛ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΛΑΡΙΣΑΣ	723
Ι. Ραμνιώτης, Θ. Κωτσόπουλος, Γ. Μαρτζόπουλος ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΔΥΟ ΠΟΙΚΙΛΙΩΝ ΕΛΑΙΟΚΡΑΜΒΗΣ ΣΤΙΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΕΣ ΤΗΣ ΚΕΝΤΡΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ.....	731
Μ. Σακελλαρίου – Μακραντωνάκη, Ι. Παναγιώτου και Π. Βύρλας ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΕΔΑΦΟΥΣ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΣΠΟΡΟΥ, ΕΛΑΙΟΥ ΚΑΙ ΠΙΤΑΣ ΔΥΟ ΥΒΡΙΔΙΩΝ ΗΛΙΑΝΘΟΥ ΣΤΗΝ ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΕΛΛΑΔΑ	738
Π. Α. Καλαβριώτου και Θ. Α. Γέμτος	

ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΛΑΙΟΥ ΗΛΙΑΝΘΟΥ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΜΕΙΩΜΕΝΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ	746
X. Καβαλάρης, X. Καραμούτης, Π. Καλαβρυώτου και Θ.Α. Γέμτος	
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΜΙΓΜΑΤΩΝ ΗΛΙΕΛΑΙΟΥ ΜΕ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟ ΣΕ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΟ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟ ΩΣ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΣΕ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΑΝΑΦΛΕΞΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ	754
Α. Μπαλαφούτης, Δ. Μελάς, Α. Νάτσης, Α. Παπαγιαννοπούλου και Γ. Παπαδάκης	
ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΑΠΟ ΛΥΜΑΤΑ ΧΟΙΡΩΝ ΣΕ ΔΥΟ ΣΕ ΣΕΙΡΑ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΕΣ CSTR ΣΤΗ ΜΕΣΟΦΙΛΗ ΚΑΙ ΥΠΕΡΘΕΡΜΟΦΙΛΗ ΖΩΝΗ.....	762
Ι. Φωτίδης, Ν. Τσολάκης, Θ. Κωτσόπουλος και Γ. Γ. Μαρτζόπουλος	

ΕΝΟΤΗΤΑ 9: ΝΕΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΣΤΗ ΓΕΩΡΓΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ.769

ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΚΡΟΦΥΣΙΩΝ ΕΚΝΕΦΩΣΗΣ ΖΙΖΑΝΙΟΚΤΟΝΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ ΜΕ ΦΘΟΡΙΣΜΟ	771
Μ. Βλαχογιάννης, Β. Ιακωβάκης, Θ. Τσιρίκογλου και Δ. Χάχαλης	
ΑΜΑΔΑ: ΜΙΑ ΠΟΛΥΧΡΗΣΤΙΚΗ ΒΑΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΓΙΑ ΓΕΩΡΓΙΚΑ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΑ ΑΓΡΩΝ.....	779
Ι. Γράβαλος, Ζ. Τσιρόπουλος, Θ. Γιαλαμάς, Ζ. Κουτσοφίτης, Π. Ξυραδάκης, Δ. Κατέρης, Ε. Ντάφας, Θ. Λέλλης	
ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΙ ΕΔΑΦΟΚΛΙΜΑΤΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ ΤΗΣ ΤΕΧΝΗΤΗΣ ΛΙΜΝΗΣ ΣΜΟΚΟΒΟΥ	787
Α. Αυγουστής, Μ. Σαπουντζής, Δ. Κατέρης, Ι. Γράβαλος, Π. Ξυραδάκης	
ΙΧΝΗΛΑΣΙΜΟΤΗΤΑ ΕΝΤΟΣ ΑΓΡΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΔΟΣΙΑΚΗ ΣΥΓΚΟΜΙΔΗ ΟΠΩΡΟΦΟΡΩΝ ΔΕΝΔΡΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ RFID	795
Ι.Γ. Αμπατζίδης, Σ.Γ. Βουγιούκας και Δ.Δ. Μπόχτης	
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ ΣΤΟΥΣ ΕΠΙΤΟΠΙΟΥΣ ΕΛΕΓΧΟΥΣ ΤΗΣ ΕΝΙΑΙΑΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΣΤΗΝ ΤΗΝΟ	803
Νικόλαος Μαλάμος, Γεώργιος Παγανέλης	
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ SLURP ΚΑΙ GIS ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΩΝ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΤΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ ΑΛΜΩΠΑΙΟΥ	812
Π.Ε. Γεωργίου, Γ. Γεωργούλιας, Δ.Μ. Παπαμιχαήλ και Μ.Ι. Διαμαντοπούλου	
ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΣΤΗΡΙΞΗΣ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ	821
Δ.Δ. Μπόχτης, Σ.Γ. Βουγιούκας, Ι.Γ. Αμπατζίδης και Κ.Α. Τσατσαρέλης	
ΜΗ-ΓΡΑΜΜΙΚΟΣ ΠΡΟΒΛΕΠΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΒΑΣΕΙ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΓΙΑ ΑΥΤΟΜΑΤΗ ΠΛΟΗΓΗΣΗ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ	829
Σ. Γ. Βουγιούκας	
ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ ΤΟΥ ΑΣΥΡΜΑΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΣΕ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΓΕΩΡΓΙΑ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ.....	835
Κατσαλής Κ., Ξενάκης Α., Σακαλλερίου Α., Κίικρας Π.	
ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΤΑΥΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΠΙΤΡΑΠΕΖΙΩΝ ΣΤΑΦΥΛΙΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΔΟΣΙΑΚΗ ΣΥΓΚΟΜΙΔΗ.....	843
Ι.Γ. Αμπατζίδης, Γ.Σ. Τζελέπης και Σ.Γ. Βουγιούκας	
ΑΝΤΙΛΗΨΗ ΕΛΛΗΝΩΝ ΑΓΡΟΤΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΓΕΩΡΓΙΑ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ	850
Σ. ΜΟΥΡΤΖΙΝΗΣ, Σ. ΦΟΥΝΤΑΣ, Θ. ΓΕΜΤΟΣ	
ΜΕΛΕΤΗ ΧΩΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΧΡΟΝΙΚΗΣ ΠΑΡΑΛΛΑΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΟΠΩΡΩΝΕΣ ΜΗΛΙΑΣ.....	858
Α. Δ. Αγγελόπουλου, Σ. Blackmore, Σ. Φουντάς, Θ. Α. Γέμτος και Γ. Δ. Νάνος	

ΖΩΝΕΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΒΑΣΕΙ ΧΑΡΤΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ, ΠΟΙΟΤΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ	866
Α. Τάνος, Α. Αγγελοπούλου, Σ. Φουντάς, Θ.Α. Γέμτος, Γ.Δ. Νάνος και Α. Χατζηνίκος ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΟΠΗΣ ΧΟΡΤΟΥ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΑΥΤΟΝΟΜΟΥ ΕΛΚΥΣΤΗΡΑ.....	874
Δ. Μπόχτης, H.W. Griepentrog, Σ. Βουγιούκας, N.A. Andersen ΧΡΗΣΗ ΔΙΑΧΡΟΝΙΚΩΝ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ SPOT 5 ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΑΓΡΟΤΕΜΑΧΙΩΝ	882
Λ. Τούλιος, Δ. Δουδουμοπούλου, Μ. Τούλιος, και Δ. Χατζημιτσής ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΕ ΚΕΛΙ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΕΥΘΕΩΣ ΚΑΝΑΛΙΟΥ.....	890
Αικατερίνη Α. Μπαξεβάνου, Δημήτριος Κ. Φείδαρος ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΡΟΜΠΟΤΙΚΗΣ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑΣ ΧΑΜΗΛΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΠΡΑΚΤΙΚΩΝ.....	898
Τρέσσος Κ.Δ., Ανδρέου Ι.Α., Blackmore S. , Φουντάς Σ., Γέμτος Θ.Α.	

Κατάλογος Συγγραφέων

Αγγελοπούλου	A.	Δημοπούλου	K.
Αλαμάνου	M.	Διαμαντόπουλος	E.
Αλεξίου	Δ.	Διαμαντοπούλου	M.I.
Αλεξίου	I.	Δομενικιώτης	X.
Άμπας	B.	Δουδουμοπούλου	Δ.
Αμπατζίδης	I.Γ.	Ελμαλόγλου	Σ.
Αναστασόπουλος	H.	Εσσάμ	M.
Ανδρέου	A.	Ζαγορίτης	A.
Άνθης	A.	Ζάννης	K.
Αντωνόπουλος	B.	Ζαραγκότας	X.
Αραβαντινός-Καρλάτος	E.	Ηλιόπουλος	X.
Αραμπατζής	Γ.	Θεοδωρίδη	Θ.
Ασχονίτης	B.	Θεοχάρης	M.
Αυγουλάς	X.	Ιακωβάκης	B.
Αυγουστής	A.	Καβαλάρης	X.
Βαγγέλας	I.	Καλαβρυώτου	Π.
Βαλιάντζας	I.	Καλφούντζος	Δ.
Βασιλάκογλου	I.	Καπετάνιος	N.
Βασιλειάδης	Λ.	Καραγιάννης	A.
Βαφειάδης	Δ.	Καραγιάννης	E.
Βαφειάδης	I.	Καραμάνος	A.
Βέντζας	Δ.	Καραμούζης	Δ.N.
Βλαχογιάννης	M.	Καραμούτης	X.
Βλάχος	B.	Καραρίζος	Π.
Βογιατζή	E.	Κάργας	Γ.
Βουγιούκας	Σ.	Καρπούζος	Δ.
Βούλγαρης	Θ.	Κατέρης	Δ.
Βύρλας	Π.	Κατσαλής	K.
Γέμτος	Θ.	Κατσούλας	N.
Γεωργίου	Π.E.	Κερκίδης	Π.
Γεωργούλιας	Γ.	Κίκιρας	Π.
Γεωργούσης	X.	Κίττας	K.
Γιαλαμάς	Θ.	Κόκορας	I.
Γιαμούρη	M.	Κολιπέτσας	K.
Γιαννούλης	A.	Κοτσακιώτη	X.K.
Γκόλια	E.	Κούγιας	Π.
Γκουγκουλιάς	N.	Κουτσερής	E.
Γράβαλος	I.	Κουτσοφίτης	Z.
Γραβάνης	Γ.	Κυρίκου	I.
Γραβάνης	Φ.	Κωτσόπουλος	Θ.
Δαλέζιος	N.	Κωτσόπουλος	Σ.
Δεδούσης	A.	Λάκης	X.
Δέρκας	N.	Λάμπου	E.
Δημήτρου	A.	Λαμπρινός	Γ.
Δημητριάδης	X.	Λεκάκης	E.H.
Δημόκας	Γ.	Λέλλης	Θ.
Δημόκας	N.	Λιανός	Γ.

Λίτσκας	Β.	Παναγιωτίδη	Α.
Λόκκας	Φ.	Παναγιωτόπουλος	Κ.Π.
Λόντρα	Π.	Παναγιώτου	Ι.
Λουκάς	Α.	Πανώρας	Α.
Λυκοσκούφης	Ι.	Παπαγιαννοπούλου	Α.
Μαγαλιός	Σ.	Παπαδάκης	Γ.
Μαθιουλάκης	Ε.	Παπαδήμας	Κ.
Μαλάμος	Ν.	Παπαδόπουλος	Α.
Μανωλαράκη	Χ.	Παπαδόπουλος	Φ.
Μανωλοπούλου	Ε.	Παπαδοπούλου	Ο.
Μαρτζόπουλος	Γ.	Παπαμάνθος	Χ.
Μαυρογιαννόπουλος	Γ.	Παπαμιχαήλ	Δ.
Μελάς	Δ.	Παπανικολάου	Χ.
Μητρόπουλος	Δ.	Παπαχρήστου	Ε.
Μήτσιος	Ι.Κ.	Παράφορος	Δ.
Μήτσιου	Π.	Παρισόπουλος	Γ.
Μουρτζίνης	Σ.	Πατελοδήμου	Σ.
Μουσουλιώτης	Α.	Πατσιαλή	Σ.
Μπαλαφουτης	Α.	Πατσιαλής	Κ.
Μπαλτάς	Ε.	Παυλάτου Βε	Α.
Μπαμπατζιμόπουλος	Χ.	Πεντάρης	Ν.
Μπαξεβάνου	Α.	Πεπονάκης	Κ.
Μπαρτζάνας	Θ.	Πετσάνη	Δ.
Μπελεσιώτης	Β.	Πούλιος	Ι.
Μπιλάλης	Δ.	Προδρόμου	Κ.Π.
Μπίσκα	Π.Ε.	Ραμινιώτης	Θ.
Μπλάντα	Α.	Σάββας	Δ.
Μπότας	Μ.	Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη	Μ.
Μπόχτης	Δ.	Σακκάς	Χ.
Μπριασούλης	Δ.	Σαμαράς	Θ.
Μυγδάκος	Γ.	Σαπουντζάκης	Γ.
Μυγδάκος	Ε.	Σαπουντζής	Μ.
Μυστριώτης	Α.	Σγουμποπούλου	Α.
Νάνμος	Ν.	Σήμης	Α.
Νάνος	Γ.Δ.	Σκαμαγκούλης	Γ.
Νάτσης	Α.	Σούλης	Κ.
Νάτσης	Η.	Σπανομήτρος	Ι.Α.
Νικήτα-Μαρτζοπούλου	Χ.	Σταμούλης	Γ.
Ντάφας	Ε.	Σταυρινός	Ε.
Ντίνας	Γ.	Συλλαίος	Ν.
Ντιούδης	Ι.Π.	Τάνος	Α.
Ντιρογιάννης	Α.Γ.	Τζαμπύρας	Γ.
Ξανθόπουλος	Γ.	Τζελέπης	Γ.Σ.
Ξενάκης	Απ.	Τζιαφάς	Γ.
Ξένος-Κοκολέτσης	Π.	Τζιαχρής	Π.
Ξυραδάκης	Π.	Τζιγκούρας	Ι.
Παγανέλης	Γ.	Τίγκας	Δ.

Τοπάλογλου	X.	Φουντάς	Σ.
Τούλιος	Λ.	Φωτίδης	I.
Τούλιος	M.	Χαλασοχώρη	N.
Τρέσσος	K.Δ.	Χατζηγιαννάκης	E.
Τρυπαναγνωστόπουλος	I.	Χατζημιτσής	Δ.
Τσακίρης	Γ.	Χατζής	E.
Τσάντζος	Σ.	Χάχαλης	Δ.
Τσατσαρέλης	K.A.	Χισκάκης	M.
Τσιάνος	N.	Χουλιάρας	N.
Τσιούρης	Σ.	Χρίστου	O.
Τσιρίκογλου	Θ.	Ψυχογιού	Σ.
Τσιρογιάννης	I.Λ.	Blackmore	S.
Τσιρόπουλος	Z.	Brighton	J.L.
Τσιτσιγιάννης	A.	Draoui	B.
Τσολάκη	Γ.	Godwin	R.
Τσολάκης	N.	Griepentrog	H.W.
Φασουλή	B.	Rahil	M.H.
Φείδαρος	Δ.	Tadj	N.
Φιλίντας	Θ.Αγ.	Tchamitchian	M.
Φλωράς	Στ.	Tillett	N.

Ενότητα 2:

Υδατικοί Πόροι

(115)

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΘΕΤΑ PROBE ML2 ΣΕ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΑΝΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ.

Γ. Κάργας^{1α}, Α. Σγουμποπούλου^{1β}, Β. Φασούλη και Π. Κερκίδης^{1γ}

¹ Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και
Γεωργικής Μηχανικής, Ιερά Οδός 75, 11855, Βοτανικός, alhyd4kag@aua.gr,
βansgo@aua.gr, ^γlhyd2kep@aua.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι συσκευές Theta probe ML2 χρησιμοποιούνται ευρέως για την μέτρηση της εδαφικής υγρασίας. Η εκτίμηση της αξιοπιστίας τους συνήθως αναφέρεται σε καθεστώς ομοιόμορφης υγρασίας. Στην παρούσα εργασία εξετάζεται στο εργαστήριο ο τρόπος υπολογισμού της διηλεκτρικής σταθεράς από την ML2 σε έδαφος SL σε συνθήκες ανομοιόμορφης υγρασίας σε τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι για τον υπολογισμό της διηλεκτρικής σταθεράς πιο κοντά στις μετρούμενες τιμές βρίσκεται το “αριθμητικό καθεστώς” (arithmetic regime) και ότι η σχέση Θ-K είναι γραμμική. Επίσης συγκρίνονται τα αποτελέσματα με το μοντέλο των Robinson et al. (2005) και εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα.

PERFORMANCE OF THE THETA PROBE ML2 IN THE PRESENCE OF NONUNIFORM SOIL MOISTURE PROFILES

G. Kargas^{1a}, A. Sgoubopoulou^{1b}, V. Fasouli and P. Kerkides^{1c}

¹ Agricultural University of Athens, Dept. of Nat. Resour. Manag. and Agric. Eng., Iera str 75, 11855, Votanikos, alhyd4kag@aua.gr, βansgo@aua.gr, ^γlhyd2kep@aua.gr

ABSTRACT

An attempt is made to investigate the soil – permittivity regime which is “seen” by ML2 theta probe in cases where a nonuniform soil moisture profile prevails. Our investigation was performed in laboratory columns, for a SL porous medium. Four distinct cases, where the moisture regime could be established in a predesigned manner were tried. From our experimental investigations it is shown that the bulk dielectric constant “seen” by the ML2 probe in nonuniformly wet profiles irrespective of their layer thickness is closely ascribed by the arithmetic averaging scheme and the relation Θ-K is linear. Also the results are compared with the calibration equations of Robinson et al (2005) and give useful comments and conclusions.

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Κοντά στην επιφάνεια του εδάφους πολύ συχνά εμφανίζεται ανομοιογενής υγρασιακά κατατομή. Επειδή είναι πολύ συνηθισμένο οι συσκευές μέτρησης της εδαφικής υγρασίας διαμέσου της διηλεκτρικής σταθεράς (K) να τοποθετούνται κατακόρυφα τίθεται το ερώτημα του πώς υπολογίζεται σε αυτή την περίπτωση η διηλεκτρική σταθερά του πορώδους μέσου το οποίο περιλαμβάνει στρώσεις με διαφορετικές διηλεκτρικές σταθερές. Για την περίπτωση του TDR ο τρόπος υπολογισμού της K έχει μελετηθεί σε αρκετές εργασίες. Οι Torpp et al. (1982) μελέτησαν την περίπτωση δυο διαφορετικών υγρασιακά στρώσεων κάνοντας την υπόθεση ότι ο συνολικός χρόνος t_3 ο οποίος απαιτείται για την μεταφορά ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος από δύο στρώσεις πάχους L_1 και L_2 είναι ίσος με το άθροισμα των επιμέρους χρόνων t_1 και t_2 που απαιτείται για την μεταφορά του κύματος από κάθε στρώση. Έτσι $t_3 = t_1 + t_2$ και συνεπώς :

$$t_3 = \frac{L_1 \sqrt{K_1} + L_2 \sqrt{K_2}}{c} \quad (1)$$

Η διηλεκτρική σταθερά κατά μήκος της γραμμής μεταφοράς δίνεται από τον τύπο:

$$K_a = \left(\frac{ct_3}{L_1 + L_2} \right)^2 = \left(\frac{L_1 \sqrt{K_1} + L_2 \sqrt{K_2}}{L_1 + L_2} \right)^2 \quad (2)$$

Συνεπώς αν είναι γνωστές οι διηλεκτρικές σταθερές και το πάχος κάθε στρώσης μπορούμε να υπολογίσουμε τη διηλεκτρική σταθερά του μέσου που περιλαμβάνει αυτές τις στρώσεις. Η περιεκτικότητα σε υγρασία που υπολογίστηκε από την εξίσωση των Torpp et al. (1980) με τιμές της $K=K_a$ όπως υπολογίστηκαν από τη (2) έδωσε ίδιες τιμές με την μέση περιεκτικότητα σε υγρασία. Η μέθοδος αυτή ονομάστηκε αργότερα “διαθλαστικό καθεστώς” (refractive index mixing method).

Οι Chan and Knight (1999, 2001) έδειξαν σε δείγματα από άμμο ότι ο τρόπος υπολογισμού της διηλεκτρικής σταθεράς σε πορώδη μέσα με στρώσεις διαφορετικής υγρασίας εξαρτάται από τον λόγο του μήκους κύματος (λ) προς το πάχος της στρώσης

(L). Στην περίπτωση που ο λόγος $\frac{\lambda}{L} \geq 4$ τότε η διηλεκτρική σταθερά υπολογίζεται από το “αριθμητικό καθεστώς”:

$$K_a = \frac{\sum_{i=1}^N L_i K_i}{\sum_{i=1}^N L_i} \quad (3)$$

σε διαφορετική περίπτωση ακολουθεί το διαθλαστικό καθεστώς

Στην συνέχεια οι Schaap et al (2003) παρουσίασαν μετρήσεις με TDR για δύο, τρεις και πολλές στρώσεις. Τα συμπεράσματα τα οποία κατέληξαν ήταν ότι γενικά το διαθλαστικό καθεστώς για το TDR είναι το καταλληλότερο εκτός από τις περιπτώσεις που η συχνότητα λειτουργίας του είναι μικρότερη από 100 MHz καθώς και στην περίπτωση λειτουργίας υψηλών συχνοτήτων αλλά που το πάχος των στρώσεων είναι μικρό άρα ο αριθμός τους είναι μεγάλος. Στις περιπτώσεις αυτές πρέπει να ακολουθείται το αριθμητικό καθεστώς. Η μετάπτωση αυτή από το διαθλαστικό καθεστώς όταν έχουμε λίγες αλλά μεγάλου πάχους στρώσεις στο αριθμητικό καθεστώς όταν έχουμε πολλές και μικρού πάχους στρώσεις αποδόθηκε στη μεγάλη καθυστέρηση του σήματος που

συμβαίνει στην περίπτωση των πολλών στρώσεων. Στην περίπτωση αυτή αν ο υπολογισμός της K γίνει με βάση το διαθλαστικό καθεστώς θα οδηγήσει σε σημαντικά σφάλματα της υπολογιζόμενης υγρασίας. Οι Robinson et al. (2005) έδειξαν ότι για τις συχνότητες λειτουργίας του TDR σε πειράματα με δύο διακριτές στρώσεις σε άμμο και γυάλινα σφαιρίδια το διαθλαστικό καθεστώς είναι το καταλληλότερο. Όμως ανέφεραν ότι αυτό μπορεί να μην ισχύει για συχνότητες λειτουργίας μικρότερες από 100 MHz. Στην περίπτωση αυτή αναφέρουν ότι χρειάζεται εξέταση για το ποιο σχέδιο είναι καταλληλότερο. Επίσης πρότειναν για την περίπτωση των δύο στρώσεων ένα μοντέλο υπολογισμού της K που στηρίζεται στην γνώση της τιμής της K στο κορεσμό καθώς και στη ξηρή κατάσταση. Αν θεωρηθεί ότι η τιμή της K στην ξηρή κατάσταση είναι 2.8 τότε απαιτείται μόνο η τιμή της στο κορεσμό.

Στις συσκευές Theta probe ML2 οι οποίες λειτουργούν στην συχνότητα 100 MHz δεν έχει γίνει μέχρι τώρα έλεγχος για το ποιο σχέδιο βρίσκεται πιο κοντά στις μετρούμενες τιμές (διαθλαστικό ή αριθμητικό). Επίσης δεν έχουν παρουσιασθεί δεδομένα για το τι επίπτωση έχει το κάθε σχέδιο πάνω στον υπολογισμό της υγρασίας. Στην παρούσα εργασία εξετάζουμε τη συμπεριφορά της Theta probe σε τέσσερις περιπτώσεις και γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων με τις προτεινόμενες εξισώσεις των Robinson et al. (2005).

2.ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1 Περιγραφή της συσκευής ML2

Μία πλήρης περιγραφή της συσκευής ML2 αναφέρεται από τους Gaskin and Miller (1996) και Miller and Gaskin (1997). Η σχέση μεταξύ της Θ και της $\sqrt{K}$ θεωρείται γραμμική και δίνεται από την σχέση:

$$\Theta = \frac{\sqrt{K} - \alpha_0}{a_1} \quad (4)$$

ενώ η σχέση μεταξύ της τάσης (σε volts) που καταγράφονται από την συσκευή ML2 και της τετραγωνικής ρίζας της διηλεκτρικής σταθεράς δίνεται από την σχέση

$$\sqrt{K} = 1.07 + 6.4V - 6.4V^2 + 4.7V^3 \quad (5)$$

Με την καταγραφή των volts βρίσκεται η τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς και με την αξιοποίηση των τιμών των α_0 και a_1 που δίνονται εργοστασιακά βρίσκεται η περιεχόμενη Θ . Οι τιμές των α_0 και a_1 για τα ανόργανα είναι 1.6 και 8.4 και για τα οργανικά εδάφη 1.3 και 7.7 αντίστοιχα. Το σήμα εξόδου κυμαίνεται από 0-1 V για εύρος διηλεκτρικής σταθεράς από 1-32, το οποίο αντιστοιχεί σε εύρος υγρασιών από 0-0.5 cm³/cm³.

2.2 Εξίσωση των Robinson et al (2005)

Οι Robinson et al (2005) πρότειναν για την περίπτωση δύο στρώσεων την εμπειρική προσέγγιση

$$\sqrt{K} = \frac{\Theta}{\Phi} \sqrt{K_{\text{sat}}} + \left(1 - \frac{\Theta}{\Phi}\right) \sqrt{K_{\text{dry}}} \quad (6)$$

όπου K_{sat} η τιμή της K στο κορεσμό και K_{dry} η τιμή της K στην ξηρή κατάσταση. Επίσης πρότειναν ότι μπορεί να θεωρηθεί γνωστή η τιμή για την ξηρή κατάσταση $K_{dry} = 2.8$. Θ είναι η τιμή της υγρασίας σε κάθε K και Φ το ολικό πορώδες.

Στην περίπτωση που η συχνότητα λειτουργίας είναι μικρότερη από 100 MHz τότε οι Robinson et al (2005) αναφέρουν ότι η εξίσωση (6) μάλλον δεν ισχύει. Στην περίπτωση αυτή πρότειναν την σχέση

$$K = \frac{\Theta}{\Phi} K_{sat} + \left(1 - \frac{\Theta}{\Phi}\right) K_{dry} \quad (7)$$

Στην περίπτωση που θεωρηθεί γνωστή η K_{dry} τότε το μοντέλο απαιτεί μόνο την τιμή της K_{sat} για να εφαρμοστεί. Το μοντέλο τους έχει προταθεί μόνο για την περίπτωση όπου η μία στρώση είναι κορεσμένη και η άλλη στην ξηρή κατάσταση ενώ έχει εφαρμοστεί μόνο στην περίπτωση χονδρόκοκκης χαλαζιακής άμμου.

Εξετάστηκε στο εργαστήριο ένα διαταραγμένο έδαφος SL με $\rho_p = 1.22 \text{ gr/cm}^3$.

2.3 Πείραμα

2.3.1. Σύστημα αέρας – νερό, αέρας-κορεσμένο πορώδες μέσο και αντίστροφα..

Η Theta probe εισάγεται κάθετα σε απεσταγμένο νερό με βήματα 5 mm μέχρι βάθος 60 mm και καταγράφονται τα volts. Με τον τρόπο αυτό μετρήθηκε η τιμή της K με την βοήθεια της εξίσωσης (5) και εκτιμήθηκε η μέθοδος που ακολουθείται από την συσκευή για τον υπολογισμό της K στο σύστημα αέρας – νερό που χαρακτηρίζεται από δύο τελείως διαφορετικές διηλεκτρικές σταθερές ($K_{αέρα}=1$ και $K_{νερού}=80$).

Για τις ανάγκες του πειράματος στα εδάφη κατασκευάστηκαν κύλινδροι από plexiglas διαμέτρου και ύψους 6.5 cm. Στο πάτο των κυλίνδρων τοποθετήθηκε σήτα. Για την περίπτωση αέρας / πορώδες μέσο εισάγεται σταδιακά η Theta probe στο έδαφος με τον ίδιο τρόπο όπως στο πείραμα αέρας / νερό και καταγράφονται τα volts. Όταν έχει εισχωρήσει σε όλο το μήκος η Theta probe καταγράφονται τα volts και υπολογίζεται η K στον κορεσμό. Στην αντίθετη περίπτωση (πορώδες μέσο/ αέρας) αφού εισχωρήσει η Theta probe σε όλο το μήκος του δείγματος και μετρηθούν τα volts αφαιρούμε σταδιακά τμήματα κορεσμένου χώματος από το κάτω άκρο έτσι ώστε σταδιακά να μειώνεται το τμήμα που περιέχει το κορεσμένο μέσο και να αυξάνεται αυτό του αέρα. Μετά από κάθε αφαίρεση χώματος γίνεται καταγραφή των volts και υπολογισμός της K .

2.3.2. Διαμόρφωση δύο στρώσεων (Y/Ξ)

Σε αρχικά αεροξηρανθέν δείγμα αφαιρούνται σταδιακά 5 έως 10 mm δείγματος και προστίθεται δείγμα με υψηλή υγρασία και έτσι διαμορφώνεται μία κατατομή όπου στο επάνω μέρος υπάρχει μια υγρή περιοχή και στο κάτω μέρος ξηρό δείγμα. Συνεπώς δημιουργείται ένα προφίλ με δύο διακριτές υγρασιακά στρώσεις (Y/Ξ) όπου το ύψος της κάθε μίας μεταβάλλεται σταδιακά. Από κάθε προφίλ λαμβάνεται η τιμή της K που δίνει η συσκευή και γίνονται οι υπολογισμοί με βάση τα δύο σχέδια.

2.3.3. Διαδικασία στράγισης.

Το αεροξηρανθέν διαταραγμένο δείγμα τοποθετήθηκε στους κυλίνδρους και ακολούθως στο κέντρο του κατακόρυφα τοποθετήθηκε η ML2 έτσι ώστε να μπορεί να καταγράφει την κατατομή υγρασίας σε όλο το μήκος του δείγματος καθώς και την αντίστοιχη τιμή της K . Πραγματοποιήθηκε κορεσμός του δείγματος από τη βάση και στη συνέχεια αφέθηκε να στραγγίζει ενώ ημερησίως λαμβάνονταν τιμές των volts, της υγρασίας και του βάρους. Το πείραμα διήρκεσε περίπου 30 ημέρες. Μετά το τέλος του

πειράματος το δείγμα τοποθετήθηκε σε φούρνο στους 105⁰ C και υπολογίστηκε η υγρασία του. Με την βοήθεια της φαινόμενης πυκνότητας υπολογίστηκε η κατ' όγκο υγρασία που αντιστοιχούσε σε κάθε μέτρηση. Με τον τρόπο αυτό μέσα στο κύλινδρο διαμορφώθηκε μία ανομοιογενής κατατομή. Στην περίπτωση αυτή παρουσιάζεται η σχέση Θ-K και συγκρίνεται με τις προτεινόμενες εξισώσεις των Robinson et al (2005).

3.ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

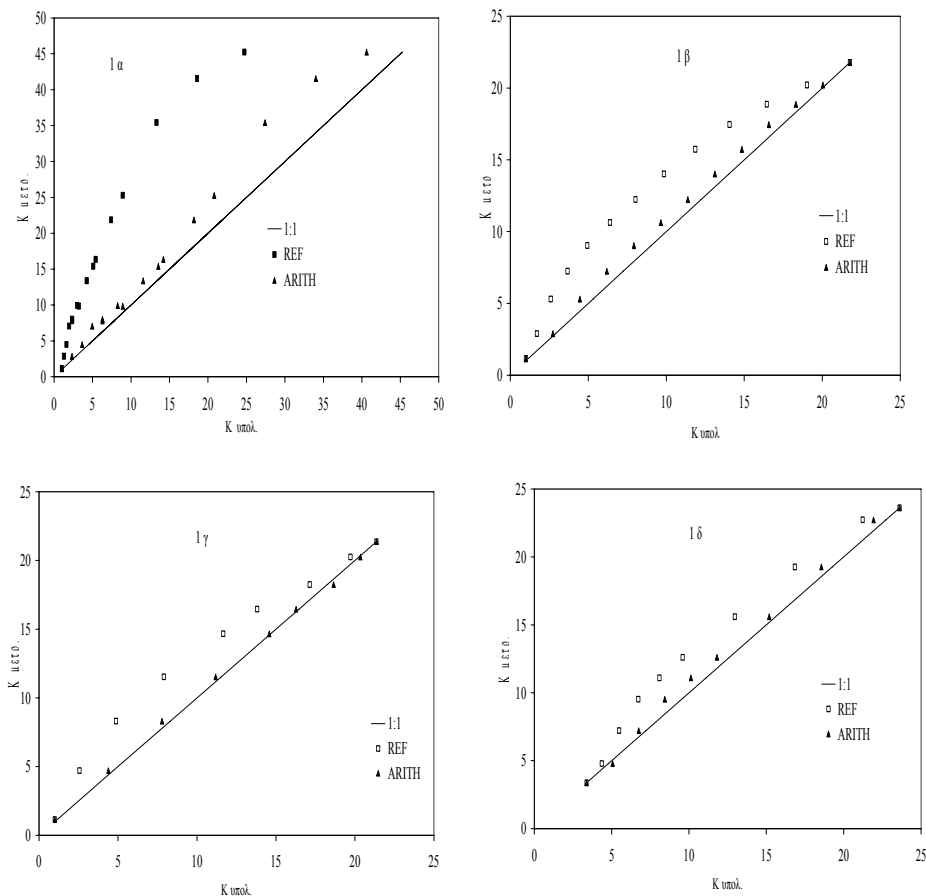
3.1 Σύστημα αέρας – νερό

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 1(α), εισάγοντας σταδιακά ανά 5 mm κατακόρυφα την Theta probe σε απεσταγμένο νερό, τα δεδομένα ακολουθούν καθαρά γραμμική σχέση παραπλήσια με το αριθμητικό καθεστώς μέχρι το βάθος περίπου των 25 mm. Στο βάθος των 25 mm η ML2 δίνει το μέγιστο σήμα 1100 mV το οποίο διατηρείται σχετικά ίδιο μέχρι τα 60 mm. Όσο αυξάνεται το βάθος εισχώρησης της Theta probe από την επιφάνεια μέχρι 25 mm αυξάνεται και η απόκλιση από το αριθμητικό καθεστώς όπως υπολογίζεται από τις τιμές της K του νερού και της K του αέρα. Αυτό συμβαίνει γιατί η τριτοβάθμια εξίσωση (5) αναφέρεται για εύρος διηλεκτρικών σταθερών από 1 έως περίπου 32. Για τον υπολογισμό των δύο σχεδίων θεωρήσαμε τιμές της $K_{\text{νερού}}=80$ και $K_{\text{αέρα}}=1$.

Επίσης παρατηρείται ότι οι τιμές K της Theta probe είναι πάντα μεγαλύτερες από τις τιμές K που δίνει το αριθμητικό καθεστώς. Τα αποτελέσματα αυτά είναι αντίθετα από αυτά με την TDR τα οποία παρουσίασαν οι Schaap et al (2003). Στην περίπτωση της TDR με τρία ραβδία μήκους 20 cm τα δεδομένα έδειξαν ότι η διηλεκτρική σταθερά ακολουθεί καθαρά το διαθλαστικό καθεστώς σε όλο το μήκος των ραβδίων. Τα δεδομένα που παρουσιάζουμε είναι ταυτόσημα με αυτά που παρουσίασαν οι [9]. Από τα δεδομένα φαίνεται ότι εάν οι υπολογισμοί της K γίνουν με βάση το διαθλαστικό καθεστώς οδηγούν σε μεγάλη υποεκτίμηση της K.

3.2 Αέρας-πορώδες μέσο και αντίστροφα.

Από το Σχήμα 1(β) (αέρας/πορώδες μέσο) φαίνεται ότι το αριθμητικό καθεστώς βρίσκεται πολύ κοντά στην σχέση 1:1. Πρέπει να αναφέρουμε ότι σε αυτή την περίπτωση η μέγιστη τιμή του σήματος εξόδου δίνεται στο βάθος των 60 mm και όχι στα 25 mm. Η αναλογία του σήματος εξόδου στα 25mm με αυτό των 60mm είναι 0.606. Για τον υπολογισμό των δύο σχεδίων χρησιμοποιήσαμε την μέγιστη τιμή της K όταν η Theta probe ήταν πλήρως βυθισμένη στο κορεσμένο πορώδες μέσο και $K_{\text{αέρα}}=1$. Από το Σχήμα 1(γ) (πορώδες μέσο/αέρας) φαίνεται ότι η τιμή της K η υπολογισμένη με το αριθμητικό καθεστώς σχεδόν ταυτίζεται με την σχέση 1:1 πράγμα το οποίο σημαίνει ότι η Theta probe ακολουθεί πάλι το αριθμητικό καθεστώς. Επίσης αν συγκρίνουμε την τιμή των volts στα 30 mm με αυτή των 60 mm βλέπουμε παρόμοια συμπεριφορά με αυτή του αέρας /πορώδες μέσο. Οι αναλογίες τώρα από την σύγκριση είναι 0.65.



Σχήμα 1: Σχέση ανάμεσα στις μετρούμενες και υπολογισμένες τιμές της K με βάση τα δύο σχέδια.

3.2 Διακριτές στρώσεις (Υ/Ξ)

Στην περίπτωση αυτή 1 (δ) φαίνεται ότι ο τρόπος υπολογισμού της K είναι πάλι ίδιος με τις προηγούμενες περιπτώσεις όπου είχαμε αέρας/πορώδες μέσο ή αντίστροφα.

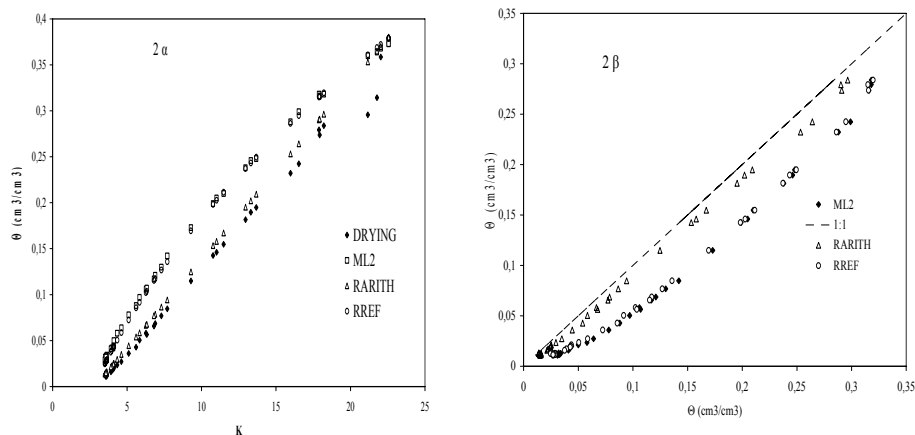
3.4 Σύστημα στρώσεων χωρίς απότομη μεταβολή της υγρασίας.

Όπως προκύπτει από την εξέταση των δεδομένων αλλά και από το Σχήμα 2(α) η σχέση Θ - K στην περίπτωση αυτή είναι γραμμική με πολύ υψηλό συντελεστή συσχέτισης $R^2=0.995$. Όπως προκύπτει από το Σχήμα 2(α) η πειραματική Θ - K βρίσκεται σαφώς πιο κοντά στο αριθμητικό καθεστώς (εξίσωση 7) των Robinson et al (2005).

Στην περίπτωση αυτή θεωρούμε ότι εντός του δείγματος διαμορφώνεται μία σύνθετη κατάσταση η οποία θα μοιάζει με εκείνη που διαμορφώνεται κατά την διάρκεια του διαστήματος μεταξύ των αρδεύσεων ενώ η προηγούμενη περίπτωση των δύο διακριτών στρώσεων με εκείνη κατά την διάρκεια της άρδευσης.

Στο Σχήμα 2β παρουσιάζονται και τα αποτελέσματα που δίνουν οι εξισώσεις (6) και (7), όπου φαίνεται ότι η εξίσωση (7) μπορεί να δώσει καλά αποτελέσματα για την περίπτωση όπου δεν έχουμε δύο διακριτές στρώσεις αλλά η σχέση Θ - K είναι γραμμική. Στην περίπτωση μας θεωρούμε ότι η τιμή της K στην ξηρή κατάσταση είναι 2.8. Συνεπώς για την εφαρμογή της απαιτείται μόνο η τιμή της K στον κορεσμό. Η εξίσωση

αυτή προτάθηκε από τους Robinson et al. (2005) σαν η πιθανότερη να ισχύει για την περίπτωση όπου η συχνότητα λειτουργίας του αισθητήρα είναι μικρότερη από 100 MHz όταν υπάρχουν δύο στρώσεις διακριτές. Φαίνεται όμως ότι αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για αισθητήρες με συχνότητα λειτουργίας 100 MHz και για πιο σύνθετες καταστάσεις.



Σχήμα 2: α). Η σχέση Θ - K για την περίπτωση της πιο σύνθετης περίπτωσης .DRYING: K μετρούμενη από την theta probe και Θ μετρούμενη ML2: K μετρούμενη από την theta probe και Θ υπολογισμένη RREF και RARITH: K μετρούμενη και Θ υπολογισμένη από τα δύο σχέδια του Robinson.

β) Η σχέση Θ_m – Θ όπου Θ είναι οι τιμές που προκύπτουν από την βιομηχανική βαθμονόμηση της συσκευής και τις εξίσώσεις του Robinson και Θ_m οι μετρούμενες τιμές της υγρασίας.

Θεωρούμε ότι η υπόθεση $\Theta - \sqrt{K}$ είναι γραμμική είναι η κυριότερη αιτία για την υπερεκτίμηση της Θ η οποία έχει παρατηρηθεί σε εργασίες [10] και [11] καθώς και στις περιπτώσεις των πορωδών μέσων που εξετάστηκαν στη δικιά μας περίπτωση. Η επίδραση της αλατότητας η οποία αναφέρθηκε από τους Cosh et al (2005) σαν πιθανή αιτία της υπερεκτίμησης της Θ δεν φαίνεται να ισχύει διότι στη δικιά μας περίπτωση η EC των δειγμάτων εκχυλίσματος κορεσμού ήταν αρκετά μικρή για να επηρεάζει την K . Ίσως και η υπερεκτίμηση της K από την ML2 σε σχέση με την τιμή της K από TDR που παρατήρησαν οι Robinson et al (1999) για την περίπτωση δειγμάτων ομοιογενούς υγρασίας να οφείλεται στο γεγονός ότι η ML2 δεν ακολουθεί ακριβώς το διαθλαστικό καθεστώς για αυτές τις περιπτώσεις αλλά κάτι ενδιάμεσο σε σχέση με το διαθλαστικό και το αριθμητικό καθεστώς. Το ζήτημα αυτό χρειάζεται όμως πιο λεπτομερή εξέταση. Λόγω του μήκους της συσκευής είναι ιδιαίτερα δύσκολο να φτιάξει κάποιος ένα σύστημα πολλών διακριτών στρώσεων ανάλογο με αυτό των Schaap et al (2003) για να εκτιμηθεί η συμπεριφορά της ML2 και σε αυτή την περίπτωση.

4.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τα πειραματικά δεδομένα που παρουσιάστηκαν φαίνεται ότι ο τρόπος υπολογισμού της K από τη συσκευή ML2 βρίσκεται πιο κοντά στο αριθμητικό καθεστώς. Στην περίπτωση του SL που εξετάστηκε η σχέση Θ - K είναι γραμμική. Θεωρούμε ότι ο τρόπος υπολογισμού της K είναι η κυριότερη αιτία υπερεκτίμησης της Θ από τη συσκευή ML2 στις περιπτώσεις ανομοιόμορφης υγρασίας. Η εξίσωση (7) των

Robinson et al. (2005) δίνει καλύτερα αποτελέσματα από την ML2 και μάλιστα πολύ κοντά στα πειραματικά δεδομένα ειδικά για τις περιπτώσεις της στράγγισης και των σύνθετων υγρασιακά προφίλ.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. D.A. Robinson, S.B. Jones, J.M. Blonquist and S.P. Friedman. 2005. A physical derived water content/permittivity calibration model for coarse – textured layered soils. Soil Sci. Soc. Am J. 69 (5): 1372-1377
2. G.C Topp, J.I. Davis and A.P. Annan. 1982. Electromagnetic determination of soil water content using TDR: I. Applications of wetting fronts and steep gradients. Soil Sci. Soc. Am J. 46: 672-678.
3. G.C Topp, J.I. Davis and A.P. Annan. 1980. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. Water Resour. Res. 16:574-582.)
4. C. Y. Chan and R. J. Knight 1999. Determining water content and saturation from dielectric measurements in layered materials. Water Res. Research 35 (1), 85-93.
5. C. Y. Chan and R. J. Knight. 2001. Laboratory measurements of electromagnetic wave velocity in layered sands. Water Res. Research 37 (4): 1099-1105.
6. M.G. Schaap, D.A. Robinson, S.P. Friedman, and A. Lazar. 2003. Measurement and modeling of the TDR signal propagation through layered dielectric media. Soil Sci. Soc. Am J. 67: 1113-1121.
7. Gaskin G. and Miler J.D. 1996. Measurement of soil water content using a simplified impedance measuring technique. J. Agric. Res. 63: 153-160
8. Miler J.D. and Gaskin G. 1997. The development and application of the thetaprobes soil water sensor. MLURI. Technical note.
9. H. Schack-Kirchner, T. Schmid and E. Hildebrand. 2005. High-resolution monitoring of surface-flow depth with frequency domain probes. Soil Sci. Soc. Am J. 69: 343-346.
10. Cosh M.H., Jackson T.J., Bindlish R., Famiglietti J.S., Ryu D. 2005. Calibration of an impedance probe for estimation of surface soil water content over large regions. Journal of Hydrology 311: 49-58.
11. Kargas G. and P. Kerkides 2007. Water content determination in mineral and organic porous media by ML2 theta probe. Irrigation and Drainage (In press).
12. Robinson D.A., Gardner C.M.K., Cooper J.D. 1999. Measurement of relative permittivity in sandy soils using TDR, capacitance and theta probes: comparison, including the effects of bulk soil electrical conductivity. Journal of Hydrology 223: 198-211

(146)

ΥΠΟΓΕΙΑ ΑΡΔΕΥΣΗ ΣΕ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΒΑΜΒΑΚΙΟΥ ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΔΟΣΕΙΣ ΑΡΔΕΥΣΗΣ

**Μ. Σακελλαρίου – Μακραντωνάκη, Χ. Παπανικολάου και Σ.
Πατελοδήμου**

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Σχολή Γεωπονικών Επιστ., Τμ. Γεωπονίας Φ. Π. & Α. Π.,
Οδός Φυτόκου, 38446, Ν. Ιωνία Μαγνησίας msak@uth.gr .

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα έτη 2004 και 2005 πραγματοποιήθηκε έρευνα στο αγρόκτημα του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, στην περιοχή Βελεστίνου, με σκοπό την μελέτη της επίδρασης των διαφορετικών δόσεων υπόγειας στάγδην άρδευσης στην ανάπτυξη και απόδοση της καλλιέργειας βαμβακιού. Χρησιμοποιήθηκαν δύο δόσεις άρδευσης. Η πρώτη (Α) ήταν ίση με το 100% της ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής ενώ η δεύτερη (Β) ήταν ίση με το 80% αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων έδειξαν ότι με τη Β μεταχείριση το νερό άρδευσης εφαρμόζεται αποδοτικότερα. Η συνολική παραγωγή κυμάνθηκε πάνω από το μέσο όρο της περιοχής ενώ παράλληλα εξοικονομήθηκε νερό και ενέργεια.

SUBSURFACE DRIP IRRIGATION IN COTTON WITH DIFFERENT WATER DEPTHS

M. Sakellariou – Makrantonaki, C. Papanikolaou and S. Patelodimou

University of Thessaly, Sch. of Agricultural Sc, Dept. of Agriculture Crop Prod. & Rural
Env., Fytokou Str, 38446, N. Ionia Magnesias msak@uth.gr .

ABSTRACT

During the years of 2004 and 2005, at the experimental farm of University of Thessaly, in Velestino, Volos, a research was conducted on studding the effect of subsurface drip irrigation with different water depths on cotton's growth and productivity. It was used two different water depths. The first water depth (A) was equal to 100% of daily evapotranspiration while the second one (B) was equal to 80% respectively. The results showed that the treatment B supplied irrigation water more efficiently. The total yield was over the average cotton production per ha of the region while water and energy were saved.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το φυσικό περιβάλλον διαταράσσεται διαρκώς τα τελευταία 50 χρόνια. Η εκβιομηχάνιση, η αστικοποίηση και η εντατικοποίηση της γεωργίας είναι οι κυριότεροι παράγοντες της διαταραχής του. Σημαντικότερη εκ των οποίων είναι η διαταραχή στο ισοζύγιο νερού [1]. Με την εφαρμογή υπόγειων μεθόδων άρδευσης μπορεί να επιτευχθεί εξοικονόμηση και αποδοτικότερη χρήση νερού καθώς και χρήση υγρών αστικών αποβλήτων [2, 3] ενώ παράλληλα η παραγωγή κυμαίνεται πάνω από το μέσο όρο της περιοχής.

Σκοπός αυτής της έρευνας διετούς διάρκειας ήταν η μελέτη και αξιολόγηση της επίδρασης της διαφορετικής δόσης άρδευσης, χρησιμοποιώντας σύστημα υπόγειας στάγδην άρδευσης, στα παραγωγικά χαρακτηριστικά της καλλιέργειας του βαμβακιού.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1. Ο αγρός και το σύστημα άρδευσης

2.1.1. Ο αγρός

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε στον πειραματικό αγρό του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, στο Βελεστίνο (γ.π. 39° 23', γ.μ. 22° 45') κατά τις καλλιεργητικές περιόδους 2004 και 2005. Σύμφωνα με την εδαφική ανάλυση και ταξινόμηση που έγινε από το Ινστιτούτο Χαρτογράφησης και Ταξινόμησης Εδαφών και του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας το έδαφος είναι πηλώδες ως προς τη μηχανική σύσταση και ανήκει στην υποομάδα των Typic Xerorthent των Entisols [4]. Η υδραυλική αγωγιμότητα του αγρού, σε βάθος 32, 63 και 88cm καθώς και οι άλλες υδραυλικές παράμετροι του εδάφους του πειραματικού αγρού όπως προσδιορίστηκαν στο εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής δίδονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Υδραυλικές παράμετροι του εδάφους

Βάθος	Τύπος	Φ.Ε.Β.	Υδατ/τητα	Σημ. Μόν. .Μάρ.	Υδραυλ. Αγωγ.
cm	Εδάφους	(gr/cm ³)	(%w)	(%w)	(cm/h)
0-32	L	1,25	20,9	11,48	0,38
32-63	SCL	1,23	21,2	11,64	0,19
63-88	L	1,21	21,5	11,81	0,33

2.1.2. Το σύστημα άρδευσης

Η κεφαλή του συστήματος άρδευσης περιελάμβανε έναν προγραμματιστή αυτόματης άρδευσης, υδρολιπαντήρα, φίλτρα, ηλεκτροβάνες για κάθε μεταχείριση και υδρομετρητές μέτρησης της συνολικής ποσότητας νερού άρδευσης των μεταχειρίσεων. Χρησιμοποιήθηκε συσκευή μέτρησης της εδαφικής υγρασίας T.D.R (Time Domain Reflectometry) και δύο αισθητήρες, ένας για κάθε μεταχείριση. Οι μετρήσεις της εδαφικής υγρασίας πραγματοποιούνταν μία μέρα πριν και μία ημέρα μετά την άρδευση. Το δίκτυο άρδευσης περιελάμβανε κύριο αγωγό μεταφοράς με διάμετρο 32mm και δύο δευτερεύοντες με διάμετρο 20mm. Το δίκτυο εφαρμογής περιλάμβανε σταλακτηφόρους σωλήνες από πολυαιθυλένιο διαμέτρου 20mm που απείχαν μεταξύ τους 1.9m. Ο σταλακτηφόρος αγωγός περιελάμβανε αυτοκαθαριζόμενους και αυτορυθμιζόμενους σταλακτήρες με ισαποχή 80cm (in line) και παροχή του κάθε σταλάκτη 2,3 l/h. Η δόση νερού ήταν ίση με το 100% της ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής για τη μεταχείριση Α (Y100%ET) και 80% της ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής για τη μεταχείριση Β (Y80%ET)

αντίστοιχα . Οι σταλακτηφόροι σωλήνες τοποθετήθηκαν σε κάθε δεύτερη γραμμή με τη χρήση υπεδαφοθέτη και σε βάθος 0,45m.

Για την αυτοματοποίηση της άρδευσης χρησιμοποιήθηκε αυτόματος προγραμματιστής τύπου Miracle, ο οποίος έχει τη δυνατότητα να διαχειρίζεται τις δυο ηλεκτροβάνες σε διάφορα προγράμματα άρδευσης. Κάθε ηλεκτροβάνη αντιστοιχούσε σε μια μεταχείριση. Το εύρος άρδευσης επιλέχθηκε να είναι δυο μέρες, έτσι ώστε η υγρασία στο ριζικό σύστημα να βρίσκεται συνέχεια πλησίον της υδατοϊκανότητας. Η εφαρμοζόμενη ποσότητα νερού κάθε άρδευσης καθορίστηκε με τη βοήθεια εξατμισιμέτρου τύπου A (Class A pan), με βάση την αθροιστική εξατμισοδιαπνοή από την προηγούμενη άρδευση [5, 6, 7].

2.2. Η καλλιέργεια

Τα πειραματικά τεμάχια είχαν πλάτος 4m (κάθετα στις γραμμές σποράς) και μήκος 14m (παράλληλα στις γραμμές σποράς) και περιελάμβανε 4 σειρές βαμβακιού οι οποίες απείχαν 0,95m μεταξύ τους σύμφωνα με τη συνήθη καλλιεργητική πρακτική και 14-16 φυτά ανά μέτρο κατά μέσο όρο. Χρησιμοποιήθηκε τυχαιοποιημένο σχέδιο συγκροτημάτων RCB με δύο μεταχειρίσεις σε τέσσερις επαναλήψεις. Η τυχαιοποίηση έγινε με τη χρήση των στατιστικών πινάκων. Για τη στατιστική επεξεργασία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος T-test για επίπεδο σημαντικότητας $P=0,05$. Οι μετρήσεις γινόνταν εβδομαδιαία από τις δύο μεσαίες σειρές για τη μείωση του πειραματικού σφάλματος λόγω αλληλεπιδράσεως από τα διπλανά πειραματικά τεμάχια.

Η κατεργασία του πειραματικού αγρού περιελάμβανε τις κλασικές εργασίες εδάφους που χρησιμοποιούνται στην περιοχή της Θεσσαλίας (Φθινοπωρινό όργωμα, Ανοιξιάτικη κατεργασία με σβολοκοπτικό). Η συνολική επιφανειακή λιπαντική αγωγή που εφαρμόστηκε ήταν σύμφωνα με τις γενικές αρχές και απαιτήσεις της καλλιέργειας του βαμβακιού για την περιοχή της Θεσσαλίας (Αζωτο: 14 λιπαντικές μονάδες, Φώσφορο: 7 λιπαντικές μονάδες και Κάλιο: 7 λιπαντικές μονάδες το 2004 και Αζωτο: 13 λιπαντικές μονάδες, Φώσφορο: 0 λιπαντικές μονάδες και Κάλιο: 5 λιπαντικές μονάδες το 2005) και πραγματοποιήθηκε κυρίως με υδρολίπανση.

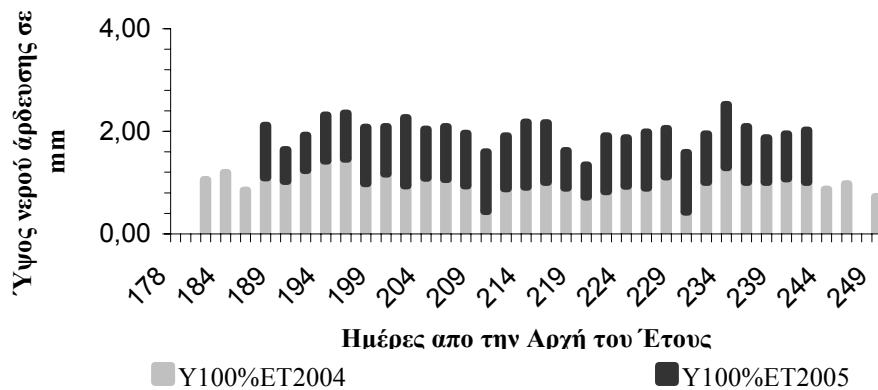
Η σπορά του βαμβακιού έγινε στις 15/5/2004 και στις 10/5/2005 με πνευματική μηχανή. Η ποικιλία που χρησιμοποιήθηκε ήταν η DELTA OPALO (Οπάλ). Η συγκεκριμένη ποικιλία επιλέχθηκε κυρίως επειδή καλλιεργείται στη Θεσσαλία σε μεγάλη έκταση. Τα χαρακτηριστικά της είναι το βαθύ ριζικό σύστημα, που την κάνει ανθεκτική στην ξηρασία, το έντονο πράσινο χρώμα και η μεγάλη ανάπτυξη και η αντοχή στην αδρομύκωση, στις ιασίδες και τους αλευρώδεις [8].

Η συγκομιδή έγινε με το χέρι στις 20/10/2004 και στις 22/10/2005 και 13/11/2005. Η δειγματοληψία αφορούσε μέτρηση παραγωγής και ποσότητας καταναλισκόμενου νερού. Ημερήσιες μετρήσεις κλιματολογικών στοιχείων (θερμοκρασίας και ταχύτητας ανέμου, βροχόπτωσης, προσπίπτοντος ηλιακού φωτός, ατμοσφαιρικής υγρασίας) πραγματοποιήθηκαν με τη βοήθεια του αυτόματου μετεωρολογικού σταθμού του αγροκτήματος για στατιστικούς κυρίως λόγους αλλά και για λόγους σύγκρισης και επαλήθευσης των οπτικών παρατηρήσεων από το εξατμισόμετρο τύπου A.

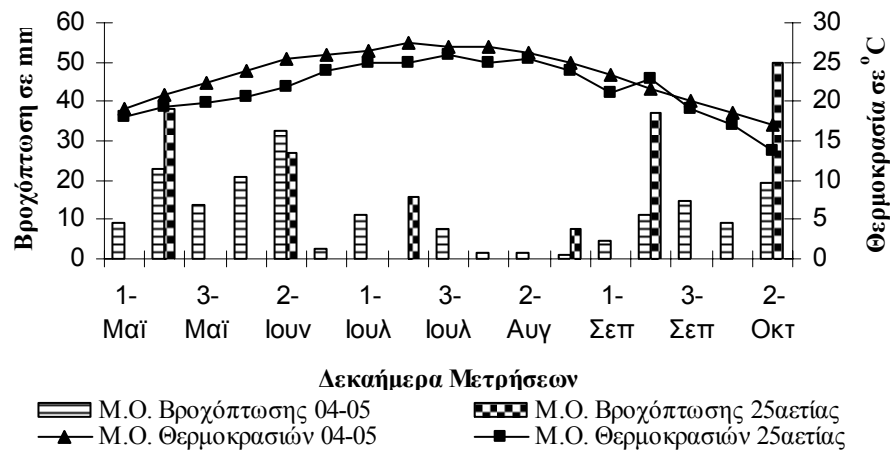
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1. Κλιματικά δεδομένα

Στο Σχήμα 1 δίνονται οι δόσεις άρδευσης της καλλιέργειας σε επίπεδο 100% της ημερήσιας εξάτμισης των καλλιεργητικών περιόδων 2004 και 2005. Στο Σχήμα 2 απεικονίζονται οι μέσοι όροι της βροχόπτωσης και των θερμοκρασιών για την ίδια χρονική περίοδο καθώς και οι αντίστοιχοι μέσοι όροι της τελευταίας 25αετίας.



Σχήμα 1. Δόση άρδευσης σε επίπεδο 100% της ημερήσιας εξάτμισης της διατείας 2004-2005.

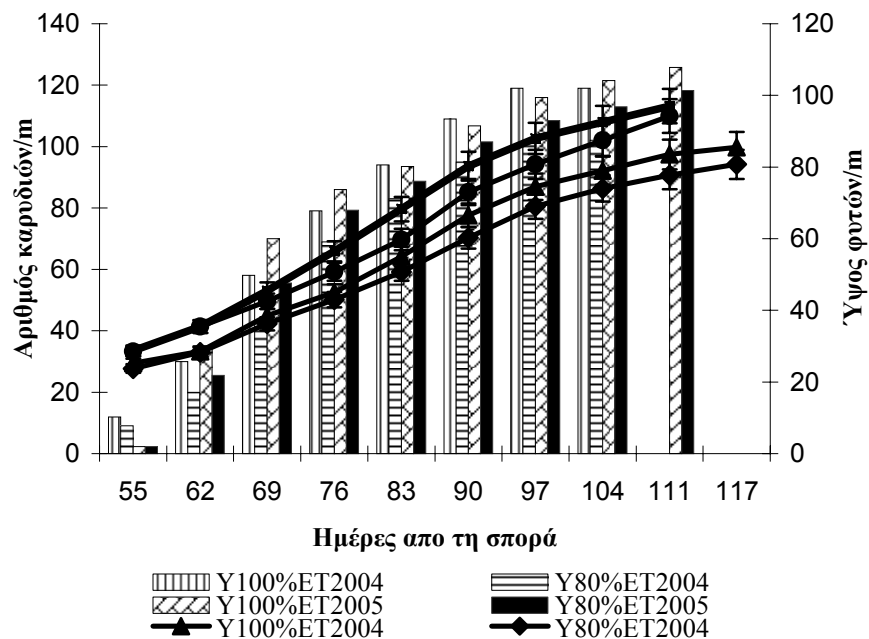


Σχήμα 2. Μέσοι όροι βροχόπτωσης και Θερμοκρασιών διατείας 2004-2005 και 25αετίας

3.2. Αξιολόγηση χαρακτηριστικών και τελικής παραγωγής βαμβακιού

Στο Σχήμα 3 απεικονίζεται η εξέλιξη του ύψους του κεντρικού βλαστικού στελέχους του βαμβακιού και του αριθμού καρυδιών ανά μέτρο σε σχέση με το χρόνο από την ημερομηνία σποράς για κάθε μια από τις δύο μεταχειρίσεις κατά τις δύο καλλιεργητικές περιόδους 2004-2005.

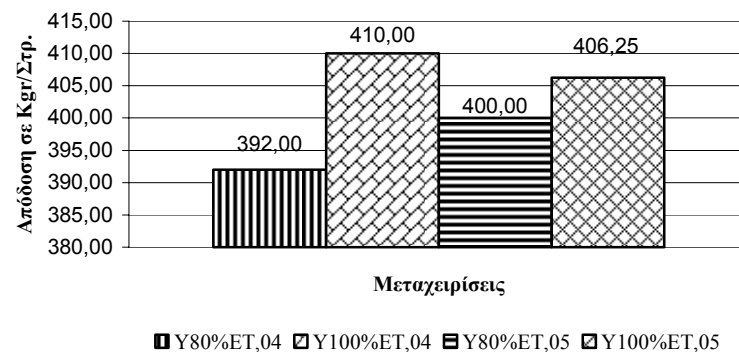
Στη τελική διαμόρφωση των υψών παρατηρείται μία τάση υπεροχής της μεταχείρισης Α έναντι της Β σε επίπεδο μέσων όρων τόσο κατά το 2004 όσο και κατά το 2005. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3, στα αρχικά στάδια της καλλιέργειας τα φυτά αναπτύσσονται ομοιόμορφα ενώ αρχίζει να διαφοροποιείται κατά το έκτο δεκαήμερο από τη σπορά. Αυτό οφείλεται στην σπορά ακριβείας, την ομοιομορφία φυτρώματος και την ίδια ποσότητα άρδευσης (όλα τα πειραματικά τεμάχια δέχτηκαν ως την έναρξη του προγράμματος άρδευσης ίδιες ποσότητες νερού που προέκυψαν από άρδευση με τη μέθοδο του καταιονισμού και από βροχοπτώσεις).



Σχήμα 3. Εξέλιξη του ύψους (γραμμές) και του αριθμού καρυδίων (στήλες) των βαμβακοφύτων κατά τα έτη 2004 και 2005.

Στο Σχήμα 4 δίνεται η τελική παραγωγή σε σύσπορο βαμβάκι τη διετία 2004-2005 χωρίς να περιλαμβάνονται απώλειες λόγω μηχανοσυλλογής οι οποίες ανέρχονται στο επίπεδο του 8% της παραγωγής [9]. Στη τελική διαμόρφωση του αριθμού των καρυδίων τη μεγαλύτερη επίδοση εμφανίζει η μεταχείριση Α, γεγονός αναμενόμενο αφού παρατηρήθηκε παραγωγή μεγαλύτερου αριθμού χτενιών ως συνέπεια και του μεγαλύτερου ύψους φυτών.

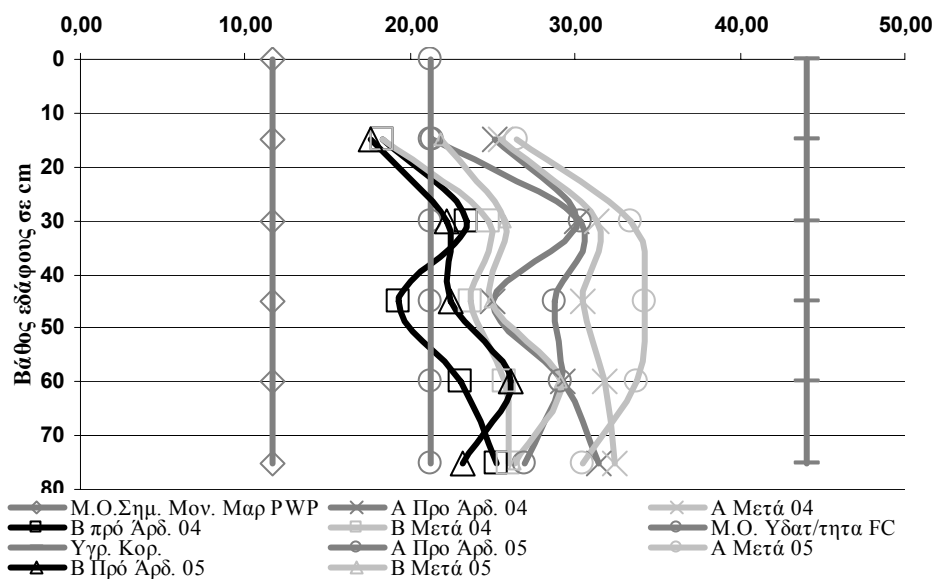
Μεταξύ των δύο μεταχειρίσεων, τάση μεγαλύτερης παραγωγής παρουσίασε η Α χωρίς να διαφέρει σημαντικά από την Β τόσο σε επίπεδο μέσων όρων διετίας όσο και κατά την καλλιεργητική περίοδο 2005. Ωστόσο το έτος 2004 η σημαντική διαφορά στην απόδοση μεταξύ των δύο μεταχειρίσεων οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι την περίοδο Σεπτεμβρίου 2004 παρατηρήθηκαν κάποιες βροχοπτώσεις που συνετέλεσαν σε τάσεις αναβλάστησης και ελλιπές γέμισμα του σπόρου, άρα μείωση του βάρους καρυδιού και της παραγωγής στη μεταχείριση Β. Στη μεταχείριση Α το φαινόμενο αυτό ήταν περιορισμένο λόγω του μεγαλύτερου αριθμού καρυδίων που παρήγαγε το φυτό. Γενικά κατά τις δειγματοληψίες καρυδίων παρατηρήθηκε ότι η μεταχείριση Α παρήγαγε μεγαλύτερο αριθμό καρυδίων αλλά με μικρότερο μέσο βάρος ενώ το αντίστροφο συνέβαινε με τη μεταχείριση Β. Η διαφορά αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι η πυκνότητα των ριζικών τριχιδίων ανά m^3 εδάφους αυξάνει όσο μειώνεται το ποσοστό άρδευσης [10].



Σχήμα 4. Τελική απόδοση της καλλιέργειας σε σύσπορο βαμβάκι τα έτη 2004-2005.

3.3. Διακύμανση εδαφικής υγρασίας και αποδοτικότητα νερού άρδευσης

Στο Σχήμα 5 φαίνεται η διακύμανση της εδαφικής υγρασίας στα διάφορα βάθη του εδάφους για κάθε μία καλλιεργητική περίοδο. Οι τιμές προέκυψαν από το μέσο όρο των τιμών της κάθε μέτρησης.



Σχήμα 5. Διακύμανσης εδαφικής υγρασίας στα διάφορα βάθη εδάφους .

Από το σχήμα φαίνεται ότι για τη μεταχείριση B, κατά μέσο όρο, η εδαφική υγρασία πριν και μετά την άρδευση διατηρήθηκε κοντά στην υδατοικανότητα σε όλη τη διάρκεια των δύο καλλιεργητικών περιόδων όπως άλλωστε ήταν και αρχικός στόχος (δηλ. να μην υποστεί έλλειψη νερού η καλλιέργεια). Στην περίπτωση της μεταχείρισης A η εδαφική υγρασία ήταν πάνω από την υδατοικανότητα χωρίς να δημιουργείται πρόβλημα κορεσμού του εδάφους και συνεπώς συνθήκες ασφυξίας για την καλλιέργεια.

Από την υδατοκατανάλωση και την παραγωγή που επιτεύχθηκε σε κάθε μεταχείριση προσδιορίστηκε η αποδοτικότητα χρήσης νερού [Αποδοτικότητα = Παραγωγή (Kg/Στρ.) / Συνολική ποσότητα νερού (mm)]. Στην υδατοκατανάλωση νερού

περιλαμβάνεται η συνολική ποσότητα νερού που εφαρμόστηκε συμπεριλαμβανομένης και της βροχής. Η αποδοτικότητα χρήσης νερού δίνεται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2. Αποδοτικότητα χρήσης νερού ($\text{Kgr} \cdot \text{Στρ.}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$)

Y100%ET 04	Y80%ET 04	Y100%ET 05	Y80%ET 05
0,91	0,98	0,88	0,99

3.4. Εξοικονόμηση νερού-ενέργειας, Οικονομική μελέτη και Συμπεράσματα

Η συνολική ποσότητα νερού που εφαρμόστηκε δίνεται στον Πίνακα 3.

Πίνακας 3. Συνολική ποσότητα νερού που εφαρμόστηκε τη διετία 2004-2005

Έτος	Καταιονισμός (mm)	Ωφ. Βροχ. (mm)	Προγ. Αρδ.100% (mm)	Προγ. Αρδ.80% (mm)	Συνολ. Νερ 100% (mm)	Συνολ. Νερ 80% (mm)
2004	0	187	266	213	453	400
2005	70	115	275	220	460	405

Στον Πίνακα 4 δίνονται τα στοιχεία οικονομικής μελέτης για τιμές υλικών του 2006, μέση τιμή πώλησης βαμβακιού 1€/Kgr και για αγρό 90 στρεμμάτων διαστάσεων 210m×429m περίπου.

Πίνακας 4. Παράδειγμα οικονομικής μελέτης για το έτος πρώτης εγκατάστασης.

Απαιτούμενα Υλικά	Ποσ/τα (Τεμ.)	Τιμή Μον. σε €	Δαπάνη σε €	Κέρδος Παραγωγής Α μεταχ/σης (Μ.Ο.)
Διόφθαλμα	151	1	151	408,13(Kgr/στρ.)*1
Υδρολιπαντήρας	2	250	500	(€/Kgr)≈408€/Στρ.
Φιλτ. Κεφαλής	2	750	1500	Κόστος Εγκατ/Στρ
Φιλτ.Σίτας	51	20	1020	≈238€/Στρ
Σταλ. Σωλήνας	151	84	12684	Κέρδος Επιφ/κής
Βαλβ. Εκτ/σης	3	100	300	Αρδ.
				100%ET(Μ.Ο.)
Κόστος χρήσης υπεδαφοθέτη	90στρ.	22€/στρ.	1980	385,63(Kgr/στρ.)*1
Σύνολο			18135	(€/Kgr)≈386€/Στρ.
Φ.Π.Α.			≈3265	Κόστος Εγκατ/Στρ
Γεν. Σύνολο			≈21400	≈210€/Στρ

Από τις μετρήσεις προέκυψε ότι στη μεταχείριση Β σημειώθηκε εξοικονόμηση νερού και ενέργειας χωρίς να επηρεαστεί σημαντικά η παραγωγή. Συγκεκριμένα δόθηκαν περίπου 217mm νερού και παράχθηκαν 396 kg/στρ. κατά μέσο όρο. Το σύστημα λειτούργησε για 42h λιγότερο σε σχέση με το αντίστοιχο που τροφοδοτούσε την μεταχείριση Α ενώ χορηγήθηκαν 54mm νερού λιγότερα εξοικονομώντας με αυτό τον τρόπο νερό και ενέργεια, προκαλώντας λιγότερες φθορές στον εξοπλισμό και άρα μειώνοντας το κόστος συντήρησης με κέρδος για τον παραγωγό περίπου 15€/στρ. στην πενταετία (ελάχιστο όριο ωφέλιμης λειτουργίας συστήματος υπόγειας άρδευσης) [11].

Το συνολικό κέρδος του παραγωγού σε βάθος πενταετίας είναι 97€/στρ. ($408 \times 5 + 170 + 15 - 176 - 4 \times 386 = 97$) ή 8730€ συνολικά. Σημειώνεται δε ότι η μελέτη

αναφέρεται στα έτη 2004-2005. Η αλλαγή στο καθεστώς πληρωμής του σύσπορου βαμβακιού (επιδότηση κατά στρέμμα και όχι κατά κιλό) που πραγματοποιήθηκε κατά το 2006 ίσως αλλάζει τα δεδομένα καθιστώντας μη συμφέρουσα την επένδυση για τον κοινό αγρότη, ωστόσο όμως για τον νέο αγρότη (που ευεργετείται από διάφορα προγράμματα) μια τέτοια επένδυση εξακολουθεί να παραμένει συμφέρουσα.

Συμπερασματικά η υπόγεια άρδευση κρίνεται γενικά συμφέρουσα γιατί :

- ✚ Παρατηρήθηκε τάση μειωμένης ανάπτυξης ζιζανίων.
- ✚ Παρατηρείται αποδοτικότερη χρήση των πρόσθετων θρεπτικών στοιχείων.
- ✚ Η μεταχείριση Β έχει ικανοποιητική απόδοση, εξοικονομώντας νερό και ενέργεια ενώ παράλληλα εφαρμόζει αποδοτικότερα το νερό άρδευσης.
- ✚ Η εδαφική υγρασία διατηρήθηκε στο επίπεδο της υδατοϊκανότητας (μεταχείριση Β) και λίγο πάνω από αυτή (μεταχείριση Α).
- ✚ Ευκολότερη διαχείριση ανάπτυξης (μεταχείριση Β) αφού δεν κρίνεται απαραίτητη η χρήση αναστολέων ανάπτυξης .

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Μπεόπουλος, Ν., Λουλούδης, Α, 1994. *Η αειφόρος ανάπτυξη*, υπό έκδοση βιβλίο, σελ. 24-27.
2. Sakellariou – Makrantonaki, M., Tzavela, E., Vyrilas, P. and Tzimopoulos , C., 2005. Wastewaters reuse through subsurface drip irrigation, *IASME Transactions*, 6(2):1071-1078.
3. Σακελλαρίου – Μακραντωνάκη, Μ., 2004. *Σημειώσεις αρδεύσεων*, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Θεσσαλίας, σελ.6.
4. 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, σελ. 21-41
5. Παπαζαφειρίου, Ζ., 1994. *Αρχές και πρακτική των αρδεύσεων*, Εκδόσεις Ζήτη, Αθήνα, σελ. 196-217.
6. Chang, Jen-hu, 1963. *Microclimate of sugarcane*, Hawaiian Planter's Record, USA, 56(2):195-225pp.
7. Doorenbos, J., and Pruitt, W., O., 1977. Crop water requirements, *Irrigation and Drainage FAO PaperNo24*, 144pp.
8. Andriotis, S., 2005. *Agricultural Supplies Trading*, <http://www.andriotis-seeds.gr>, 2pp.
9. Σφήκας, Γ., Α., 1995. *Ειδική Γεωργία II Βιομηχανικά φυτά*, Εκδόσεις Υπηρεσία Δημοσιευμάτων Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, σελ. 10-11.
10. Bhattarai, S., McHugh, J., Lotz, G. and Midmore D, 2003. Physiological responses of cotton to subsurface drip irrigation on heavy clay soil, <http://www.regional.org.au/au/asa/2003/p/4/bhattarai.htm>, 2pp.
11. Harris, G., A., 2005. Subsurface Drip Irrigation (SDI) – System Maintenance, <http://www2.dpi.qld.gov.au/fieldcrops/17653.html>.

(147)

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΣΤΑΓΔΗΝ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΣΕ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΖΑΧΑΡΟΤΕΥΤΛΩΝ

Μ. Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, Κ. Α. Δημοπούλου, Θ. Βούλγαρης

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σε πείραμα που εγκαταστάθηκε στο αγρόκτημα του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας τα έτη 2003 και 2004, μελετήθηκε η επίδραση της υπόγειας και της επιφανειακής στάγδην άρδευσης στα παραγωγικά χαρακτηριστικά καλλιέργειας ζαχαροτεύτλων. Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων έδειξε αύξηση του στρεμματοζαχάρου και μείωση της περιεκτικότητας των μελασογόνων συστατικών της ρίζας, καθώς και υψηλότερες τιμές εδαφικής υγρασίας σε μεγαλύτερα βάθη, κάτω από συνθήκες υπόγειας στάγδην άρδευσης.

SURFACE AND SUBSURFACE DRIP IRRIGATION COMPARISON STUDIES ON SUGAR BEET CROP

M. Sakellariou-Makrantonaki, K. A. Dimopoulou, Th. Boulgaris

University of Thessaly, Department of Agriculture, Crop Production and Rural
Environment, Laboratory of Agricultural Hydraulics, Fytokou Street, 38446 Nea
Ionia Magnesias, Greece. e-mail: roidimop@hotmail.com

ABSTRACT

In order to study the effects of surface and subsurface drip irrigation methods on sugar beet yield parameters, two field experiments were conducted in the farm of University of Thessaly during the growing seasons of 2003 and 2004. The results show high sucrose yield and reduction of melassigenic components in roots under subsurface drip irrigation. Also, under subsurface application, soil moisture values were higher with depth compared to surface drip.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η υπόγεια στάγδην άρδευση θεωρείται, ότι είναι η νεότερη και ενδεχομένως η πολυπλοκότερη και αποδοτικότερη μέθοδος άρδευσης [1]. Οι Carter & Howell [2], αναφέρουν την ύπαρξη υπόγειας άρδευσης σταλαγματιάς από το 1860, χωρίς όμως να έχει πρακτική εφαρμογή. Αρχικά το σύστημα υπόγειας άρδευσης χρησιμοποιήθηκε για την άρδευση καλλιεργειών μεγάλης αγρονομικής αξίας, όπως τα λαχανικά, τα φρούτα τα καρύδια, το ζαχαροκάλαμο. Όταν η αξιοπιστία και η μακροβιότητα του συστήματος βελτιώθηκε, η χρήση του επεκτάθηκε και σε καλλιέργειες μικρότερης αγρονομικής αξίας. Αυτό έγινε, κατά κύριο λόγο, γιατί το σύστημα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για περισσότερα έτη, μειώνοντας έτσι το ετήσιο κόστος άρδευσης [3].

Σημαντικά πλεονεκτήματα του συστήματος υπόγειας στάγδην άρδευσης είναι η μείωση των απωλειών λόγω εξάτμισης, η μηδενική απορροή [4], η εφαρμογή θρεπτικών ουσιών με μεγαλύτερη ακρίβεια [5], [1], η μείωση της αλατότητας στην περιοχή του ενεργού ριζοστρώματος [6], η δυνατότητα καλύτερου ελέγχου των ζιζανίων, η μείωση της εμφάνισης ασθενειών που ευνοούνται από την υγρασία στην επιφάνεια του εδάφους και γενικότερα η δημιουργία ευνοϊκότερων συνθηκών για το περιβάλλον του φυτού [7], [8], [9].

Τα κυριότερα μειονεκτήματα του συστήματος είναι το μεγάλο κόστος εγκατάστασης, η δυσκολία ελέγχου του υπογείου συστήματος και η απόφραξη των σταλακτιών από τα φερτά υλικά [10].

Οι Neibling & Gallian [8], αναφέρουν παραγωγή ζαχαρότευτλων κατά 10% περίπου αυξημένη κάτω από συνθήκες υπόγειας στάγδην άρδευσης συγκριτικά με το σύστημα του περιστροφικού αρδευτή (center pivot).

Οι Sakellariou – Makrantonaki et al., [11], σε προηγούμενη πειραματική διαδικασία, αναφέρουν αύξηση της υγρασίας στη ζώνη του ριζοστρώματος σε καλλιέργεια ζαχαρότευτλων και αύξηση του βάρους ριζών και του ζαχαρικού τίτλου κάτω από συνθήκες υπόγειας άρδευσης σε σύγκριση με την επιφανειακή.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η σύγκριση και αξιολόγηση της υπόγειας και επιφανειακής στάγδην άρδευσης όσον αφορά την επίδρασή τους στα παραγωγικά χαρακτηριστικά καλλιέργειας ζαχαροτεύτλων.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Η επίδραση στα παραγωγικά χαρακτηριστικά καλλιέργειας ζαχαροτεύτλων της υπόγειας και της επιφανειακής άρδευσης με σταγόνα σε ίδιες δόσεις εφαρμογής νερού, μελετήθηκε σε πείραμα αγρού στο αγρόκτημα του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας (Γ.Π. 39° 23', Γ.Μ. 22° 45' και υψόμετρο +50 m από την επιφάνεια της θάλασσας), κατά την καλλιεργητική περίοδο των ετών 2003 και 2004, σε έδαφος καλά στραγγιζόμενο, ασβεστούχο, ιλλο-αργιλοπηλώδες που ανήκει στην υπο-ομάδα των Typic Xerochrepts (USDA, 1975) [12]. Το πειραματικό σχέδιο ήταν Πλήρως Τυχαιοποιημένων Ομάδων με δύο μεταχειρίσεις Υπόγεια Στάγδην Άρδευση (ΥΣΑ) και Επιφανειακή Στάγδην Άρδευση (ΕΣΑ) σε τέσσερις επαναλήψεις. Η εφαρμοζόμενη ποσότητα ύδατος ήταν ίση με το 80% των αναγκών της καλλιέργειας με βάση τις υπολογιζόμενες τιμές της εξατμισοδιαπνοής και το εύρος άρδευσης ήταν τέτοιο, ώστε το άθροισμα των ημερησίων καθαρών αναγκών της καλλιέργειας να ισοδυναμεί με την υπολογιζόμενη δόση άρδευσης.

Οι σταλακτιφόροι αγωγοί του υπογείου και του επιφανειακού δικτύου ήταν από πολυαιθυλένιο διαμέτρου 20 mm. Οι σταλακτήρες ήταν αυτορυθμιζόμενοι και αυτοκαθαριζόμενοι, με ισαποχή 0,6 m επί των σταλακτιφόρων αγωγών και παροχή 3,6 l/h σε πίεση λειτουργίας από 0,5 έως 4,0 atm. Σε κάθε πειραματικό τεμάχιο

τοποθετήθηκαν τρεις σταλακτηφόροι αγωγοί σε απόσταση 1,5 m μεταξύ των. Τοποθετήθηκε μία ηλεκτροβάννα για κάθε μεταχείριση, ώστε να αυτοματοποιηθεί η έναρξη και διακοπή της άρδευσης και υδρομετρητές σε κάθε πειραματικό τεμάχιο. Οι ηλεκτροβάννες 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, βαλβίδα κενού, αγωγός επιστρεφόμενων, πιεζόμετρο κ.ά. Το υπόγειο δίκτυο τοποθετήθηκε σε βάθος 45cm από την επιφάνεια του εδάφους.

Ο προσδιορισμός της εδαφικής υγρασίας πριν και 2 ημέρες μετά από κάθε άρδευση έγινε με την μέθοδο T. D. R. (Time Domain Reflectometry). Η μέτρηση της εξάτμισης, απαραίτητης για τον υπολογισμό των αναγκών άρδευσης της καλλιέργειας, έγινε με την βοήθεια του εξατμισιμέτρου τύπου A. Η εκτίμηση του Δείκτη Φυλλικής Επιφάνειας πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του αυτόματου οργάνου εμβαδομέτρησης LI – COR. Η καταγραφή των μετεωρολογικών δεδομένων (ημερήσια θερμοκρασία του αέρα και βροχόπτωση) 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.

Σε κάθε πειραματικό τεμάχιο, συγκομίζονταν και αποκορυφώνονταν, με το χέρι, δύο γειτονικές γραμμές μήκους 3 m (επιφάνεια 3 m²). 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 υπεργείου (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 Ζαχαροτεύλων έτους 2003 και 2004 της Ελληνικής Βιομηχανίας Ζάχαρης Α.Ε.

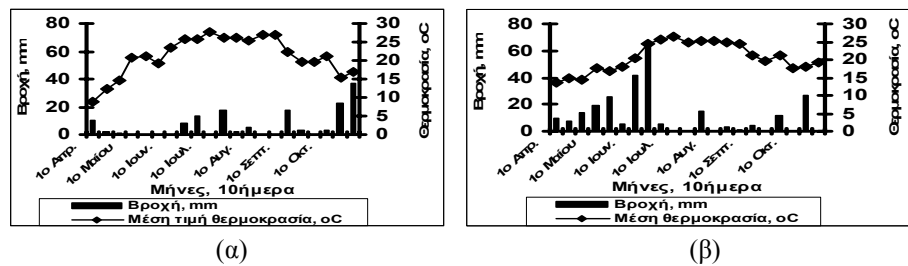
Έγινε σύγκριση των παραλλακτικότητων των τιμών των δύο μεταχειρίσεων χρησιμοποιώντας την F – κατανομή και εκτιμήθηκε η διαφορά των μέσων όρων με την βοήθεια του t – test σε επίπεδο σημαντικότητας 0,05. Επίσης, προσδιορίστηκαν οι τυπικές αποκλίσεις των τιμών των δύο μεταχειρίσεων, καθώς και η τυπική απόκλιση 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 σταλακτιών, ωριαίο ύψος ισοδύναμης βροχόπτωσης, διαστάσεις γραμμών άρδευσης και ισαποχή σταλακτιών επί των γραμμών) για την κάθε μεταχείριση χωριστά, με βάση τους μετρούμενους ρυθμούς ημερήσιας εξάτμισης.

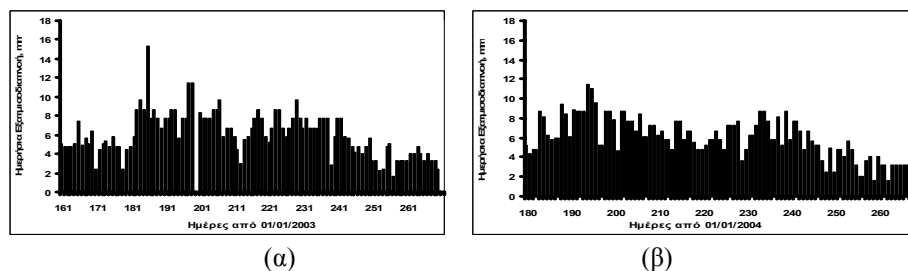
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ

3.1 Κλιματικά δεδομένα

Στα Σχήματα 1 και 2 παρουσιάζονται, ανά 10ήμερο, οι τιμές της βροχόπτωσης και της μέσης θερμοκρασίας του 24ώρου και η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας κατά την διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου για τα έτη 2003 και 2004 στην περιοχή του Βελεστίνου Μαγνησίας, όπου διεξήχθη το πείραμα.



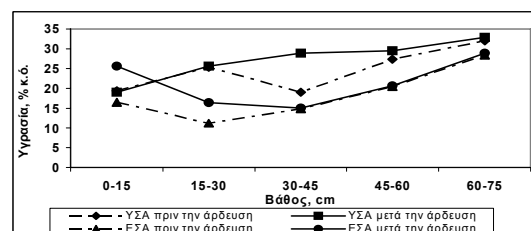
Σχήμα 1. Τιμές βροχόπτωσης και μέσης θερμοκρασίας 24ώρου ανά 10ήμερο κατά τη καλλιεργητική περίοδο των ετών 2003 (α) και 2004 (β).



Σχήμα 2. Ημερήσια εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας κατά την καλλιεργητική περίοδο των ετών 2003 (α) και 2004 (β).

3.2 Υγρασία εδάφους

Παρατηρήθηκε σαφής διαφοροποίηση του μετώπου της υγρασίας στο έδαφος ανάμεσα στις δύο μεταχειρίσεις. Στο Σχήμα 3 παρουσιάζονται ενδεικτικά τα μέτωπα εδαφικής υγρασίας των δύο μεταχειρίσεων κατά τις μετρήσεις στις 7/7/03 (πριν την άρδευση και 9/7/03 (μετά την άρδευση). Ανάλογα διαμορφώνονταν τα μέτωπα εδαφικής υγρασίας και στις υπόλοιπες μετρήσεις και στα δύο καλλιεργητικά έτη.



Σχήμα 3. Μέτωπα εδαφικής υγρασίας των δύο μεταχειρίσεων άρδευσης.

Στην ΥΣΑ η υγρασία την δεύτερη ημέρα μετά την άρδευση ήταν αυξημένη στο βάθος 30 – 60 cm, γύρω δηλαδή από το βάθος όπου έχουν τοποθετηθεί οι σταλάκτες, ενώ μειώνεται ελάχιστα κοντά στην επιφάνεια του εδάφους. Αυτό έχει ως συνέπεια, το χορηγούμενο νερό να είναι πιο εύκολα διαθέσιμο για πρόσληψη από τις ρίζες των φυτών. Αντίθετα, στην ΕΣΑ η υγρασία μετά την άρδευση αυξάνεται στο επιφανειακό στρώμα του εδάφους και μέχρι βάθους 45 cm ακολουθώντας φθίνουσα πορεία, ενώ δεν παρατηρείται καμία αξιόλογη μεταβολή σε μεγαλύτερα βάθη.

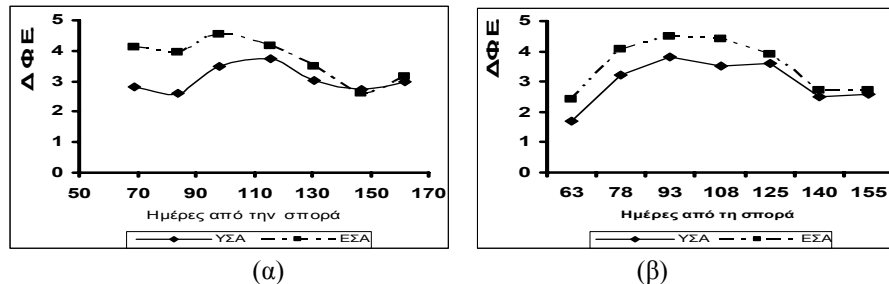
Επίσης, οι τιμές της μεταβολής της υγρασίας στη ΥΣΑ βρίσκονται πάνω από το σημείο μόνιμης μάρανσης ($PWP = 14,32 \text{ \% κ.ο.}$) και κοντά στην υδατοϊκανότητα ($FC=26,08 \text{ \% κ.ο.}$), ενώ δεν συμβαίνει το ίδιο στην ΕΣΑ. Αυτό δείχνει, ότι το τμήμα της

καλλιέργειας (πειραματικά τεμάχια), όπου εφαρμόστηκε η υπόγεια στάγδην άρδευση, δεν βρέθηκε ποτέ σε κατάσταση υδατικής καταπόνησης.

Τα αποτελέσματα αυτά έρχονται σε συμφωνία με την διαπίστωση των Neibling & Gallian [8], για την ικανότητα του συστήματος άρδευσης με υπόγειους σταλακτηφόρους αγωγούς να διατηρεί την εδαφική υγρασία στο βάθος των 30 – 45 cm, σε επίπεδα τέτοια ώστε η τιμή της να μην υπερβαίνει ποτέ τα 50 cbars (ένδειξη τενσιομέτρου), τιμή πάνω από την οποία το έδαφος χαρακτηρίζεται ξηρό στους περισσότερους τύπους εδαφών. Ανάλογη διαπίστωση αναφέρουν και οι Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη κ.ά., [13], μετά από πειραματική καλλιέργεια στην ίδια περιοχή.

3.3 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 (ΔΦΕ). Το 85-95% του προσπίπτοντος φωτός δεσμεύεται με ΔΦΕ μόνο 3 ή 4 [14], τιμή που επιτεύχθηκε και στις δύο μεταχειρίσεις. Πραγματοποιήθηκαν 7 μετρήσεις ανά 15ήμερο.



Σχήμα 4. Εξέλιξη του Δείκτη Φυλλικής Επιφάνειας κατά την ανάπτυξη της καλλιέργειας τα έτη 2003 (α) και 2004 (β).

Στο Σχήμα 4 φαίνεται η εξέλιξη του ΔΦΕ στις δύο μεταχειρίσεις. Στην υπόγεια στάγδην άρδευση (ΥΣΑ) η Φυλλική Επιφάνεια διατηρήθηκε σε χαμηλότερα επίπεδα σχεδόν μέχρι το χρόνο συγκομιδής.

3.4 Ποσότητα νερού άρδευσης

Η συνολική ποσότητα ύδατος που χορηγήθηκε μέσω άρδευσης ήταν 485,5 mm το έτος 2003 και 414,5 mm το έτος 2004, ποσότητα κατά 20% λιγότερη από τις ανάγκες της καλλιέργειας σε νερό που προσδιορίστηκαν βάση της εξατμισοδιαπνοής. Ένα επιπλέον ποσό ύδατος δέχθηκε η καλλιέργεια από βροχόπτωση κατά την διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου, το ωφέλιμο ύψος της οποίας ήταν ~82 mm το έτος 2003 και ~147 mm το έτος 2004. Πειραματικά αποτελέσματα της Ελληνικής Βιομηχανίας Ζάχαρης προσδιορίζουν τις συνολικές ανάγκες των ζαχαρότευτλων σε νερό με στόχο την οικονομικότερη απόδοση, σε 610 m³/στρ. στην πεδιάδα της Θεσσαλίας με διακύμανση περίπου ±10%, που οφείλεται στις μεταβολές του καιρού από χρόνο σε χρόνο [15].

3.5 Παραγωγικά αποτελέσματα

Η στατιστική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων παρουσιάζεται στους παρακάτω Πίνακες 1 και 2.

Πίνακας 1. Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία και F-test.

Παραγωγικά χαρακτηριστικά	ΥΣΑ				ΕΣΑ				F		Ρ _{0,05}	
	Μ.Ο.		Τυπική απόκλιση		Μ.Ο.		Τυπική απόκλιση					
	2003	2004	2003	2004	2003	2004	2003	2004	2003	2004	2003	2004
Αρ. Ριζών	10750	11500	569,1	1000	10750	11500	319,3	1000	3,1781	1,0000	0,3677	1,0000
Βάρος Φ+Κ	2521,5	2962,5	217,5	242,8	3004,3	3941,3	110,1	95,3	3,9062	6,4983	0,2926	0,1586
Βάρος Ριζών	7770,8	9833,8	535,8	291,8	7524,3	10888,8	776,4	1098,2	2,1000	14,1690	0,5579	0,0563
Ζαχ. Τίτλος	17,01	17,00	0,491	0,460	16,47	15,77	0,185	0,630	7,0427	1,8780	0,1432	0,6177
Στρ/ζάχαρο	1320,3	1671,70	61,6	74,72	1240,0	1713,82	132,5	135,44	4,6335	3,2853	0,2399	0,3547
Αξία αγοράς	453,05	573,96	17,47	32,03	418,75	564,42	45,706	41,40	6,8434	1,6703	0,1485	0,6838
Κάλιο	1109,07	1344,39	84,78	27,81	1203,48	1461,61	141,248	153,02	2,7757	30,2845	0,4241	0,0192
Νάτριο	307,77	346,77	40,34	40,25	335,24	401,41	33,695	57,88	1,4331	1,8595	0,7746	0,6231
α-amino N	442,81	307,52	16,86	40,79	466,93	327,13	27,664	55,90	2,6929	1,8780	0,4375	0,6177

Πίνακας 2. Σύγκριση των μέσων όρων με το t-test.

Παραγωγικά χαρακτηριστικά	t		Τυπική απόκλιση διαφοράς μέσων όρων		ΒΕ		P _{0,05}	
	2003	2004	2003	2004	2003	2004		
Αρ. Ριζών	0,0000	0,0000	235,4666	816,4966	3	3	1,0000	1,0000
Βάρος Φ+Κ	-6,8138	-13,2458	70,8489	73,8911	3	3	0,0065	0,0009
Βάρος Ριζών	0,4465	-1,8871	552,0840	559,0654	3	3	0,6855	0,1556
Ζαχαρικός Τίτλος	1,6742	2,8306	0,3210	0,4328	3	3	0,1927	0,0662
Στρεματοζάχαρο	0,9596	-0,4667	83,6305	90,2501	3	3	0,4081	0,6725
Αξία αγοράς	1,2369	0,2851	27,7339	33,4511	3	3	0,3041	0,7941
Κάλιο	-2,0246	-1,4657	46,6317	79,9779	3	3	0,1360	0,239
Νάτριο	-0,9522	-1,4461	28,8530	37,7837	3	3	0,4112	0,2439
α-amino N	-1,1950	-0,4571	20,1906	42,8856	3	3	0,3179	0,6786

Ο αριθμός ριζών/στρ. δεν παρουσίασε σημαντικές διαφορές ανάμεσα στις μεταχειρίσεις. 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% [16].

Μεγαλύτερο βάρος Φύλλων και Κορυφών (Kg/στρ.) εμφανίζεται στην μεταχείριση της επιφανειακής στάγδην άρδευσης (ΕΣΑ) και μάλιστα με στατιστικώς σημαντική διαφορά. Το αποτέλεσμα αυτό έρχεται σε συμφωνία και με τον μέσο όρο των τιμών από όλες τις μετρήσεις του ΔΦΕ, όπου στη μεταχείριση ΕΣΑ η τιμή είναι μεγαλύτερη.

Στην ΥΣΑ επιτεύχθηκε υψηλότερος ζαχαρικός τίτλος (°S) και κατά τα δύο έτη καλλιέργειας, χωρίς όμως να προκύπτει στατιστικώς σημαντική διαφορά, ενώ τα βάρη ριζών (Kg/στρ.) φαίνεται να κυμαίνονται στα ίδια περίπου επίπεδα μεταξύ των μεταχειρίσεων. Συνέπεια του υψηλότερου ζαχαρικού τίτλου της μεταχείρισης ΥΣΑ έναντι της ΕΣΑ, είναι η επίτευξη μεγαλύτερης αξίας αγοράς τεύτλων (€/στρ.) για την Υπόγεια μεταχείριση ακόμα και στην περίπτωση όπου το στρεματοζάχαρο (Kg ζάχαρη/στρ.) ήταν μεγαλύτερο στην ΕΣΑ το έτος 2004.

Η περιεκτικότητα των στοιχείων Κ, Να και α-αμίνo 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 [17]. Μεταξύ των μεταχειρίσεων δεν σημειώθηκαν στατιστικώς σημαντικές διαφορές, όσον αφορά τα μελασογόνα συστατικά (Πιν. 1, 2). Εν τούτοις, στην ΥΣΑ σημειώθηκαν μικρότερες τιμές στην περιεκτικότητα των μελασογόνων συστατικών στις ρίζες, γεγονός που χρήζει περαιτέρω διερεύνηση.

Σύμφωνα με τους Milford et al. [18], 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 [19] 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. [20], τα αποδεκτά όρια του α-αμίνου 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 Tsialtas & Maslaris [21], αναφέρουν συγκεντρώσεις K, Na και α-αμίνου N στις ρίζες των τεύτλων σε πολύ υψηλότερα επίπεδα από τα αποδεκτά όρια που αναφέρθηκαν. Ανάλογα είναι και τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Παρουσιάζεται σαφής διαφοροποίηση στο μέτωπο της εδαφικής υγρασίας σε σύγκριση υπόγειας και επιφανειακής στάγδην άρδευσης σε καλλιέργεια ζαχαροτεύτλων. Ο Δείκτης Φυλλικής Επιφάνειας διατηρήθηκε σε χαμηλότερα επίπεδα στην υπόγεια στάγδην άρδευση και το βάρος φύλλων και κορυφών κατά την συγκομιδή του πειράματος έδωσε στατιστικώς σημαντική διαφορά υπέρ της επιφανειακής μεθόδου. Στα υπόλοιπα παραγωγικά χαρακτηριστικά, παρά το γεγονός ότι δεν σημειώθηκαν στατιστικώς σημαντικές διαφορές, η υπόγεια στάγδην άρδευση οδήγησε σε επίτευξη υψηλότερης αξίας αγοράς τεύτλων, λόγω του υψηλότερου ζαχαρικού τίτλου. Η περιεκτικότητα των μελασογόνων συστατικών στις ρίζες ήταν λίγο μικρότερη στην υπόγεια μεταχείριση και δεδομένου του ρόλου τους στην διαδικασία της κρυστάλλωσης, το αποτέλεσμα αυτό απαιτεί περαιτέρω διερεύνηση.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Phene, J. C. (1999). Subsurface drip irrigation. Part I: Why and How? *Irrigation Journal*. April 1999.
2. Carter, A. and Howell, J. (2000). *An Overview of drip irrigation*. Department of Plant and Soil Sciences, University of Massachusetts. Also available in <http://www.umassdroughtinfo.org>
3. Camp, R. C., Lamm R. F., Evans, G. R. and Phene, J. C. (2000). Subsurface drip irrigation – Past, Present and Future. *Proceedings of the 4th Decennial National Irrigation Symposium*, Nov. 14-16, Phoenix AZ. pp 363-372.
4. Zoldoske, F. D., Genito, S. and Jorgensen, S. G. (1995). *Subsurface Drip Irrigation (SDI) on Turfgrass*: A University Experience. CATI Publication #950104.
5. Lamm, R. F., Schlegel, J. A. and Clark, A. G. (1997). Optimum nitrogen fertigation for corn using SDI. *A condensation of ASAE Paper No. 972174, Nitrogen Fertigation for Corn Using SDI: A BMP*, first presented at the ASAE International Meeting, August 10-14, Minneapolis, Minnesota.
6. Al-Omran, M. A., Sheta, S. A., Falatah, M. A. and Al-Harbi, R. A. (2005). Effect of drip irrigation on squash (*Cucurbita pepo*) yield and water-use efficiency in sandy calcareous soils amended with clay deposits. *Agricultural Water Management*, 73 (1), p.43-55, Apr 2005.
7. Jorgensen, G. (1995). *Subsurface drip irrigation eyed as aid in weed control*. CATI Publication #950701.
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. Bell, A. A., Liu, L., Reidy, B., Davis, M. R. and Subbarao, V. K. (1998). Mechanismus of Subsurface Drip Irrigation-Mediated Suppression of Lettuce Drop Caused by *Sclerotinia minor*. *Phytopathology*, 1998.
10. Vyrlas, P., 1992. *Blockage due to suck-back in buried inline trickle emitters*. MSc Thesis, Silsoe College, Cranfield University, U.K.
11. Sakellariou-Maktantonaki, M., Kalfountzos, D. and Vyrlas, P. (2002). Water saving and yield increase of sugar beet with subsurface drip irrigation. *Global Nest: The International Journal*. 4 (2-3), pp 85-91.
12. 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.
13. Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, Μ., Καλφούντζος, Δ. και Παπανίκος, Ν. (2000). Αξιολόγηση της επιφανειακής και υπόγειας στάγδην άρδευσης σε καλλιέργεια ζαχαρότευτλων. *Πρακτικά 2^{ου} Εθνικού Συνεδρίου Εταιρείας Γεωργικών Μηχανικών Ελλάδος (ΕΓΜΕ)*, 28-30 Σεπτεμβρίου, Βόλος, σελ. 157-164.
14. Scott, K. R. and Jaggard, W. K. (1993). Crop physiology and agronomy. In D. A. Cooke and R. K. Scott (Eds.) *The Sugar Beet Crop*. pp. 179-237. Chapman & Hall, London, UK.
15. Ελληνική Βιομηχανία Ζάχαρης ΑΕ (1997). *Το πότισμα των ζαχαροτεύτλων*, σελ. 24.
16. Ελληνική Βιομηχανία Ζάχαρης ΑΕ (2001). *Ανοιξιιάτικη προετοιμασία χωραφιού και σπορά τεύτλων*, σελ. 8.
17. Harvey, W. C. and Dutton, V. J. (1993). Root quality and processing. In D. A. Cooke and R. K. Scott (Eds.) *The Sugar Beet Crop*. pp. 571-617. Chapman & Hall, London, UK.
18. 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.
19. Barbanti, L. (1994). New methods of recommending N-fertilizer use to sugar bet in the Mediterranean area. In Anonymous, eds. *Proceedings of the 57th IIRB Congress*, Brussels, pp. 281-294. International Institute for Beet Research, Brussels, Belgium.
20. Palmer, M. and Casburn, C. (1985). *Amino nitrogen analyses – factory experiences*. British Sugar Beet Review 53, pp 73-76.
21. Tsialtas, T. J. and Maslari, N. (2005). 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*. 191 (5), p. 330-339.

(150)

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΚΟΠΤΟΜΕΝΗΣ ΣΤΑΓΔΗΝ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΣΤΗΝ ΠΡΟΩΘΗΣΗ ΤΟΥ ΜΕΤΩΠΟΥ ΔΙΑΒΡΟΧΗΣ ΚΑΙ ΣΤΙΣ ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΝΕΡΟΥ ΛΟΓΩ ΒΑΘΙΑΣ ΔΙΗΘΗΣΗΣ

Ε. Διαμαντόπουλος, Σ. Ελμαλόγλου

Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών – Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και
Γεωργικής Μηχανικής - Εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής., Ιερά Οδός 75 - 11855,
Αθήνα, e-mail: stathis.diamantopoulos@gmail.com, elma@aau.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η επίδραση της διακοπτόμενης στάγδην άρδευσης στην προώθηση του μετώπου διαβροχής και στις απώλειες λόγω βαθιάς διήθησης. Τα αριθμητικά αποτελέσματα δείχνουν ότι για το ίδιο έδαφος, την ίδια παροχή και για χρόνο ίσο με το χρόνο άρδευσης η κατακόρυφη συνιστώσα του μετώπου διαβροχής είναι μεγαλύτερη στη περίπτωση της διακοπτόμενης άρδευσης. Παρόλα αυτά, οι διαφορές αυτές πρακτικά εξαλείφονται για μεγαλύτερους χρόνους. Επίσης στο χρόνο που αντιστοιχεί στο εύρος άρδευσης η βαθιά διήθηση στη διακοπτόμενη στάγδην άρδευση είναι ελαφρώς μικρότερη από ότι στη συνεχή.

EFFECT OF PULSE IRRIGATION ON THE WETTING FRONT AND ON WATER LOSSES BY DEEP PERCOLATION UNDER DRIP IRRIGATION

E. Diamantopoulos, S. Elmaloglou

Agricultural University of Athens - Department of Natural Resources Management &
Agricultural Engineering., Iera Odos 75 - 11855 Athens, Greece, e-mail:
stathis.diamantopoulos@gmail.com, elma@aau.gr

ABSTRACT

In this study, the effect of pulse drip irrigation on the wetting front advance patterns and on water losses by deep percolation is presented. The numerical results show that for the same soil, the same discharge rate and for time equal to irrigation duration the vertical component of the wetting front was dipper in the case of pulse irrigation. These different was practically eliminated for a longer time. Also, for time equal to irrigation duration deep percolation was slightly inferior using pulse irrigation than using continuous irrigation.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η άρδευση με σταγόνες χρησιμοποιείται στις μέρες μας σε μεγάλη κλίμακα και με μεγάλη επιτυχία. Το πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι η διαβροχή ενός μικρού μόνο όγκου εδάφους σε μικρή απόσταση από το αρδευόμενο φυτό. Στη στάγδην άρδευση είναι πολύ σημαντικό να γνωρίζουμε το αποτέλεσμα της μεθόδου άρδευσης (συνεχής ή διακοπτόμενη) στη προώθηση του μετώπου διαβροχής καθώς επίσης και στις απώλειες λόγω βαθιάς διήθησης. Στη βιβλιογραφία υπάρχει ένας αρκετά μεγάλος αριθμός εργασιών οι οποίες ασχολούνται με μαθηματικά μοντέλα προσομοίωσης της συνεχούς στάγδην άρδευσης. [1, 2, 4, 6, 8, 9, 12, 14, 15, 18, 19, 21, 22, 23]. Σε αντίθεση με τις παραπάνω εργασίες, υπάρχουν λίγες οι οποίες εξετάζουν την διακοπτόμενη άρδευση. Οι Levin et al. (1979) [10] και οι Mostaghimi et al. (1981) [11] μελέτησαν την επίδραση της παροχής και της διακοπτόμενης άρδευσης από επιφανειακή σημειακή πηγή στην δυναμική του εδαφικού νερού. Επίσης, οι Cote et al. (2003) [5] μελέτησαν την επίδραση που έχει η διακοπτόμενη άρδευση στο μέτωπο διαβροχής σε περίπτωση άρδευσης από υπόγεια σημειακή πηγή. Όλες οι παραπάνω εργασίες οι οποίες ασχολούνται με τη διακοπτόμενη άρδευση δεν λαμβάνουν υπόψη την εξάτμιση του νερού από την επιφάνεια του εδάφους, καθώς επίσης και τη πρόσληψη του εδαφικού νερού από τις ρίζες του αρδευόμενου φυτού.

Στη παρούσα εργασία εξετάζεται η επίδραση της διακοπτόμενης άρδευσης στη προώθηση του μετώπου διαβροχής καθώς επίσης και στις απώλειες του νερού κάτω από το ριζόστρωμα λόγω βαθιάς διήθησης. Το φυσικό φαινόμενο προσομοιώνεται με ένα μαθηματικό μοντέλο αξονικής συμμετρίας [6]. Η μερική διαφορική εξίσωση που το περιγράφει επιλύεται αριθμητικά με τη πεπλεγμένη μέθοδο εναλλασσομένων διευθύνσεων [13].

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Η παρακάτω ανάλυση στηρίζεται σε αριθμητικά αποτελέσματα από ένα μαθηματικό μοντέλο επιφανειακής σημειακής άρδευσης το οποίο λαμβάνει υπόψη την εξάτμιση του νερού από την επιφάνεια του εδάφους και τη πρόσληψη του εδαφικού νερού από τις ρίζες. Οι υποθέσεις που λαμβάνονται υπόψη ήταν αυτές του ομογενούς εδάφους και της απουσίας του φαινομένου της υστέρησης.

2.1. Υδροδυναμικά χαρακτηριστικά των υπό μελέτη εδαφών

Η εφαρμογή του μοντέλου γίνεται σε δύο εδάφη από τη βάση δεδομένων Rosetta [16], ένα πηλοαμμώδες (loamy sand) και ένα ιλυώδες (silt).

Οι αντίστοιχες τιμές των παραμέτρων που περιέχονται στις αναλυτικές εκφράσεις των σχέσεων $\theta(H)$ και $K(H)$ του Van Genuchten (1980) [20] συνοψίζονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Τιμές των παραμέτρων που υπεισέρχονται στις σχέσεις $\theta(H)$ και $K(H)$ για τα δύο υπό εξέταση εδάφη [16]

Soil	α (1/cm)	n	θ_s (cm ³ /cm ³)	θ_r (cm ³ /cm ³)	K_s (cm/h)
loamy sand	0.03467	1.7378	0.390	0.049	4.383
silt	0.0066	1.6596	0.489	0.05	1.819

σε τρεις διαφορετικούς χρόνους (t_i , 24h, t_{end}) για τα ίδια εδάφη και για τις δύο παροχές. Η διάρκεια της άρδευσης t_i μεταβάλλεται ανάλογα με τη παροχή (Πίνακας 2).

Πίνακας 2. Συνδυασμοί παροχής και διάρκεια άρδευσης			
Παροχή σταλακτήρα (l/h)	Διάρκεια άρδευσης (h)		Δόση άρδευσης (mm)
	Συνεχής	Διακοπτόμενη	
2	3.24	6.24	18
4	1.62	2.62	18

Ο συνολικός χρόνος προσομοίωσης t_{end} ορίζεται ως ο χρόνος που χρειάζεται για να επανέλθει η μέση υγρασία στο ριζόστρωμα (από $z=0$ έως 48cm) στην αρχική τιμή της.

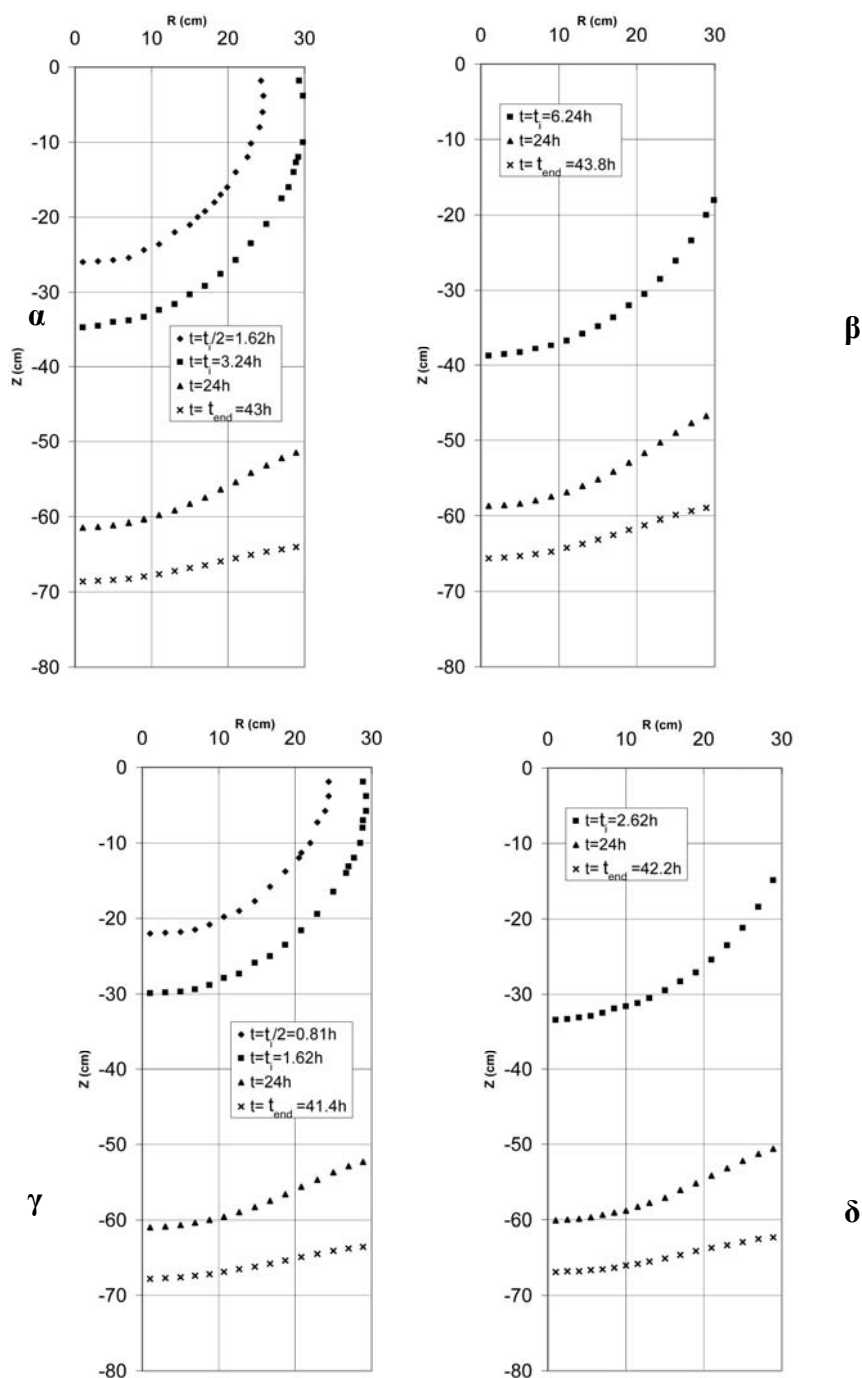
Από τα Σχήματα 2 και 3, για την ίδια παροχή και για χρόνο ίσο με t_i , φαίνεται ότι το νερό κινείται πιο γρήγορα προς τα κάτω για το πιο ελαφρύ έδαφος και στις δύο περιπτώσεις.

Από τα ίδια σχήματα και για χρόνο ίσο με t_i φαίνεται ότι η κατακόρυφη συνιστώσα του μετώπου διαβροχής είναι μεγαλύτερη για την περίπτωση της μικρής παροχής από ότι της μεγαλύτερης. Το συμπέρασμα αυτό είναι σε συμφωνία με τα αποτελέσματα των εργασιών [3,6]. Από τα Σχήματα 2 και 3 παρατηρείται ότι για χρόνο ίσο με το χρόνο άρδευσης, η διακοπτόμενη άρδευση έχει σαν αποτέλεσμα βαθύτερη κίνηση της κατακόρυφης συνιστώσας του μετώπου διαβροχής. Παρόλα αυτά για χρόνο μεγαλύτερο από το χρόνο άρδευσης οι διαφορές μεταξύ της συνεχούς και της στάγδην άρδευσης εξαφανίζονται.

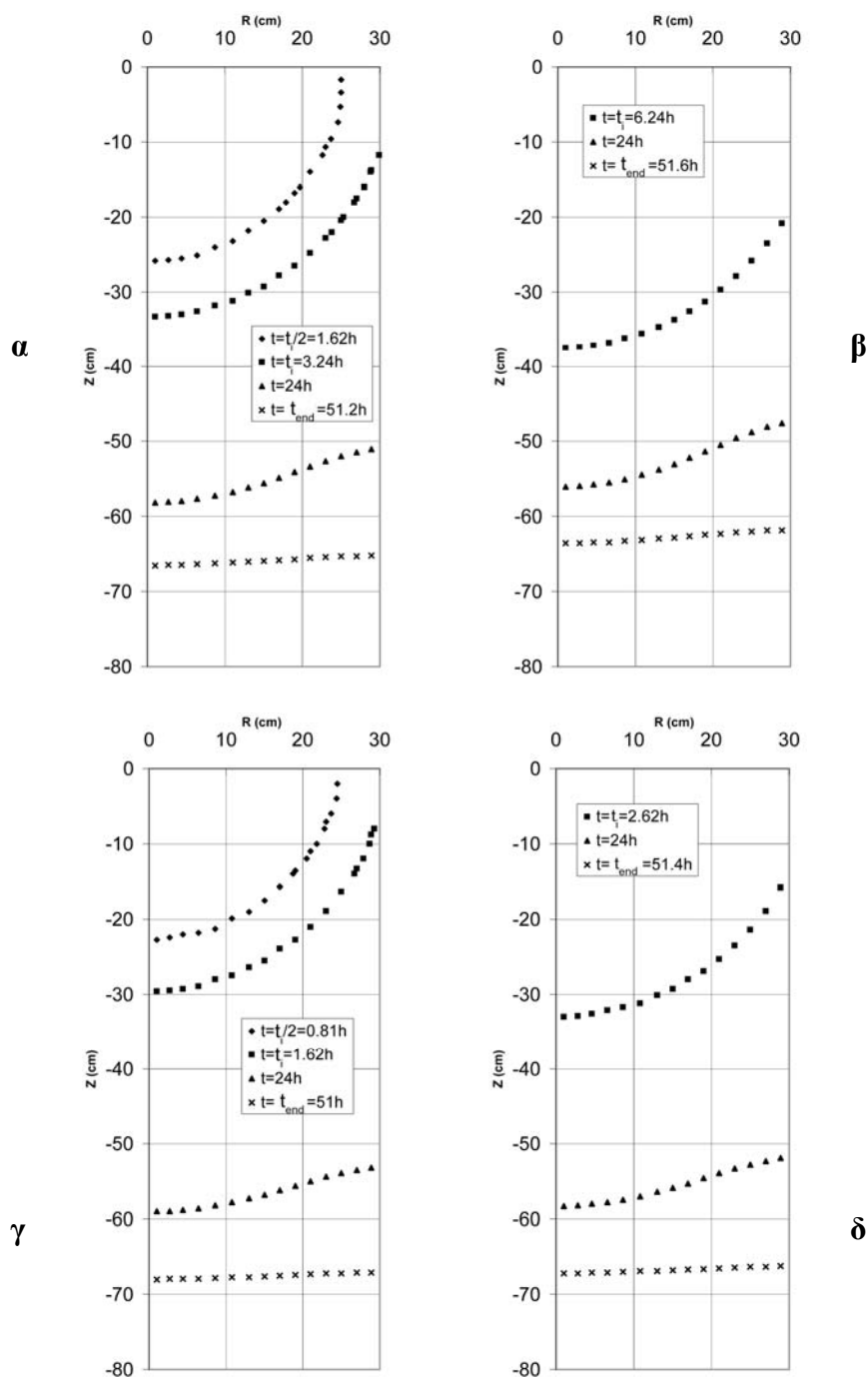
Στον Πίνακα 3 δίνεται η βαθιά διήθηση στο χρόνο t_{end} κάτω από το ριζόστρωμα (48cm) σαν ποσοστό του εφαρμοζόμενου ύψους νερού, για τα δύο εδάφη και για τις δύο παροχές.

Πίνακας 3. Ύψος βαθιάς διήθησης για την περίπτωση συνεχούς και διακοπτόμενης άρδευσης ως ποσοστό του εφαρμοζόμενου ύψους νερού.				
Παροχή σταλακτήρα (l/h)	Συνεχής άρδευση		Διακοπτόμενη άρδευση	
	loamy sand	silt	loamy sand	silt
2	12.0	5.1	10.6	4.5
4	11.5	5.5	11.2	5.3

Οι απώλειες λόγω βαθιάς διήθησης φαίνεται καθαρά ότι είναι μεγαλύτερες στο ελαφρύ από ότι στο βαρύτερο έδαφος. Από τον ίδιο πίνακα φαίνεται ότι η διακοπτόμενη άρδευση μειώνει ελάχιστα τις απώλειες από βαθιά διήθηση. Η μείωση αυτή κυμαίνεται από 1.4-0.2%. Τα αποτελέσματα αυτά έρχονται σε αντίθεση με τα αποτελέσματα της εργασίας [10], στην οποία οι συγγραφείς βρήκαν μια σημαντική μείωση (14%) της βαθιάς διήθησης κάτω από τα 60cm, δώδεκα ώρες από την έναρξη της άρδευσης για



Σχήμα 2. Μέτωπο διαβροχής για διάφορους χρόνους για το έδαφος loamy sand ($Q=21/h$): (α) συνεχής άρδευση; (β) διακοπτόμενη άρδευση ($Q=41/h$): (γ) συνεχής άρδευση; (δ) διακοπτόμενη άρδευση



Σχήμα 3. Μέτωπο διαβροχής για διάφορους χρόνους για το έδαφος silt ($Q=21/h$): (α) συνεχής άρδευση; (β) διακοπτόμενη άρδευση ($Q=41/h$): (γ) συνεχής άρδευση; (δ) διακοπτόμενη άρδευση

την περίπτωση της διακοπτόμενης άρδευσης. Η διαφορά αυτή μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι η προσομοίωση τους δεν περιελάμβανε την εξάτμιση του νερού από την επιφάνεια του εδάφους καθώς επίσης και τη πρόσληψη του εδαφικού νερού από τις ρίζες των φυτών. Επίσης το έδαφος που χρησιμοποίησαν και για τα πειραματικά και για τα αριθμητικά τους αποτελέσματα ήταν πολύ περατό ($K_s=45\text{cm/h}$).

4.ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

10. Ben-Asher, J., Lomen, D.O., Warrick, A.W., 1978. Linear and nonlinear models of infiltration from a point source. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 42: 3-6.
11. Brandt, A., Bresler, E., Diner, N., Ben-Asher, J., Heller, J., Goldberg, D., 1971. Infiltration from a trickle source, 1. Mathematical models. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 35 (5): 675-682.
12. Bresler, E., Heller, J., Diner, N., Ben-Asher, J., Brandt, A., Goldberg, D., 1971. Infiltration from a trickle source, 2. Experimental data and theoretical predictions. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 35 (5): 683-689.
13. Coelho, F.E., Or, D., 1996. A parametric model for two-dimensional water uptake intensity by corn roots under drip irrigation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 60: 1039-1049.
14. Cote, C.M., Bristow, K.L., Charlesworth, P.B., Cook, F.J., Thorburn, P.J., 2003. Analysis of soil wetting and solute transport in subsurface trickle irrigation. *Irrig. Sci.*, 22: 143-156.
15. Elmaloglou, S., Malamos, N., 2006. A methodology for determining the surface and vertical components of the wetting front under a surface point source, with root water-uptake and evaporation. *Irrig. and Drain.*, 55(1): 99-111.
16. Elmaloglou, S., Diamantopoulos, E., 2007. Wetting front advance patterns and water losses by deep percolation under the root zone as influenced by pulsed drip irrigation. *Agric. Water Manage.*, 90: 160-163.
17. Healy, R.W., Warrick, A.W., 1988. A generalized solution to infiltration from a surface point-source. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 52 (5): 1245-1251.
18. Lafolie, F., Guennelon, R., van Genuchten, M.Th., 1989. Analysis of water flow under trickle irrigation:1.Theory and numerical solution. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 53 (5): 1310-1318.
19. Levin, I., Van Rooyen, P.C., Van Rooyen, F.C., 1979. The effect of discharge rate and intermittent water application by point-source irrigation on the soil moisture distribution pattern. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 43: 8-16.
20. Mostaghimi, S., Mitchell, J.K., Lembke, W.D., 1981. Effect of pulsed trickling on moisture distribution patterns in heavy soils. Paper No. 81-2553, *ASAE*, St. Joseph, MI.
21. 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.
22. Peaceman, D.W., Rachford, H.M., 1955. The numerical solution of parabolic and elliptic differential equations. *J. Soc. Ind. Appl. Math.*, 3: 24-41.
23. Revol, P., Vachaud, G., Vauclin, M., Clothier, B.E., 1997. Infiltration from a surface point source and drip irrigation, 1.The midpoint soil water pressure. *Water Resour. Res.*, 33: 1861-1867.
24. Revol, P., Clothier, B.E., Mailhol, J.-C., Vachaud, G., Vauclin, M., 1997. Infiltration from a surface point source and drip irrigation, 2.An approximate time-dependent solution for wet-front position. *Water Resour. Res.*, 33: 1869-1874.
25. Schaap M.G. and Leij, L.J. 1998. Database-related accuracy and uncertainty of pedotransfer functions. *Soil Sci.*, 163: 765-779.

(153)

ΑΠΛΕΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΤΙΚΕΣ ΛΥΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΔΙΗΘΗΣΗ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΕ ΑΚΟΡΕΣΤΟ ΕΛΑΦΟΣ

Α. Λουκάς

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πεδίον
Αρεως, 38334, Βόλος, aloukas@civ.uth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή, η μη γραμμική παραβολική διαφορική εξίσωση, που περιγράφει την οριζόντια ροή σε ακόρεστο έδαφος, μετασχηματίστηκε με την βοήθεια του μετασχηματισμού Boltzmann. Η πρώτη προτεινόμενη λύση είναι η αριθμητική επίλυση της μετασχηματισμένης εξίσωσης με την μέθοδο Runge-Kutta 4^{ης} τάξης. Εναλλακτικά, προτάθηκαν προσεγγιστικές λύσεις θεωρώντας ότι η καμπύλη του αδιάστατου συντελεστή διάχυσης προσεγγίζεται με μια ευθεία ή με ένα πολυώνυμο. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι προτεινόμενες μέθοδοι υπολογίζουν αξιόπιστα, εύκολα και γρήγορα το προφίλ της εδαφικής υγρασίας σε ακόρεστο έδαφος.

SIMPLE AND APPROXIMATE SOLUTIONS FOR THE HORIZONTAL ABSORPTION OF WATER IN UNSATURATED SOIL

A. Loukas

University of Thessaly, Polytechnic School, Dept. of Civil Engineering, Pedion Areos,
38334 Volos, aloukas@civ.uth.gr

ABSTRACT

In this work, the non-linear parabolic partial differential equation, which describes the horizontal diffusion of water in unsaturated soil, was transformed using the Boltzmann transformation. The first proposed solution is the numerical solution of the transformed equation with the method of Runge-Kutta of 4th order. Alternatively, approximate solutions were proposed assuming that the curve of the dimensionless diffusion coefficient is approximated by a line or a polynomial curve. The results indicated that the proposed solutions estimate accurately and easily the profile of soil moisture in a unsaturated soil.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το φαινόμενο της οριζόντιας διήθησης του νερού σε ακόρεστο έδαφος δεν συναντάται συχνά στην πρακτική της άρδευσης. Είναι, περισσότερο, μια απλούστευση του φαινομένου της κατακόρυφης διήθησης, το οποίο προσεγγίζει την πραγματικότητα. Παρόλα αυτά η οριζόντια διήθηση χρησιμοποιείται για τη διερεύνηση του φαινομένου της κατακόρυφης διήθησης, στο οποίο η επίδραση της βαρύτητας είναι σημαντική και ο συνυπολογισμός της υποχρεωτικός.

Το φαινόμενο που αντιμετωπίζεται στη παρούσα εργασία είναι η μονοδιάστατη οριζόντια ακόρεστη ροή με συντελεστή διάχυσης εκθετικής μορφής. Θεωρείται ότι το μέσο είναι ομογενές, ισότροπο, και ότι η πίεση του αέρα στους πόρους είναι ίση με την ατμοσφαιρική πίεση. Η εξίσωση που περιγράφει το φαινόμενο είναι η μη-γραμμική παραβολική εξίσωση:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \quad (1)$$

με αρχική συνθήκη:

$$x > 0 \quad t = 0 \quad \theta = \theta_o$$

και οριακή συνθήκη:

$$x = 0 \quad t > 0 \quad \theta = \theta_s$$

όπου θ είναι η υγρασία κατ'όγκο, t είναι ο χρόνος, D είναι ο συντελεστής διάχυσης, x είναι η απόσταση, θ_o είναι η αρχική υγρασία το μέσου, και θ_s είναι η υγρασία στο κορεσμό.

Στο παρελθόν έχουν παρουσιασθεί αριθμητικές, ημιανλυτικές και αναλυτικές λύσεις προβλημάτων οριζόντιας διήθησης (π.χ. [1], [2], [3], [4], [5]). Οι αριθμητικές λύσεις βασίζονται κύρια στις μεθόδους των πεπερασμένων στοιχείων και διαφορών για τη επίλυση των διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν το φαινόμενο της οριζόντιας διήθησης. Στις ημιανλυτικές λύσεις χρησιμοποιούνται είτε η μέθοδος των μικρών διαταραχών είτε η ανάπτυξη μεταβλητών σε σειρές ώστε να μετασχηματισθούν σε γραμμικές οι εξισώσεις του φαινομένου και να προσεγγισθούν αριθμητικά. Τέλος, οι αναλυτικές λύσεις είναι πολύ περιορισμένες λόγω της έντονης μη-γραμμικότητας των εξισώσεων που περιγράφουν το φαινόμενο.

Στην εργασία αυτή, θεωρείται ότι ο συντελεστής διάχυσης είναι εκθετικής μορφής δηλαδή:

$$D(\theta) = D_o e^{\beta(\theta - \theta_o)} \quad (2)$$

όπου D_o είναι ο συντελεστής διάχυσης που αντιστοιχεί στην αρχική υγρασία θ_o και β είναι η σταθερά του μέσου.

Ένας συνήθης μετασχηματισμός που γίνεται για την επίλυση της Εξ. (1) είναι ο μετασχηματισμός Boltzmann:

$$n = \frac{x}{\sqrt{D_o t}} \quad (3)$$

Με τη βοήθεια το μετασχηματισμού Εξ. (3) αυτού η Εξ. (1) γίνεται:

$$-\frac{n}{2} \frac{d\theta}{dn} = \frac{d}{dn} \left(\frac{D}{D_o} \frac{d\theta}{dn} \right) \quad (4)$$

με συνθήκες:

$$\begin{aligned} n=0 & \quad \theta = \theta_s \\ n \rightarrow \infty & \quad \theta = \theta_o \end{aligned}$$

Εισάγοντας τον αδιάστατο συντελεστή διάχυσης, $\bar{D}(\theta) = \frac{D(\theta)}{D_o}$ και λαμβάνοντας

υπόψη ότι ισχύει $\frac{d\bar{D}}{dn} = \beta \bar{D} \frac{d\theta}{dn} \Rightarrow \frac{d\theta}{dn} = \frac{1}{\beta \bar{D}} \frac{d\bar{D}}{dn}$ η Εξ. (4) μπορεί να γραφεί:

$$-\frac{n}{2} \frac{d\bar{D}}{dn} = \bar{D} \frac{d^2 \bar{D}}{dn^2} \quad (5)$$

με συνθήκες:

$$\begin{aligned} n=0 & \quad \bar{D} = \bar{D}_s \\ n \rightarrow \infty & \quad \bar{D} = 1 \end{aligned}$$

Η Εξ. (5) ισχύει μόνο για σχέση $D(\theta)$ εκθετικής μορφής. Για την επίλυση της Εξ. (5) χρησιμοποιήθηκαν διάφορες αριθμητικές και προσεγγιστικές μέθοδοι. Η πρώτη μέθοδος που προτείνεται περιλαμβάνει την αριθμητική επίλυση της μετασχηματισμένης εξίσωσης με την μέθοδο Runge-Kutta 4^{ης} τάξης, με εκτίμηση της αρχικής κλίσης της καμπύλης του αδιάστατου συντελεστή διάχυσης. Εναλλακτικά, προτείνονται προσεγγιστικές λύσεις θεωρώντας ότι η καμπύλη του αδιάστατου συντελεστή διάχυσης προσεγγίζεται με μια ευθεία ή με ένα πολυώνυμο. Τα αποτελέσματα των προταθέντων μεθόδων συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα τεσσάρων μεθόδων που αναφέρονται στη διεθνή βιβλιογραφία και για πέντε τύπους εδαφών.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.1. Αριθμητική επίλυση – Μέθοδος Runge-Kutta

Για την επίλυση της διαφορικής εξίσωσης (5) χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Runge-Kutta 4^{ης} τάξης. Σύμφωνα με την μέθοδο αυτή, η λύση της εξίσωσης προκύπτει για διαδοχικά βήματα, $\Delta\eta = h$, σύμφωνα με την παρακάτω διαδικασία:

$$\bar{D}_{n+1} = \bar{D}_n + \frac{1}{6}(K_1 + 2 \cdot K_2 + 2 \cdot K_3 + K_4) \quad (6)$$

όπου,

$$K_1 = h \cdot f(n_n, \bar{D}_n)$$

$$K_2 = h \cdot f\left(n_n + \frac{h}{2}, \bar{D}_n + \frac{K_1}{2}\right)$$

$$K_3 = h \cdot f\left(n_n + \frac{h}{2}, \bar{D}_n + \frac{K_2}{2}\right)$$

$$K_4 = h \cdot f(n_n + h, \bar{D}_n + K_3)$$

$$\text{όπου } f(n, \bar{D}) = \frac{d\bar{D}}{dn}$$

Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται ταυτόχρονα και για τον υπολογισμό της $f(n, \bar{D}) = \frac{d\bar{D}}{dn}$, με τη βοήθεια της δεύτερης παραγώγου του $\bar{D}$, η οποία προκύπτει από την Εξ. (5) ότι είναι ίση με $\frac{d^2\bar{D}}{dn^2} = -\frac{n}{2 \cdot \bar{D}} \frac{d\bar{D}}{dn}$.

Η μέθοδος Runge-Kutta 4^{ης} τάξης έχει χρησιμοποιηθεί σε παρόμοια προβλήματα, όπως στο πρόβλημα της μονοδιάστατης εξίσωσης του Boussinesq [6], η οποία περιγράφει τη ροή του υπόγειου υδροφορέα. Το πρόβλημα με τη μέθοδο αυτή είναι ότι για την επίλυση του προβλήματος απαιτείται να είναι γνωστή η τιμή της κλίσης της καμπύλης του αδιάστατου συντελεστή διάχυσης, $\bar{D}$, στην αρχή του πεδίου, $n=0$, δηλαδή η τιμή $\left. \frac{d\bar{D}}{dn} \right|_{n=0} = a$. Για να επιλυθεί το πρόβλημα, έγιναν επαναλήψεις ώστε να προσεγγιστεί η τιμή της αρχικής κλίσης, a , στο δεύτερο δεκαδικό με έλεγχο της τιμής του $\bar{D}$, στο πέμπτο δεκαδικό στοιχείο, στο άπειρο ($n \rightarrow \infty, \bar{D} = 1$). Κατά τις επαναλήψεις αυτές, δίνοντας τιμές μικρότερες της πραγματικής αρχικής κλίσης, a , τότε το προφίλ δεν τείνει στην τιμή $\bar{D} = 1$ για $n \rightarrow \infty$, αλλά σε μια τιμή μεγαλύτερη της μονάδας. Αντίθετα, δίνοντας τιμές στην αρχική κλίση μεγαλύτερες του a τότε το προφίλ γίνεται περίπου κατακόρυφο και η μεταβλητή $\bar{D}$ παίρνει αρνητικές τιμές.

Επίσης, στη μέθοδο αυτή χρειάζεται να προσεχθεί το βήμα ολοκλήρωσης, h , ιδιαίτερα στη περιοχή που η καμπύλη $\bar{D}(n)$ προσεγγίζει τη τιμή 1. Στη περιοχή αυτή η κλίση της καμπύλης αλλάζει γρήγορα και απαιτείται μικρότερο βήμα. Στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκε βήμα ολοκλήρωσης $h = \Delta n = 0.1$, για τη περιοχή από $n = 0$ έως $n = \frac{n_k}{2}$ και βήμα $h = \Delta n = 0.01$, για τη περιοχή από $n = \frac{n_k}{2}$ έως $n \rightarrow \infty$, όπου n_k είναι το σημείο καμπής της καμπύλης της υγρασίας $\theta(n)$.

Από τη λύση της Εξ. (5) γίνεται γνωστή η συνάρτηση $\bar{D}(n)$ και η συνάρτηση $\theta(n)$ αφού ισχύει:

$$\bar{D}(\theta) = e^{\beta(\theta - \theta_o)} \Rightarrow \theta = \frac{\ln \bar{D}}{\beta} + \theta_o \quad (7)$$

2.2. Εκτίμηση της αρχικής κλίσης της $\bar{D}(n)$

Για την προσεγγιστική εκτίμηση της αρχικής κλίσης της καμπύλης του αδιάστατου συντελεστή διάχυσης, $\bar{D}(n)$, διερευνήθηκε αρχικά η επίλυση της Εξ. (4) στο σημείο καμπής του προφίλ υγρασίας, $n = n_k$. Η Εξ. (4) για τη θέση $n = n_k$ μπορεί να γραφεί ως:

$$-\frac{n}{2} \frac{d\theta}{dn} \Big|_{n_k} = \frac{d\bar{D}}{dn} \frac{d\theta}{dn} \Big|_{n_k} + \bar{D} \frac{d^2\theta}{dn^2} \Big|_{n_k} \quad (8)$$

Επειδή το σημείο $n = n_k$ είναι σημείο καμπής του προφίλ υγρασίας, ο δεύτερο όρος του δεξιού μέλους της Εξ. (8) γίνεται ίσο με το μηδέν. Αντικαθιστώντας, $\bar{D}_k(\theta) = e^{\beta(\theta_k - \theta_o)}$, υποθέτοντας ότι το σημείο καμπής του προφίλ υγρασίας είναι το καταληκτικό σημείο του μετώπου υγρασίας, όπως έχει παρατηρηθεί σε πειράματα ([7], [8], [9]) και ολοκληρώνοντας την Εξ. (8) προκύπτει ότι $\left. \frac{d\bar{D}}{dn} \right|_{n_k} = -\frac{n_k}{2}$,

$$-\frac{n_k}{2} = \beta \bar{D}_k \left. \frac{d\theta}{dn} \right|_{n_k}, \quad \theta_k = \theta_o + \frac{1}{\beta} \quad \text{και} \quad \bar{D}_k = e.$$

Με τη βοήθεια της παραπάνω διερεύνησης και λύσεων μπορεί να λυθεί το αντίστροφο πρόβλημα από την Εξ. (5) με διαφορετικές συνθήκες. Δηλαδή:

$$-\frac{n}{2} \frac{d\bar{D}}{dn} = \bar{D} \frac{d^2 \bar{D}}{dn^2} \quad (9)$$

με συνθήκες:

$$\begin{aligned} n = 0 & \quad \bar{D} = \bar{D}_s = \mu \\ n = n_k & \quad \bar{D} = e \quad \left. \frac{d\bar{D}}{dn} \right|_{n_k} = -\frac{n_k}{2} \end{aligned}$$

Κάνοντας τον μετασχηματισμό $y = n - n_k$ η Εξ. (9) γίνεται:

$$-\frac{y}{2} \frac{d\bar{D}}{dy} = \bar{D} \frac{d^2 \bar{D}}{dy^2} \quad (10)$$

με συνθήκες:

$$\begin{aligned} y = -n_k & \quad \bar{D} = \bar{D}_s = \mu \\ y = 0 & \quad \bar{D} = e \quad \left. \frac{d\bar{D}}{dy} \right|_{y=0} = -\frac{n_k}{2} \end{aligned}$$

Με τη βοήθεια του προγράμματος που έχει αναπτυχθεί είναι δυνατόν να λυθεί το αντίστροφο πρόβλημα της Εξ. (10). Έτσι δίνοντας τιμές στο n_k βρίσκονται τιμές για το

$\bar{D} = \mu$ και για την αρχική κλίση $\left. \frac{d\bar{D}}{dn} \right|_{n=0} = a$. Από τα διαδοχικά ζευγάρια τιμών που

προκύπτουν από την επίλυση της Εξ. (10), υπολογίζονται τα $\frac{n_k^2}{\mu}$ και $\frac{\mu}{a^2}$. Τα

ζευγάρια τιμών $\left(\frac{n_k^2}{\mu}, \mu \right)$ και $\left(\frac{\mu}{a^2}, \mu \right)$ τοποθετούνται σε ημι-λογαριθμικό χαρτί γιατί

το μ παίρνει μεγάλες τιμές. Οι εμπειρικές καμπύλες που δημιουργούν τα ζευγάρια των τιμών αυτών προσεγγίζονται με βέλτιστη προσαρμογή. Οι αναλυτικές σχέσεις των καμπυλών αυτών είναι:

$$\frac{n_k^2}{\mu} = \frac{2.323}{\ln \mu - 0.702} \quad (11)$$

με $R^2=0.998$ και μέσο τετραγωνικό σφάλμα ίσο με 0.003 και

$$\frac{\mu}{a^2} = \frac{1.933}{\ln \mu - 0.802} \quad (12)$$

με $R^2=0.999$ και μέσο τετραγωνικό σφάλμα ίσο με 0.001.

Έτσι με τη βοήθεια των δύο αυτών εξισώσεων μπορεί να προσεγγισθούν το σημείο καμπής του προφίλ υγρασίας, $n = n_k$, και η αρχική κλίση της καμπύλης του αδιάστατου συντελεστή διάχυσης, α , αν είναι γνωστή η τιμή $\bar{D} = \bar{D}_s = \mu$. Οι τιμές, n_k και α , που προκύπτουν με τη μέθοδο αυτή είναι προσεγγίσεις και όχι οι πραγματικές τιμές. Η εκτίμηση της αρχικής κλίσης της καμπύλης του αδιάστατου συντελεστή διάχυσης, α , όμως, με τη παραπάνω προσέγγιση μειώνει τον αριθμό των επαναλήψεων που απαιτούνται με την αριθμητική επίλυση της Εξ. (5), όπως αναπτύχθηκε προηγουμένως.

2.3. Προσεγγίσεις της $\bar{D}(n)$

Η καμπύλη του αδιάστατου συντελεστή διάχυσης, $\bar{D}(n)$, μπορεί να προσεγγιστεί με μία ευθεία από το σημείο $n = 0$, $\bar{D} = \bar{D}_s$ και έως το σημείο $n = n_k$, $\bar{D} = e$. Η εξίσωση της προσεγγιστικής ευθείας που βρίσκεται από την επίλυση είναι:

$$\bar{D} = \frac{e - \bar{D}_s}{n_k} n + \bar{D}_s \quad (13)$$

Μια άλλη προσέγγιση, καλύτερη από την ευθεία, είναι η καμπύλη με μορφή του πολωνώμου της Εξ. (14):

$$\bar{D} = \bar{D}_s + \lambda \cdot n + \delta \cdot n^v \quad (14)$$

Οι τιμές των παραμέτρων, λ και δ , της Εξ. (14) υπολογίζονται από τις συνθήκες,

$$n = n_k \quad \bar{D} = e, \text{ και}$$

$$n = n_k \quad \left. \frac{d\bar{D}}{dn} \right|_{n_k} = -\frac{n_k}{2}$$

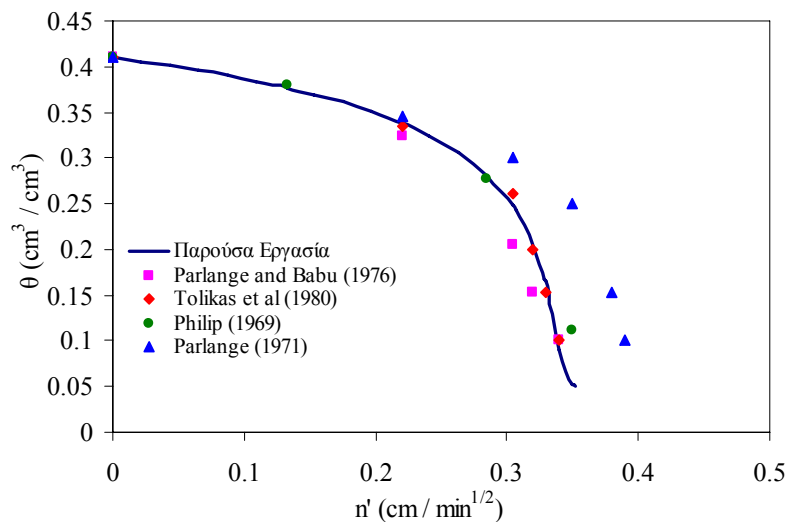
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Οι μεθοδολογίες που αναπτύχθηκαν προηγουμένως εφαρμόστηκαν για την επίλυση της Εξ. (5) για πέντε τύπους εδαφών. Τα χαρακτηριστικά των εδαφών αυτών παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 1).

Τα αποτελέσματα των προτεινομένων μεθοδολογιών συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα αναλυτικών και ημι-αναλυτικών λύσεων που έχουν προταθεί στη διεθνή βιβλιογραφία [1], [2], [3], [4]. Στο Σχήμα 1 συγκρίνεται η λύση για τη σχέση $\theta(n)$ που υπολογίστηκε με τη μέθοδο της αριθμητικής ολοκλήρωσης Runge-Kutta 4^{ης} τάξης χρησιμοποιώντας διαδοχικές προσεγγίσεις για την τιμή της αρχικής κλίσης της καμπύλης του αδιάστατου συντελεστή διάχυσης, $\bar{D}(n)$, για το έδαφος Sarpy loam, με άλλες λύσεις που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία.

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικές παράμετροι εδαφών

Τύπος Εδάφους	β	θ_s (cm ³ /cm ³)	θ_o (cm ³ /cm ³)	$\beta(\theta_s - \theta_o)$ (cm ³ /cm ³)	D_s (cm ² /min)	$D_o \times 10^{-3}$ (cm ² /min)	$\bar{D}_s = \frac{D_s}{D_o}$
Sarpy loam	17.5	0.41	0.05	6.30	0.261	0.48	543.75
Yolo clay loam	20.7	0.42	0.04	7.86	1.49	0.57	2641.04
Columbia silt loam	21.7	0.34	0.05	6.30	2.63	4.83	544.51
Hanford silt	24.6	0.35	0.012	8.31	3.89	0.95	4094.73
Fresno fine sand	26.3	0.31	0.007	7.97	13.24	4.6	2878.26



Σχήμα 1. Σύγκριση του υπολογισμένου προφίλ υγρασίας για τις διάφορες μεθόδους για το έδαφος Sarpy loam

Παρόμοια αποτελέσματα έχουν βρεθεί και για τους άλλους τέσσερις τύπους εδαφών. Ο παρακάτω πίνακας (Πίνακας 2) παρουσιάζει τη σύγκριση του σημείου καμπής του προφίλ υγρασίας για τους πέντε τύπους εδαφών. Παρατηρείται ότι η αριθμητική ολοκλήρωση με τη μέθοδο Runge-Kutta 4^{ης} τάξης παρέχει αποτελέσματα που βρίσκονται πολύ κοντά στις λύσεις που έχουν προταθεί από τους Tolikas et al. [4] και Philip [1] ενώ απέχουν από τα αποτελέσματα που παρέχουν οι λύσεις των Parlange και Babu [3] και Babu [7].

Οι εκτιμήσεις της τιμής της αρχικής κλίσης του αδιάστατου συντελεστή διάχυσης, α και του σημείου καμπής του προφίλ υγρασίας από τις Εξ. (12) και (11), αντίστοιχα, βρίσκονται πολύ κοντά στις εκτιμήσεις με διαδοχικές προσεγγίσεις και αριθμητική επίλυση με τη μέθοδο Runge-Kutta 4^{ης} τάξης (Πίνακας 3). Τα προφίλ υγρασίας που υπολογίζονται με την προσέγγιση της καμπύλης του αδιάστατου συντελεστή διάχυσης με ευθεία και πολυώνυμο είναι συγκρίσιμα της 1^{ης} μεθόδου, της αριθμητικής

ολοκλήρωσης της Εξ. (5) με τη μέθοδο Runge-Kutta 4^{ης} τάξης με διαδοχικές εκτιμήσεις της αρχικής κλίσης της καμπύλης $\bar{D}(n)$.

Πίνακας 2. Σύγκριση των τιμών του χαρακτηριστικού σημείου καμπής της καμπύλης υγρασίας $\left(n_k' = \frac{x}{\sqrt{t}}\right)$ για διάφορες λύσεις και τύπους εδαφών

Τύπος Εδάφους	θ_k (cm ³ /cm ³)	n_k' (cm/min ^{1/2}) Παρούσα Εργασία	n_k' (cm/min ^{1/2}) Tolikas et al.[4]	$\tilde{n}_k$ (cm/min ^{1/2}) Philip [1]	$\tilde{n}_k$ (cm/min ^{1/2}) Parlange and Babu [3]	$\tilde{n}_k$ (cm/min ^{1/2}) Babu [7]
Sarpy loam	0.107	0.338	0.338	0.338	0.320	0.310
Yolo clay loam	0.088	0.698	0.693	0.698	0.674	0.653
Columbia silt loam	0.096	1.073	1.071	1.071	1.017	0.985
Hanford silt	0.053	1.088	1.081	1.089	1.055	1.025
Fresno fine sand	0.045	2.064	2.048	2.063	1.995	1.934

Πίνακας 3. Σύγκριση των τιμών της αρχικής κλίσης της καμπύλης του αδιάστατου συντελεστή διάχυσης, (α) , και του χαρακτηριστικού σημείου καμπής της καμπύλης υγρασίας $\left(n_k' = \frac{x}{\sqrt{t}}\right)$ για την αρχική λύση και για τη μέθοδο με εκτίμηση του α

Τύπος Εδάφους	α Εμπειρική Εκτίμηση – 1 ^η Μέθοδος	α Εκτίμηση από Εξ. (12) – 2 ^η Μέθοδος	n_k' Εμπειρική Εκτίμηση – 1 ^η Μέθοδος	n_k' Εκτίμηση από Εξ. (11) – 2 ^η Μέθοδος
Sarpy loam	-39.61	-39.32	0.338	0.329
Yolo clay loam	-98.03	-98.33	0.698	0.698
Columbia silt loam	-39.64	-39.35	1.073	1.045
Hanford silt	-126.38	-126.18	1.088	1.089
Fresno fine sand	-103.50	-103.27	2.064	2.058

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Philip, J.R., 1969. Theory of infiltration. *Advanc. Hydrosc.*, 5: 217-296.
2. Parlange, J.Y., 1971. Theory of water-movement in soils I: One dimensional absorption. *Soil Sc.*, III: 134-137.
3. Parlange, J.Y. and Babu, D.K., 1976. A comparison of techniques for solving the diffusion equation with exponential diffusivity. *Water Resour. Res.*, 12(6): 1317-1318.

4. Tolikas, P.K., Tzimopoulos, C.D. and Tolikas, D.K., 1980. A simple analytical solution for horizontal absorption of water by soils for exponential soil water diffusivity. *Water Resour. Res.*, 16(4): 821-825.
5. Κάργας, Γ. και Κερκίδης, Π., 2006. Συμβολή στη μελέτη του φαινομένου της οριζόντιας διήθησης. 10^ο Πανελλήνιο Συνέδριο της Ε.Υ.Ε., Ξάνθη, Δεκέμβριος 2006.
6. Sidiropoulos, E.G. and Tolikas, P.K., 1984. Similarity and iterative solution of the Boussinesq equation. *J. Hydrol.*, 74: 31-41.
7. Babu, D.K., 1976. Infiltration analysis and perturbation methods I: Absorption with exponential diffusivity. *Water Resour. Res.*, 12(1): 89-93.
8. Hanks, R.J. and Bowers, S.A., 1962. Numerical solution of the moisture flow equation for infiltration into layered soils. *Soil Sci. Amer. Proc.*, 26: 530-534.
9. Reichardt, K., Nielsen, D.R. and Biggar, J.W., 1972. Scaling of horizontal infiltration into homogeneous soils. *Soil Sci. Amer. Proc.*, 36(2): 241-250.

(158)

ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΡΔΕΥΤΙΚΟΥ ΝΕΡΟΥ ΜΕ ΤΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΧΕΣΕΩΝ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ – ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΝΕΡΟΥ

Π.Ε. Γεωργίου* και Δ.Μ. Παπαμιχαήλ

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Γεωπονική Σχολή, 54124 Θεσσαλονίκη

*e-mail: pantaz@agro.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η βέλτιστη διαχείριση του αρδευτικού νερού και ειδικότερα ο προγραμματισμός των αρδεύσεων πρέπει να λαμβάνουν σοβαρά υπόψη την αποτελεσματικότητα της εφαρμογής του νερού στην απόδοση των καλλιεργειών. Για το λόγο αυτό διερευνήθηκαν σχέσεις απόδοσης των καλλιεργειών σε σχέση με τη διαθεσιμότητα νερού. Στην εργασία αυτή γίνεται διερεύνηση και συγκριτική αξιολόγηση των διαφόρων σχέσεων (Jensen, Doorenbos and Kassam) απόδοσης καλλιεργειών - διαθεσιμότητας νερού. Η διαδικασία αυτή αναφέρεται σε τρεις καλλιέργειες και εφαρμόζεται για συνθήκες ανεπάρκειας νερού σε μεμονωμένες και συνδυασμένες περιόδους ευαισθησίας και εξετάζεται η επίδραση στην απόδοση των καλλιεργειών αυτών με σκοπό τη βέλτιστη διαχείριση του αρδευτικού νερού.

OPTIMAL IRRIGATION WATER MANAGEMENT BASED ON CROP WATER PRODUCTION FUNCTIONS

P.E. Georgiou* and D.M. Papamichail

Aristotle University of Thessaloniki, Faculty of Agriculture, 54124 Thessaloniki

*e-mail: pantaz@agro.auth.gr

ABSTRACT

The optimal irrigation water management and the irrigation scheduling take into account the effectiveness of irrigation water use in crop yield. For this reason relationships between crop yield and water supply were investigated. In this paper, a comparative analysis of the various crop water production functions (Jensen, Doorenbos and Kassam) was performed. The functions were compared for a number of crops over a wide range of deficit and stress conditions. The proposed function is useful in evaluating alternative irrigation strategies and optimal irrigation water management.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εφαρμογή άρδευσης και πιο συγκεκριμένα η κατάστρωση, ο σχεδιασμός και η λειτουργία ενός αρδευτικού προγράμματος πρέπει να λαμβάνει σοβαρά υπόψη την αποτελεσματικότητα της εφαρμογής του νερού στις αποδόσεις των καλλιεργειών. Στην περίπτωση ελλειμματικών αρδεύσεων, η βέλτιστη διαχείριση του αρδευτικού νερού έχει σχέση, τόσο με την ποσότητα του αρδευτικού νερού που χορηγείται, όσο και με τη χρονική στιγμή της εφαρμογής του. Για το λόγο αυτό, δημιουργήθηκε η αναγκαιότητα διερεύνησης σχέσεων απόδοσης καλλιεργειών σε σχέση με τη διαθεσιμότητα νερού. Ο υπολογισμός της απόδοσης των καλλιεργειών κάτω από συνθήκες ανεπαρκούς διαθεσιμότητας νερού, απαιτεί την ενσωμάτωση της συνδυασμένης επίδρασης της ευαισθησίας των περιόδων ανάπτυξης. Οι σχέσεις αυτές είναι πολύπλοκες και περιλαμβάνουν την επίδραση της ευαισθησίας (stress) στην έλλειψη νερού της καλλιέργειας κατά τη διάρκεια της βλαστικής περιόδου. Το μήκος των περιόδων ευαισθησίας είναι αυθαίρετο και μπορεί να ποικίλλει (μήνας, δεκαήμερο, εβδομάδα κ.λπ.) ή να έχει τη διάρκεια των φυσιολογικών σταδίων ανάπτυξης της καλλιέργειας.

Κατά το παρελθόν, παρουσιάστηκαν διάφορες σχέσεις, οι οποίες περιγράφουν την απόδοση των καλλιεργειών σε σχέση με τη διαθεσιμότητα νερού και ειδικότερα με την εξατμισοδιαπνοή και χρησιμοποιούνται σε μοντέλα βελτιστοποίησης της διαχείρισης του αρδευτικού νερού [1,2,3,4,5,6,7].

Στην εργασία αυτή γίνεται διερεύνηση και συγκριτική αξιολόγηση των διαφόρων σχέσεων απόδοσης καλλιεργειών σε σχέση με τη διαθεσιμότητα νερού [5,6,7]. Η διερεύνηση και συγκριτική αξιολόγηση αναφέρεται σε τρεις καλλιέργειες και εφαρμόζεται για συνθήκες ανεπάρκειας νερού σε μεμονωμένες και συνδυασμένες περιόδους ευαισθησίας και εξετάζεται η επίδραση στην απόδοση των καλλιεργειών αυτών με σκοπό τη βέλτιστη χρήση του αρδευτικού νερού.

2. ΣΧΕΣΕΙΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ – ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΝΕΡΟΥ

Αρκετές σχέσεις απόδοσης καλλιεργειών – εξατμισοδιαπνοής έχουν παρουσιασθεί στη διεθνή βιβλιογραφία [8,9,10,11]. Οι σχέσεις αυτές έχουν εκτεταμένα χρησιμοποιηθεί για αγρονομικούς σκοπούς, αλλά έχουν υποστεί και ευρύτατη κριτική. Για το λόγο αυτό, δημιουργήθηκε η αναγκαιότητα διερεύνησης σχέσεων που να περιλαμβάνουν την επίδραση της ευαισθησίας (stress) της καλλιέργειας, κάτω από συνθήκες έλλειψης νερού στις διάφορες περιόδους κατά τη διάρκεια της βλαστικής περιόδου.

Ο Jensen [5] παρουσίασε δύο σχέσεις, μία για τον υπολογισμό της σχετικής απόδοσης των μη χορτοδοτικών καλλιεργειών (determinate crops) και μία άλλη για τον υπολογισμό της σχετικής απόδοσης των χορτοδοτικών καλλιεργειών (indeterminate crops). Η σχετική απόδοση για τις μη χορτοδοτικές καλλιέργειες είναι:

$$\frac{Y_a}{Y_m} = \prod_{i=1}^n \left(\frac{ET_a}{ET_m} \right)^{\lambda_i} \quad (1)$$

όπου: Y_a =πραγματική απόδοση (actual yield) της καλλιέργειας κάτω από τις συγκεκριμένες συνθήκες έλλειψης νερού σε kg/στρέμμα, Y_m = μέγιστη απόδοση (maximum yield) της καλλιέργειας, όταν το νερό δεν είναι περιοριστικός παράγοντας σε kg/στρέμμα, ET_a πραγματική εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας (actual evapotranspiration) σε mm και ET_m μέγιστη εξατμισοδιαπνοή (maximum evapotranspiration) σε mm, λ_i συντελεστής ευαισθησίας της καλλιέργειας κατά το στάδιο i και n ο συνολικός αριθμός των σταδίων.

Στο μοντέλο του Jensen [σχέση (1)], που είναι το κλασικό πολλαπλασιαστικό μοντέλο, η μειωμένη χορήγηση νερού, κατά τη διάρκεια ενός απλού σταδίου ανάπτυξης, μπορεί να προκαλέσει σοβαρή μείωση στην απόδοση της καλλιέργειας. Το μέγεθος του συντελεστή ευαισθησίας λ για ένα συγκεκριμένο στάδιο ανάπτυξης εξαρτάται από την ευαισθησία της καλλιέργειας στην έλλειψη νερού κατά το στάδιο αυτό. Ο Jensen έδωσε τιμές του λ , για τρία στάδια ανάπτυξης της καλλιέργειας σόργου. Τιμές του λ για διάφορες καλλιέργειες και στάδια ανάπτυξης έχουν δοθεί περιορισμένα στη βιβλιογραφία [12,13,14]

Οι Hall and Butcher [15] ανέπτυξαν επίσης, ένα πολλαπλασιαστικό μοντέλο, το οποίο σε αντιδιαστολή με το μοντέλο του Jensen χρησιμοποιεί αντί της σχετικής εξατμισοδιαπνοής, το έλλειμμα της εδαφικής υγρασίας, ενώ οι Minhas et al. [16] παρουσίασαν μία άλλη μορφή πολλαπλασιαστικού μοντέλου.

Η εκτίμηση των επιπτώσεων στην απόδοση, της περιορισμένης διαθεσιμότητας νερού κατά τα διάφορα στάδια ανάπτυξης των καλλιεργειών, με σκοπό την επισήμανση κρίσιμων περιόδων, δόθηκε και από τους Doorenbos και Kassam [6]. Η σχέση των Doorenbos και Kassam έχει τη μορφή:

$$\frac{Y_a}{Y_m} = 1 - k_y \left[1 - \frac{ET_a}{ET_m} \right] \quad (2)$$

όπου: Y_a , Y_m , ET_a και ET_m όπως ορίστηκαν στη σχέση (1) του Jensen και k_y =αδιάστατος συντελεστής ανταπόκρισης της παραγωγής, που αντικατοπτρίζει την επίδραση της διαθεσιμότητας νερού στην παραγωγή.

Η απόκριση της καλλιέργειας σε σχέση με τη διαθεσιμότητα νερού περιγράφεται από το συντελεστή ανταπόκρισης της παραγωγής k_y , ο οποίος συνδέει τη μείωση της σχετικής απόδοσης $(1 - Y_a/Y_m)$ με τη μείωση της σχετικής εξατμισοδιαπνοής $(1 - ET_a/ET_m)$. Το μέγεθος της έλλειψης της υγρασίας εκφράζεται από το λόγο ET_a/ET_m και μπορεί να είναι ομοιόμορφα κατανεμημένο σε όλη της διάρκεια της βλαστικής περιόδου ή να παρατηρείται σε ένα ή περισσότερα στάδια ανάπτυξης της καλλιέργειας. Οι Doorenbos and Kassam [6] χώρισαν τη βλαστική περίοδο σε πέντε περιόδους ανάπτυξης: (α) *Εγκατάσταση* (establishment), (β) *Βλάστηση* (vegetative), (γ) *Ανθοφορία* (flowering), (δ) *Σχηματοποίηση των καρπών* (ή αλλιώς διαμόρφωση της παραγωγής) (yield formation) και (ε) *Ωρίμανση* (ripening). Γενικά, ελλείμματα υγρασίας που παρουσιάζονται κατά την περίοδο της ανθοφορίας φαίνεται να έχουν τη μεγαλύτερη επίπτωση στην απόδοση των καλλιεργειών, λόγω μείωσης του αριθμού των καρπών, ενώ ελλείμματα μετά την ανθοφορία κατά τη σχηματοποίηση των καρπών περιορίζουν τη μάζα τους. Επομένως, πιο ευαίσθητες στο έλλειμμα νερού είναι οι περίοδοι ανθοφορίας και σχηματισμού των καρπών και λιγότερο ευαίσθητες είναι οι περίοδοι της βλάστησης και ωρίμανσης.

Τιμές του συντελεστή ανταπόκρισης παραγωγής, k_y , δόθηκαν για διάφορες καλλιέργειες, για ολόκληρη τη βλαστική περίοδο και για επιμέρους περιόδους ανάπτυξης, από τους Doorenbos and Kassam [6] και από τον Παπαζαφειρίου [17]. Οι τιμές του k_y υπολογίστηκαν με τις παραδοχές ότι: α) η σχέση μεταξύ του Y_a/Y_m και ET_a/ET_m είναι γραμμική και β) ισχύει για έλλειμμα νερού μέχρι 50%, όταν δηλαδή $(1 - ET_a/ET_m) \leq 0.5$. Οι τιμές αυτές προέκυψαν από ανάλυση πειραματικών δεδομένων που αφορούσαν ποικιλίες υψηλής απόδοσης, οι οποίες είναι απόλυτα προσαρμοσμένες στο περιβάλλον.

Ο συντελεστής ανταπόκρισης της παραγωγής k_y χρησιμοποιείται στον προγραμματισμό των αρδεύσεων, γιατί επιτρέπει την ποσοτικοποίηση του νερού που πρέπει να δοθεί στην καλλιέργεια καθώς επίσης και τον καθορισμό του χρόνου εφαρμογής του, σε συνάρτηση με το επίπεδο της απόδοσης. Κάτω από συνθήκες

ανεπάρκειας νερού και στην περίπτωση που η εφαρμογή του αρδευτικού νερού κατανέμεται στο σύνολο της βλαστικής περιόδου, οι καλλιέργειες, εξαιτίας του γεγονότος της εμφάνισης διαφορετικού k_y , εμφανίζουν και διαφορετικά επίπεδα μείωσης της απόδοσης. Έτσι, η ανεπάρκεια του νερού σε μια καλλιέργεια με μεγάλη τιμή του k_y επιφέρει μεγάλη μείωση της απόδοσης, ενώ αντίθετα, οι μικρές τιμές του k_y αντιστοιχούν σε μικρές μειώσεις της απόδοσης.

Η διαχείριση του αρδευτικού νερού και πιο συγκεκριμένα η κατάστρωση, ο σχεδιασμός και η λειτουργία ενός αρδευτικού προγράμματος πρέπει να λαμβάνει σοβαρά υπόψη την αποτελεσματικότητα της εφαρμογής του νερού στις αποδόσεις των καλλιεργειών. Η σχέση μεταξύ απόδοσης και διαθέσιμου νερού μπορεί να καθοριστεί, όταν είναι γνωστά: οι απαιτήσεις σε νερό της καλλιέργειας, η ευαισθησία της στην έλλειψη νερού κατά τη διάρκεια των διαφόρων φάσεων της βλαστικής περιόδου, το μέγιστο και το πραγματικό επίπεδο της απόδοσής της. Η συνδυασμένη επίδραση της ευαισθησίας των διαφόρων περιόδων ανάπτυξης μπορεί να λειτουργήσει, είτε προσθετικά, είτε πολλαπλασιαστικά. Στον προγραμματισμό των αρδεύσεων και σε μοντέλα βελτιστοποίησης του διαθέσιμου νερού για άρδευση μιας καλλιέργειας, εκείνο το οποίο ενδιαφέρει είναι οι επιπτώσεις των ελλείψεων νερού στη συνολική απόδοση της καλλιέργειας. Για την περίπτωση αυτή, σύμφωνα με τους Rao et al. [7], οι σχέσεις που έχουν χρησιμοποιηθεί είναι τριών μορφών.

Η πρώτη είναι η κλασική σχέση (1) του Jensen [5], του γενικού πολλαπλασιαστικού μοντέλου. Η δεύτερη και η τρίτη μορφή προτάθηκαν από τους Rao et al. [7] και βασίζονται στη σχέση των Doorenbos and Kassam [6]. Σύμφωνα με τη δεύτερη μορφή, η σχετική απόδοση μιας καλλιέργειας δίνεται από το προσθετικό μοντέλο της σχ. (3):

$$\frac{Y_a}{Y_m} = 1 - \sum_{i=1}^N k_{y_i} \left[1 - \frac{ET_a}{ET_m} \right]_i \quad (3)$$

όπου: N= αριθμός των περιόδων ανάπτυξης και οι υπόλοιποι συμβολισμοί όπως ορίστηκαν προηγούμενα.

Η τρίτη σχέση, έχει τη μορφή:

$$\frac{Y_a}{Y_m} = \prod_{i=1}^N \left[1 - k_{y_i} \left(1 - \frac{ET_a}{ET_m} \right)_i \right] \quad (4)$$

Ο υπολογισμός της απόδοσης των καλλιεργειών κάτω από συνθήκες επάρκειας και ανεπάρκειας νερού, απαιτεί την ενσωμάτωση της συνδυασμένης επίδρασης της ευαισθησίας των περιόδων ανάπτυξης. Το μοντέλο του Jensen της σχέσης (1), παρουσιάζει το βασικό πλεονέκτημα ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε χρονικά βήματα μικρότερα των περιόδων ανάπτυξης [1,4,18].

Ο Tsakiris [1] πρότεινε μία διαδικασία, για τον υπολογισμό των συντελεστών ευαισθησίας λ , σε χρονικά διαστήματα μικρότερα από τις περιόδους ανάπτυξης. Αρχικά, οι τιμές των συντελεστών ανταπόκρισης k_y των Doorenbos and Kassam [6] μετασχηματίζονται σε τιμές του λ και στη συνέχεια με μια γραφική διαδικασία που περιγράφεται μαθηματικά, εκτιμώνται οι τιμές του λ σε χρονικά διαστήματα μικρότερα από τις περιόδους ανάπτυξης [1,3]. Αναλυτικά η διαδικασία έχει ως εξής:

Οι συναρτήσεις απόδοσης του Jensen και των Doorenbos and Kassam [5,6] για μία περίοδο ανάπτυξης της βλαστικής περιόδου αντίστοιχα, είναι:

$$\frac{Y_a}{Y_m} = \left(\frac{ET_a}{ET_m} \right)^{\lambda_i} \quad (5)$$

και

$$\left[1 - \frac{Y_a}{Y_m}\right] = k_y \left[1 - \frac{ET_a}{ET_m}\right] \quad (6)$$

Η σχέση (6) ισχύει για $(1-ET_a/ET_m) \leq 0.5$. Με λογαρίθμιση της σχέσης (5) προκύπτει η σχέση (7):

$$\ln(Y_a/Y_m) = \lambda_i \ln(ET_a/ET_m) \quad (7)$$

Στην περίπτωση ανεπάρκειας νερού που εντοπίζεται μόνο στη συγκεκριμένη περίοδο ανάπτυξης, η αντίστοιχη τιμή του k_y είναι γνωστή. Για διάφορες τιμές του λόγου ET_a/ET_m που κυμαίνονται από 0.5-1 υπολογίζονται με τη σχέση (6), οι αντίστοιχες τιμές του λόγου Y_a/Y_m . Συσχετίζοντας τις τιμές του $\ln(Y_a/Y_m)$ και του $\ln(ET_a/ET_m)$ εκτιμώνται οι τιμές του λ με τη βοήθεια της σχέσης (7). Με την προαναφερθείσα διαδικασία μπορούν να υπολογιστούν οι τιμές του λ για κάθε περίοδο ανάπτυξης με τη βοήθεια των τιμών του k_y . Στη συνέχεια για την εύρεση των τιμών του λ σε μικρότερα χρονικά διαστήματα εφαρμόζεται η γραφική διαδικασία του Tsakiris [1].

3. ΕΦΑΡΜΟΓΗ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή εφαρμόστηκαν οι σχέσεις (1), (3) και (4) για τις καλλιέργειες καλαμποκιού, βαμβακιού και βιομηχανικής ντομάτας για την εύρεση της σχετικής απόδοσης Y_a/Y_m για διάφορες τιμές της σχετικής εξατμισοδιαπνοής ET_a/ET_m . Οι τιμές του συντελεστή ανταπόκρισης της παραγωγής k_y πάρθηκαν από τους Doorenbos and Kassam [6]. Στη συνέχεια εφαρμόστηκε η διαδικασία που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο για το μετασχηματισμό των τιμών του k_y σε λ [4].

Από την ανάλυση συσχέτισης μεταξύ των τιμών του k_y και λ , προέκυψε η σχέση (8) υπολογισμού του λ που έχει τη μορφή:

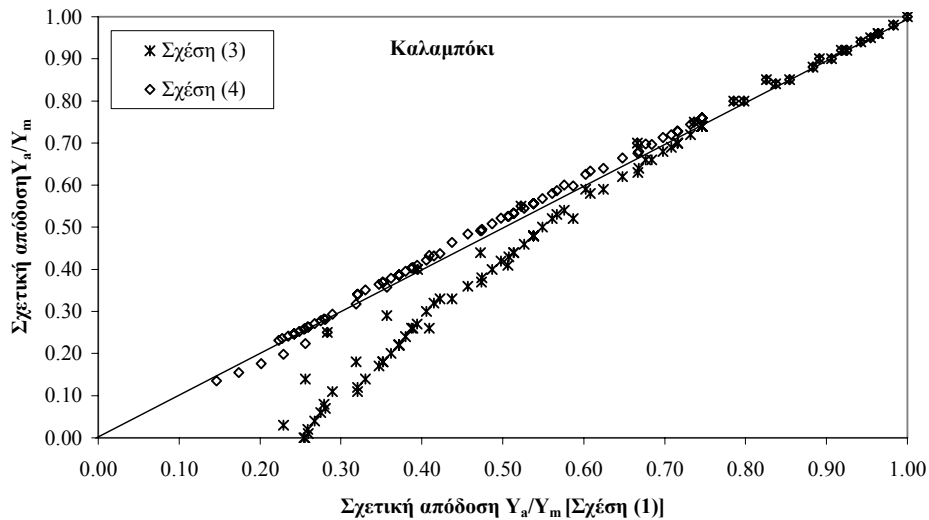
$$\lambda = 0.2418k_y^3 - 0.1768k_y^2 + 0.9464k_y - 0.0177 \quad (R^2=0.9999) \quad (8)$$

Για την περίπτωση των παραπάνω καλλιεργειών, με τη βοήθεια της σχέσης (8) και των τιμών των συντελεστών ανταπόκρισης k_y κάθε περιόδου ανάπτυξης, υπολογίστηκαν οι τιμές των συντελεστών ευαισθησίας λ κάθε περιόδου ανάπτυξης και δίνονται στον Πίνακα 1.

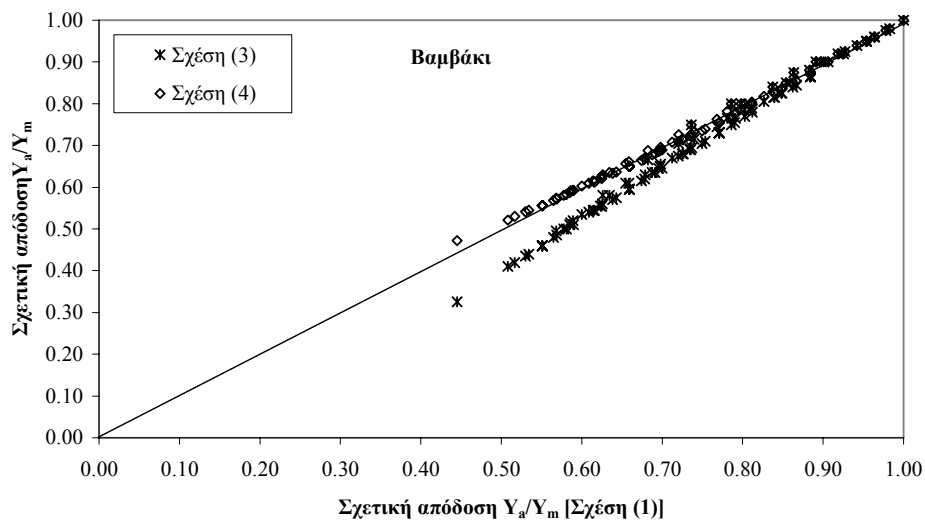
Πίνακας 1. Διάρκεια περιόδων ανάπτυξης βλαστικής περιόδου και συντελεστές ανταπόκρισης της παραγωγής (k_y) και ευαισθησίας (λ) των ετήσιων καλλιεργειών

Περίοδος Ανάπτυξης Βλαστικής Περιόδου					
	Εγκατάσταση	Βλάστηση	Ανθοφορία	Σχηματισμός καρπών	Ωρίμανση
Καλαμπόκι					
Διάρκεια	25	40	25	45	15
k_y	0.00	0.40	1.50	0.50	0.20
λ	0.00	0.3480	1.8202	0.4415	0.1664
Βαμβάκι					
Διάρκεια	15	30	60	30	20
k_y	0.00	0.20	0.50	0.40	0.25
λ	0.00	0.1664	0.4415	0.3480	0.2116
Βιομηχανική Ντομάτα					
Διάρκεια	25	20	25	25	20
k_y	0.00	0.40	1.10	0.80	0.40
λ	0.00	0.3480	1.1312	0.7501	0.3480

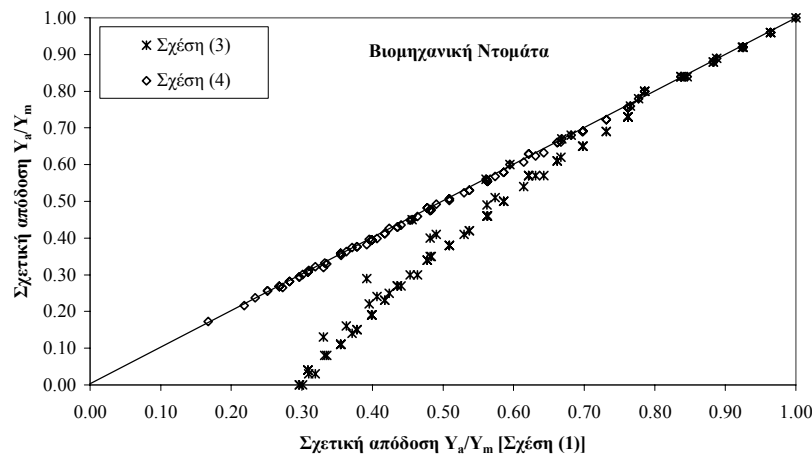
Στη συνέχεια για διάφορες τιμές σχετικής εξατμισοδιαπνοής $ET_a/ET_m \geq 0.5$ στις διάφορες περιόδους ανάπτυξης βλαστικής περιόδου και για διάφορους συνδυασμούς υπολογίστηκαν οι τιμές της σχετικής απόδοσης Y_a/Y_m με τις σχέσεις (1), (3) και (4). Στα Σχήματα 1, 2 και 3 φαίνεται η σύγκριση ανάμεσα στις τιμές της σχετικής απόδοσης για τις καλλιέργειες του καλαμποκιού, του βαμβακιού και της βιομηχανικής ντομάτας όπως υπολογίστηκαν από τις σχέσεις (1), (3) και (4).



Σχήμα 1. Σύγκριση ανάμεσα στις τιμές της σχετικής απόδοσης για την καλλιέργεια του Καλαμποκιού όπως υπολογίζονται από τις σχέσεις (1), (3) και (4).



Σχήμα 2. Σύγκριση ανάμεσα στις τιμές της σχετικής απόδοσης για την καλλιέργεια του Βαμβακιού όπως υπολογίζονται από τις σχέσεις (1), (3) και (4)



Σχήμα 3. Σύγκριση ανάμεσα στις τιμές της σχετικής απόδοσης για την καλλιέργεια της Βιομηχανικής Ντομάτας όπως υπολογίζονται από τις σχέσεις (2), (5) και (6)

Από τα Σχήματα 1, 2 και 3 προκύπτει ότι οι σχέσεις (1) και (4) δίνουν παρόμοια αποτελέσματα με διαφορές που δεν ξεπερνούν το 5% για το καλαμπόκι, το 2.5% για το βαμβάκι και το 2% για τη βιομηχανική ντομάτα. Αντίθετα μεταξύ των σχέσεων (1) και (3) υπάρχουν αρκετές διαφορές οι οποίες εντοπίζονται στα εξής: (α) Για σχετικές αποδόσεις μικρότερες του 0.50 οι διαφορές είναι πολύ έντονες. Μάλιστα υπάρχουν περιπτώσεις όπου μπορούν να προκύψουν και αρνητικές τιμές σχετικής απόδοσης με την εφαρμογή της σχέσης (3) στις καλλιέργειες του καλαμποκιού και της βιομηχανικής ντομάτας. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι σε κάποιες περιόδους ανάπτυξης υπάρχουν τιμές του k_y μεγαλύτερες του 1 γεγονός που επιφέρει μεγάλη μείωση στην απόδοση όπως ειπώθηκε προηγουμένα. (β) Για σχετικές αποδόσεις μεγαλύτερες από 0.50 οι διαφορές κυμαίνονται από 0-19% για το καλαμπόκι και το βαμβάκι και 0-25% για τη βιομηχανική ντομάτα.

Από τα παραπάνω προκύπτει, ότι οι σχέσεις (1) και (4) δίνουν παρόμοια αποτελέσματα ενώ αντίθετα η σχέση (3) δίνει διαφορετικά αποτελέσματα και μάλιστα παρουσιάζονται προβλήματα στην εφαρμογή της εξαιτίας του ότι προκύπτουν μη ρεαλιστικά αποτελέσματα ορισμένες φορές (αρνητικές τιμές σχετικής απόδοσης).

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην περίπτωση ελλειμματικών αρδεύσεων, η βέλτιστη διαχείριση του αρδευτικού νερού έχει σχέση, τόσο με την ποσότητα του αρδευτικού νερού που χορηγείται, όσο και με τη χρονική στιγμή της εφαρμογής του. Για το λόγο αυτό, δημιουργήθηκε η αναγκαιότητα διερεύνησης σχέσεων απόδοσης καλλιεργειών σε σχέση με τη διαθεσιμότητα νερού. Στην εργασία αυτή γίνεται διερεύνηση και συγκριτική αξιολόγηση των διαφόρων σχέσεων απόδοσης καλλιεργειών σε σχέση με τη διαθεσιμότητα νερού. Οι σχέσεις αυτές είναι το κλασικό πολλαπλασιαστικό μοντέλο του Jensen [σχέση (1)], το αθροιστικό μοντέλο [σχέση (3)] και το πολλαπλασιαστικό μοντέλο [σχέση (4)] των Doorenbos-Kassam όπως προτάθηκαν από τους Rao et al. Η διερεύνηση και συγκριτική αξιολόγηση αναφέρεται σε διάφορες καλλιέργειες και εφαρμόζεται για συνθήκες ανεπάρκειας νερού σε μεμονωμένες και συνδυασμένες περιόδους ευαισθησίας και ελέγχεται η επίδραση στην απόδοση των καλλιεργειών με σκοπό τη βέλτιστη χρήση του αρδευτικού νερού. Από τη συγκριτική ανάλυση για την

περίπτωση των καλλιεργειών καλαμποκιού, βαμβακιού και βιομηχανικής ντομάτας προέκυψε ότι οι σχέσεις (1) και (4) δίνουν παρόμοια αποτελέσματα ενώ αντίθετα η σχέση (3) δίνει διαφορετικά αποτελέσματα και παρουσιάζει προβλήματα στην εφαρμογή της εξαιτίας της εμφάνισης για κάποιες περιπτώσεις και αρνητικών τιμών σχετικής απόδοσης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Tsakiris, G., 1982. A method for applying crop sensitivity factors in irrigation scheduling. *Agric. Water Manage.*, 5: 335-343.
2. Kirda, C., Moutonnet, P., Hera, C. and Nielsen, D.R., 1999. *Crop yield response to deficit irrigation*. Kluwer Academic Publishers, 262 p.
3. Kipkorir, E.C. and Raes, D., 2002. Transformation of yield response factor into Jensen's sensitivity index. *Irrig. and Drain. Sys.*, 16: 47-52.
4. Γεωργίου, Π.Ε., 2004. *Βελτιστοποίηση λειτουργίας ταμιευτήρων για αρδευτικούς σκοπούς*. Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Γεωπονίας Α.Π.Θ., 341 σελ.
5. Jensen, M.E., 1968. *Water consumption by agricultural plants*. In: T.T. Kozlowski (ed.), *Water Deficits and Plants Growth*, Vol. II. Academic Press, New York, 1-22.
6. Doorenbos, J. and Kassam, A.H., 1979. *Yield response to water*. FAO Irrigation and Drainage Paper, No 33, Rome, 193 p.
7. Rao, N.H., Sarma, P.B.S. and Chander, S., 1988. A simple dated water-production function for use in irrigated agriculture. *Agric. Water Manage.*, 13: 25-32.
8. Hanks, R.J. and Hill, R.W., 1980. *Modeling crop responses to irrigation in relation to soils, climate and salinity*. International Irrigation Information Centre, Bet Dagan, Israel, 66 p.
9. Stewart, J.I., 1980. *Planning and managing irrigation projects for optimal water use efficiency*. In S.S. John (Editor), *Irrigation and Agriculture Development*, Pergamon, Oxford, 147-160.
10. Martin, D.L., Watts, D.G. and Gilley, J.R., 1983. Model and production function for irrigation management. *J. Irrig. Drain. Eng. ASCE*, 110(2): 149-164.
11. Zhang, H. and Oweis, T., 1999. Water-yield relations and optimal irrigation scheduling of wheat in the Mediterranean region. *Agric. Water Manage.*, 38, 195-211.
12. Nairizi, S. and Rydzewski, J.R., 1977. Effects of dated soil moisture stress on crop yields. *Exp. Agr.*, 13: 51-59.
13. Aryan, A., 1992. *Modification of the CRPSM model for irrigation scheduling and management and yield prediction of winter Wheat (Triticum aestivum L., Adle cv.) (in Persian)*. M.Sc. Thesis, Irrigation Department, Shiraz, Iran, 377 p.
14. Ghahraman, B. and Sepaskhah, A.R., 1997. Use of a water deficit sensitivity index for partial irrigation scheduling of Wheat and Barley. *Irrig. Sci.*, 18: 11-16.
15. Hall, W.A. and Butcher, W.S., 1968. Optimal timing of irrigation. *J. Irrig. Drain. Div. ASCE*, 94(2): 267-275.
16. Minhas, B.S., Parikh, K.S. and Srinivasan, T.N., 1974. Toward the structure of a production function for wheat yields with data inputs of irrigation water. *Water Resour. Res.*, 10(3): 383-393.
17. Παπαζαφειρίου, Ζ.Γ., 1999. *Οι ανάγκες σε νερό των καλλιεργειών*. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 347 σελ.
18. Raes, D., 2002. *BUDGET A soil water and salt balance model*. Reference Manual, Version 5.0, K.U. Leuven, 79 p.

(161)

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΔΙΑΚΟΠΤΟΜΕΝΗΣ ΠΑΡΟΧΗΣ ΝΕΡΟΥ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΤΑΓΔΗΝ ΑΡΔΕΥΣΗΣ

Π. Βύρλας¹ και Μ. Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη¹

¹ Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Σχολή Γεωπονικών Επιστημών, Τμ. Γεωπονίας Φυτικής
Παραγωγής & Αγροτικού Περιβάλλοντος, Εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής,
Οδός Φυτόκου, 38446, Ν. Ιωνία Μαγνησίας, hydrolab@agr.uth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της εργασίας αυτής είναι η αξιολόγηση της επίδρασης της διακοπτόμενης εφαρμογής νερού από ένα σύστημα στάγδην άρδευσης στα ζαχαρότευτλα. Οι μεταχειρίσεις του πειράματος περιελάμβαναν συνδυασμούς του συστήματος (επιφανειακή και υποεπιφανειακή στάγδην) και της εφαρμογής του νερού (συνεχής και διακοπτόμενη παροχή). Τα αποτελέσματα αποδεικνύουν ότι τα τεμάχια που αρδεύτηκαν μέσω της διακοπτόμενης άρδευσης υπερέβησαν σε απόδοση και ποιότητα αυτά που αρδεύτηκαν μέσω της συμβατικής εφαρμογής ενώ η διακοπτόμενη εφαρμογή συνετέλεσε στην πιο ομοιόμορφη κατατομή της εδαφικής υγρασίας.

APPLICATION OF PULSE WATER APPLICATION IN DRIP IRRIGATION SYSTEMS

P. Vyrilas¹ and M. Sakellariou-Makrantonaki¹

University of Thessaly, School of Agricultural Science, Dept. of Agriculture Crop
Production & Rural Environment, Agricultural Hydraulics Laboratory,
Fytokou Str, 38446, N. Ionia Magnesias, hydrolab@agr.uth.gr

ABSTRACT

The objective of this work was the evaluation of pulse (intermittent) drip irrigation applied on sugar beet. The experimental investigation included combinations of drip irrigation system (surface and subsurface drip) and water application (continuous and pulse discharge). The data analysis indicated that the plots irrigated using pulse irrigation exceeded those irrigated by conventional drip both in sugar beet yield and quality. Also, the pulsed application resulted in a more uniform distribution water in soil.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Κατά την εφαρμογή της άρδευσης, η κίνηση του νερού προκαλείται από τις τριχοειδείς δυνάμεις, οι οποίες έχουν την ίδια ένταση προς όλες τις κατευθύνσεις, καθώς επίσης και από την δύναμη της βαρύτητας, η οποία είναι συνεχής και με κατεύθυνση προς τα κάτω. Οι τριχοειδείς δυνάμεις ελαττώνονται, καθώς η υγρασία του εδάφους αυξάνεται. Επομένως σε ξηρό έδαφος οι τριχοειδείς δυνάμεις είναι κατά πολύ μεγαλύτερες από ότι η δύναμη της βαρύτητας και ωθούν το νερό εξίσου προς όλες τις κατευθύνσεις. Καθώς το έδαφος υγραίνεται, οι πόροι του καθίστανται κορεσμένοι και οι τριχοειδείς δυνάμεις εξασθενούν επιτρέποντας στην δύναμη της βαρύτητας να επικρατήσει. Κατά συνέπεια η κίνηση του νερού καθίσταται κυρίως κατακόρυφη [1]. Η απλή και βασική αυτή αρχή υποδηλώνει ότι το αρδευτικό νερό πρέπει να εφαρμόζεται σε συχνές και μικρές δόσεις, ούτως ώστε η κίνηση του νερού στο έδαφος να καθορίζεται κυρίως από την δράση των τριχοειδών δυνάμεων.

Αυτή η θεώρηση οδήγησε στην υπόθεση ότι η εφαρμογή του νερού από τους σταλάκτες, τόσο στην ΥΣΑ αλλά και στην ΕΣΑ, με ρυθμούς μικρότερους των συμβατικών, μπορεί να διαμορφώνουν ένα υγρασιακό περιβάλλον στο ριζόστρωμα που να ευνοεί την καλύτερη ανάπτυξη και μεγαλύτερη απόδοση της καλλιέργειας. Έτσι, αναπτύχθηκε η τεχνική της διακοπτόμενης εφαρμογής του νερού, τεχνική που καταλήγει στην μικρότερη ένταση εφαρμογής του νερού σε σχέση με την συμβατική.

Διάφορες τεχνικές διακοπτόμενης εφαρμογής του νερού έχουν τύχει εφαρμογής στις επιφανειακές μεθόδους άρδευσης (surge irrigation) [2] και σε καλλιέργειες που αναπτύσσονται σε θερμοκήπια (pulse irrigation) [3].

Η στάγδην άρδευση συγκαταλέγεται ανάμεσα στις σύγχρονες μεθόδους άρδευσης και χαρακτηρίζεται από υψηλή αποδοτικότητα χρήσης νερού, τόσο στην επιφανειακή όσο και στην υποεπιφανειακή εφαρμογή της. Μολονότι η επιφανειακή στάγδην άρδευση έχει υιοθετηθεί από τους καλλιεργητές, η υποεπιφανειακή δεν έχει τύχει ακόμα εφαρμογής της από αυτούς παρ' όλο που τα πλεονεκτήματά της έχουν αποδειχθεί και από εγχώριες ερευνητικές μελέτες σε διάφορες καλλιέργειες, συμπεριλαμβανομένων και των ζαχαροτεύλων [4, 5, 6].

Η διακοπτόμενη άρδευση δεν έχει τύχει έως τώρα ιδιαίτερης μελέτης και δεν έχει εφαρμοσθεί με συστήματα στάγδην σε συνθήκες αγρού [7]. Για την διερεύνηση της επίδρασης της διακοπτόμενης εφαρμογής νερού από ένα σύστημα στάγδην άρδευσης στις καλλιέργειες, εκτελέστηκε πειραματική έρευνα, διετούς διάρκειας, σε καλλιέργεια ζαχαροτεύλων, σε αγρό του Αγροκτήματος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, όπου εγκαταστάθηκαν συστήματα υποεπιφανειακής και επιφανειακής στάγδην άρδευσης.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Τα πειράματα διεξήχθησαν στο Αγρόκτημα του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στο Βελεστίνο, κατά τις καλλιεργητικές περιόδους των ετών 2003 και 2004. Η έκταση του πειραματικού αγρού είναι επίπεδη με υψόμετρο 70 μέτρα πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας και γεωγραφικές συντεταγμένες 39° 23' Βόρειο Γεωγραφικό Πλάτος και 22° 45' Ανατολικό Γεωγραφικό Μήκος. Το έδαφος στη θέση του πειραματικού αγρού έχει υφή αμμοαργιλοπηλώδη έως αργιλώδη και κοκκομετρική σύσταση μετρίως λεπτόκοκκη έως λεπτόκοκκη. Η κατάσταση υδρομορφίας είναι καλή με Β βαθμό αποστράγγισης και βελτιώνεται με το βάθος του εδάφους εξαιτίας της πετρώδους σύστασής του. Έχει πολύ καλά αναπτυγμένο πορώδες αποτελούμενο κυρίως από μικρού και μέσου μεγέθους πόρους [8].

Το πειραματικό σχέδιο περιελάμβανε τέσσερις μεταχειρίσεις σε τέσσερις επαναλήψεις. Οι μεταχειρίσεις που εφαρμόστηκαν ήταν:

- Επιφανειακή (συμβατική) εφαρμογή νερού (ΕΣ). Συνεχής εφαρμογή του νερού καθ' όλη τη διάρκεια άρδευσης μέσω του επιφανειακού συστήματος στάγδην με παροχή σταλακτών 2,3 L/h.
- Επιφανειακή διακοπτόμενη εφαρμογή (ΕΔ). Διακοπτόμενη εφαρμογή του νερού μέσω επιφανειακού συστήματος στάγδην με παροχή σταλακτών 2,3 L/h. Τον αρδευτικό κύκλο διάρκειας μιας ώρας ακολουθούσε παύση της άρδευσης ίδιας διάρκειας.
- Υποεπιφανειακή εφαρμογή νερού (ΥΣ). Συνεχής εφαρμογή του νερού καθ' όλη τη διάρκεια άρδευσης μέσω του υποεπιφανειακού συστήματος στάγδην με παροχή σταλακτών 2,3 L/h.
- Υποεπιφανειακή διακοπτόμενη εφαρμογή (ΕΔ). Διακοπτόμενη εφαρμογή του νερού μέσω υποεπιφανειακού συστήματος στάγδην με παροχή σταλακτών 2,3 L/h. Τον αρδευτικό κύκλο διάρκειας μιας ώρας ακολουθούσε παύση της άρδευσης ίδιας διάρκειας.

Η δόση άρδευσης που υπολογιζόταν κατά την διαδικασία του προγραμματισμού άρδευσης, ήταν η ίδια για όλες τις επιφανειακές και διαφορετική αλλά ίδια για όλες τις υποεπιφανειακές μεταχειρίσεις. Ανάμεσα στις επιφανειακές ή τις υποεπιφανειακές υπήρχε διαφοροποίηση ως προς την μέση ένταση της εφαρμογής αφού η αυτή ποσότητα νερού, εφαρμοζόταν σε διαφορετικές διάρκειες άρδευσης (περιλαμβανομένων και των παύσεων στην διακοπτόμενη εφαρμογή).

Της εγκατάστασης της καλλιέργειας προηγήθηκε η εγκατάσταση του υποεπιφανειακού συστήματος στάγδην άρδευσης. Οι υποεπιφανειακοί πλευρικοί τοποθετήθηκαν με τη χρήση υπεδαφοθέτη σε βάθος 0,45 m, σε ισαποχή 1 m. Η εγκατάσταση του επιφανειακού δικτύου άρδευσης έγινε αργότερα, όταν η ανάπτυξη των φυτών ήταν στο στάδιο του β' ζεύγους πραγματικών φύλλων. Όπως και στο υποεπιφανειακό σύστημα, η απόσταση μεταξύ των σταλακτηφόρων αγωγών ήταν 1,0 m. Έτσι, τόσο στο υπόγειο όσο και στο επιφανειακό δίκτυο ανάμεσα σε δύο σταλακτηφόρους αγωγούς παρεμβάλλονταν δύο σειρές φυτών.

Οι πλευρικοί αγωγοί (κατασκευασμένοι από την Netafim S.A.) από πολυαιθυλένιο, με διάμετρο 20 mm, είχαν ενσωματωμένους αυτορυθμιζόμενους σταλάκτες RAM με παροχή 2,3 L h⁻¹ σε ένα εύρος πίεσης από 50 έως 300 kPa, σε ισαποχή 0,8 m. Οι πλευρικοί στο υποεπιφανειακό σύστημα τοποθετήθηκαν με τον σταλάκτη προσανατολισμένο προς την επιφάνεια του εδάφους για την αποφυγή έμφραξης λόγω εδαφικού υλικού που κατακάθεται στο τέλος της άρδευσης.

Η ποσότητα του νερού που εφαρμοζόταν σε κάθε άρδευση ελέγχονταν και καταγραφόταν μέσω μηχανικών υδρομέτρων που ήταν συνδεδεμένα στον δευτερεύοντα αγωγό κάθε μεταχείρισης. Η καταγραφή των μετρήσεων γινόταν τουλάχιστον πριν την έναρξη και με το πέρας της άρδευσης. Ο έλεγχος των υδρομέτρων ήταν συνεχής, σε τακτά διαστήματα κατά τη διάρκεια της άρδευσης, προκειμένου να γίνουν αντιληπτές δυσλειτουργίες ή αστοχίες του συστήματος και κυρίως πιθανές διαρροές.

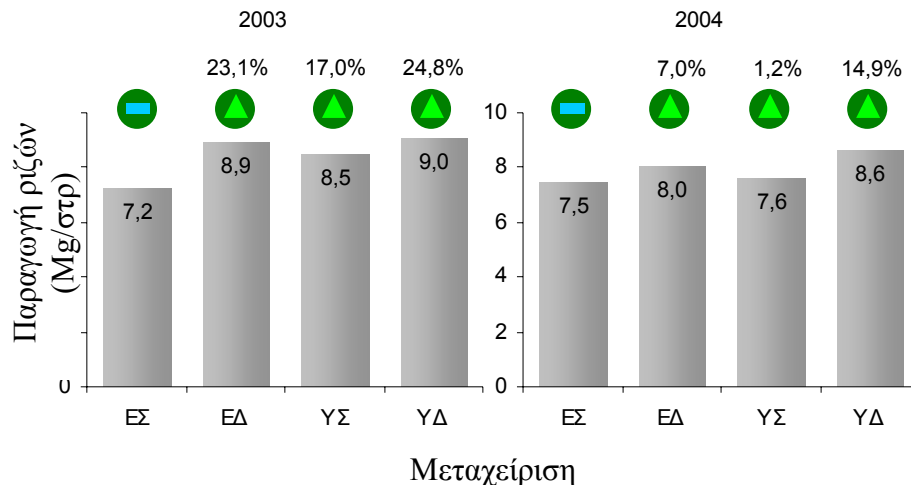
Η διάταξη Time-FM χρησιμοποιήθηκε για μετρήσεις της υγρασίας στην εδαφική κατατομή. Η μορφή της διαβροχής για κάθε μεταχείριση διερευνήθηκε στο πειραματικό αγροτεμάχιο σε όρυγμα που εκσκάφθηκε κάθετα στις γραμμές των πλευρικών. Η θέση του υγρού μετώπου καταγραφόταν με τη βοήθεια ενός πλέγματος (καμβά) που κατασκευάστηκε με διαστάσεις 1 x 1 m και διαστάσεις πλέγματος 0,1 x 0,1 m.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο Σχήμα 1, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της στρεμματικής απόδοσης σε βάρος ριζών για κάθε έτος πειραματισμού. Δίδεται επίσης η διαφοροποίηση της απόδοσης σε κάθε μεταχείριση ως ποσοστό της απόδοσης της επιφανειακής συνεχόμενης (ΕΣ) που θεωρείται η συμβατική.

Και στις δύο καλλιεργητικές περιόδους η διακοπτόμενη άρδευση έδωσε το υψηλότερο νωπό βάρος ριζών. Η αύξηση στην απόδοση της ΥΔ σε σχέση με την συμβατική έφθασε ένα μέσο ποσοστό για τα δύο έτη περίπου 20%. Η ΥΔ υπερέχει και ακολούθησε η ΕΔ. Η διακοπτόμενη υποεπιφανειακή άρδευση (ΥΔ) έδωσε το υψηλότερο νωπό βάρος ριζών διαφέροντας στατιστικώς σημαντικά με τις μεταχειρίσεις που έδωσαν την μικρότερη παραγωγή σε βάρος ριζών, ήτοι την συμβατική επιφανειακή στάγδην (ΕΣ).

Ανάμεσα στις επιφανειακές μεταχειρίσεις ΕΔ και ΕΣ, είναι χαρακτηριστική η υπεροχή της μεταχείρισης ΕΔ αλλά χωρίς σημαντική διαφορά κατά το δεύτερο έτος. Στις υποεπιφανειακές μεταχειρίσεις υπερέχει η ΥΔ χωρίς να διαφέρει σημαντικά.

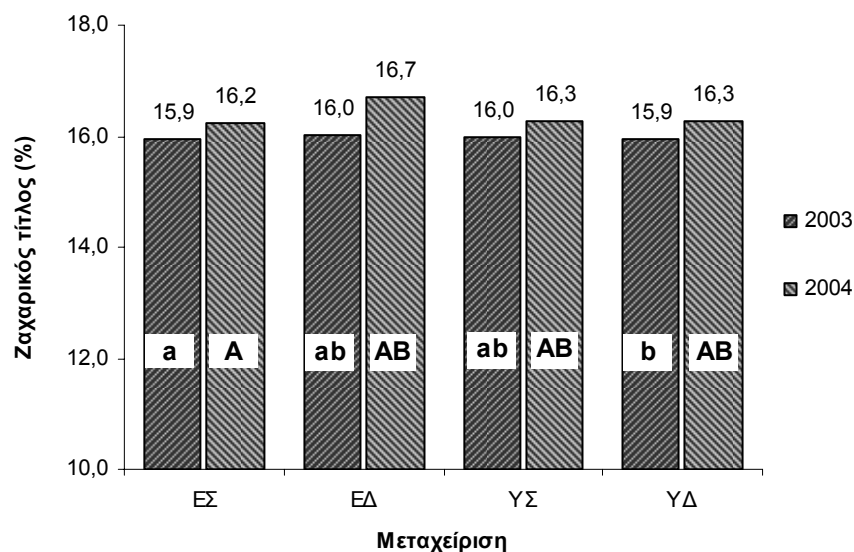


Σχήμα 1. Παραγωγή ριζών για κάθε μεταχείριση και ποσοστιαία διαφοροποίηση σε σχέση με την επιφανειακή (συμβατική) στάγδην.

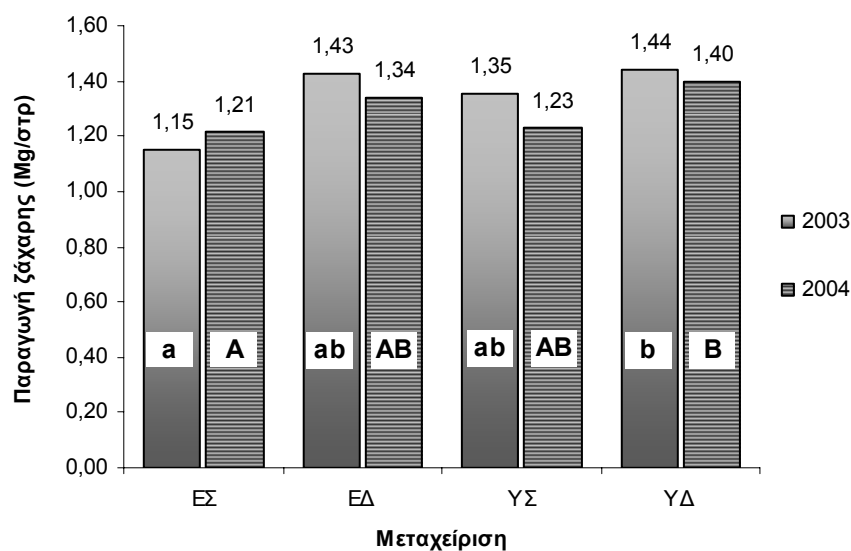
Στο Σχήμα 2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων των δειγμάτων των ζαχαροτευτλών που λήφθηκαν κατά την συγκομιδή κάθε καλλιεργητικής περιόδου όσον αφορά στον ζαχαρικό τίτλο. Δεν παρατηρείται συστηματική διαφοροποίηση μεταξύ των μεταχειρίσεων κατά τη διάρκεια των δύο καλλιεργητικών περιόδων.

Η παραγωγή ζάχαρης για κάθε μεταχείριση παρουσιάζεται στο Σχήμα 3 για κάθε καλλιεργητική περίοδο. Η απόδοση σε ζάχαρη έδωσε ανάλογα αποτελέσματα με αυτά της απόδοσης σε βάρος ριζών αφού η περιεκτικότητα σε ζάχαρη δεν παρουσίασε ιδιαίτερη διαφοροποίηση.

Έτσι, οι αρδεύόμενες με διακοπτόμενη τεχνική μεταχειρίσεις ΥΔ και ΕΔ έδωσαν την υψηλότερη παραγωγή ζάχαρης ανά στρέμμα και τα τρία έτη. Η μεταχείριση ΥΔ έδωσε την υψηλότερη απόδοση σε ζάχαρη, φθάνοντας μια μέση τιμή για τα δύο έτη 1,42 τόνους ανά στρέμμα και ακολούθησε η ΕΔ με μέση απόδοση για τα δύο έτη 1,38 τόνους ανά στρέμμα.



Σχήμα 2. Τιμές ζαχαρικού τίτλου για κάθε μεταχείριση.

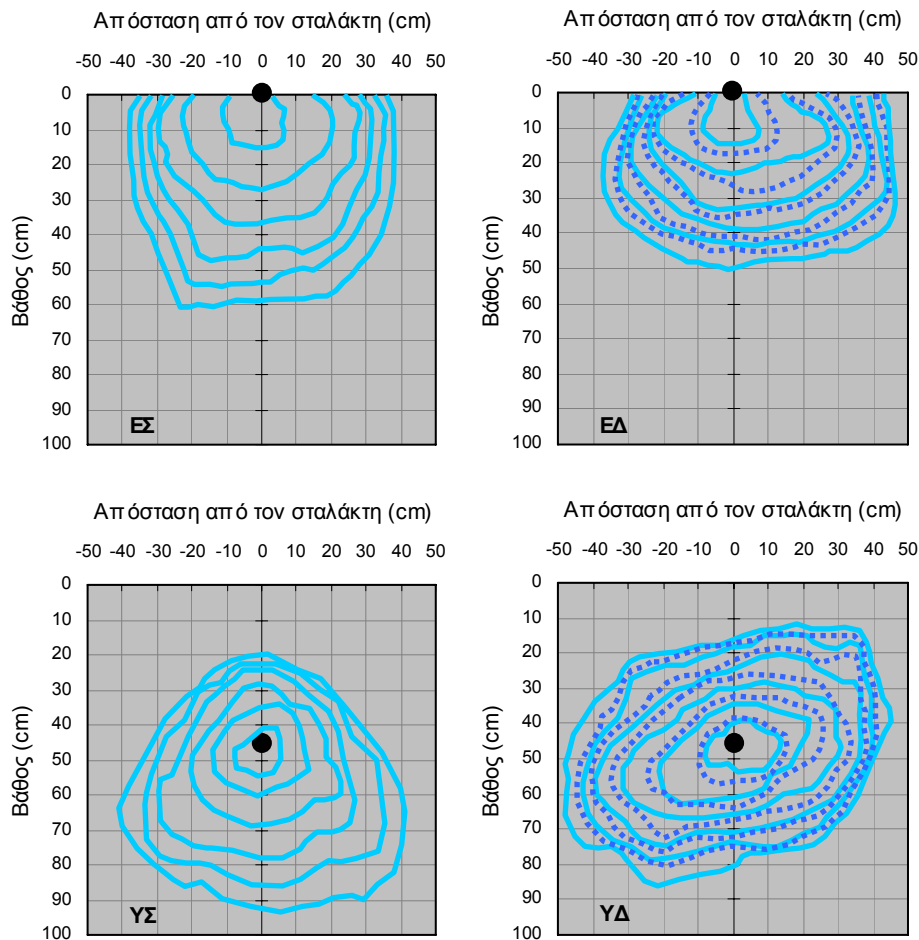


Σχήμα 3. Παραγωγή ζάχαρης για κάθε μεταχείριση.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων του υγρού μετώπου στο βάθος του εδάφους παρουσιάζονται στο Σχήμα 4. Γενική διαπίστωση αποτελεί η αυξημένη οριζόντια ανάπτυξη του υγρού μετώπου στην περίπτωση της διακοπτόμενης άρδευσης, τόσο στο υποεπιφανειακό σύστημα όσο και στο επιφανειακό. Ταυτοχρόνως παρατηρείται σχετικά μικρότερη καθοδική κίνηση στις μεταχειρίσεις της διακοπτόμενης εφαρμογής και ελαφρά μεγαλύτερη ανοδική κίνηση στην ΥΔ σχετικά με την ΥΣ. Στην διακοπτόμενη άρδευση οι επιφάνειες διαβροχής είναι περισσότερο κυκλικές παρά ελλειπτικές.

Ο όρος υγρό μέτωπο όπως χρησιμοποιείται εδώ αναφέρεται ουσιαστικά στην καταγραφή των ορατών διακριτών ορίων μεταξύ διαβρεγμένης και ξηρής επιφάνειας

[1]. Το όριο αυτό σαφώς και δεν αποτελεί το πραγματικό υγρό μέτωπο αφού δεν προσδιορίστηκε με την μέτρηση της εδαφικής υγρασίας προκειμένου αυτό να προσδιορισθεί επακριβώς, πλην όμως η διαδικασία που ακολουθήθηκε αποτελεί κοινή πρακτική μεταξύ αρκετών ερευνητών που ασχολήθηκαν με το ζήτημα [9, 10]. Παρ' όλη την έλλειψη ακρίβειας στον προσδιορισμό του υγρού μετώπου, η οπτική αυτή καταγραφή αποδίδει την διαφοροποίηση της μορφής της κατανομής του νερού υπό τις διαφορετικές τεχνικές εφαρμογής του.



Σχήμα 4. Καταγραφή του υγρού μετώπου.

Για την αξιολόγηση της κατανομής της υγρασίας σε κάθε μεταχείριση υπολογίστηκε η ομοιομορφία των τιμών της υγρασίας όπως μετρήθηκαν με την διάταξη Trime-FM χρησιμοποιώντας τον συντελεστή ομοιομορφίας του Christiansen (CU_0) (Πίνακας 1). Στον πίνακα δίδονται ακόμη, οι μέγιστες τιμές υγρασίας που καταγράφησαν (θ_{max}) καθώς και η επιφάνεια που κάλυπτε η διαθέσιμη υγρασία του εδάφους (A_{TAW}), υπολογισμένη ως η διαφορά μεταξύ των ισοϋψών υγρασίας της υδατοϊκανότητας και του σημείου μάρανσης, ως ποσοστό επί της συνολικής διαβρεχόμενης επιφάνειας.

Πίνακας 1. Παράμετροι αξιολόγησης της διαβροχής του εδάφους

Μεταχείριση	$\theta_{\max}$ (% κ.ο.)	CU _θ (%)	A _{TAW} (%)
ΕΣ	42,13	38,0	42,8
ΕΔ	33,89	59,6	68,7
ΥΣ	41,09	49,5	46,6
ΥΔ	35,98	58,4	55,9

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα της στρεμματικής απόδοσης σε βάρος ριζών έδειξαν πως και στις δύο καλλιεργητικές περιόδους η διακοπτόμενη άρδευση έδωσε το υψηλότερο νωπό βάρος ριζών. Η απόδοση σε ζάχαρη έδωσε ανάλογα αποτελέσματα αφού η περιεκτικότητα σε ζάχαρη δεν παρουσίασε ιδιαίτερη διαφοροποίηση. Έτσι, οι αρδευόμενες με διακοπτόμενη τεχνική μεταχειρίσεις ΥΔ και ΕΔ έδωσαν την υψηλότερη παραγωγή ζάχαρης ανά στρέμμα.

Γενική διαπίστωση αποτέλεσε η αυξημένη οριζόντια ανάπτυξη του υγρού μετώπου στην περίπτωση της διακοπτόμενης άρδευσης, τόσο στο υποεπιφανειακό σύστημα όσο και στο επιφανειακό. Ταυτοχρόνως παρατηρήθηκε σχετικά μικρότερη καθοδική κίνηση στις μεταχειρίσεις της διακοπτόμενης εφαρμογής και ελαφρά μεγαλύτερη ανοδική κίνηση στην ΥΔ σχετικά με την ΥΣ. Στην διακοπτόμενη άρδευση οι επιφάνειες διαβροχής είναι περισσότερο κυκλικές παρά ελλειπτικές.

Τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας συστήνουν πως με τη στρατηγική της διακοπτόμενης άρδευσης μπορεί να επιτευχθεί αύξηση της αποδοτικότητας χρήσης νερού και μείωσης του κινδύνου έκπλυσης από το ριζόστρωμα.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα έρευνα χρηματοδοτήθηκε από το Υπουργείο Εθνικής Παιδείας και Θρησκευμάτων με συγχρηματοδότηση από το Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο της Ευρωπαϊκής Ένωσης, μέσω του προγράμματος υποτροφιών έρευνας «ΗΡΑΚΛΕΙΤΟΣ», στα πλαίσια του 2ου Επιχειρησιακού Προγράμματος Εκπαίδευσης και Αρχικής Επαγγελματικής Κατάρτισης (ΕΠΕΑΕΚ).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. 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.
2. James, L.G., 1988. *Principles of Farm Irrigation System Design*. New York:Wiley.
3. Beeson, R.C., Haydu, J.J., 1995. Pulsing microirrigation for production of container-grown landscape ornamental: I. Plant growth and water conservation. In *Proc. 5th Int'l Microirrigation Congress*, ed. F. R. Lamm, 552-558. St. Joseph, Mich.: ASAE.
4. Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, Μ., Καλφούντζος, Δ., Παπανίκος, Ν., 2000. Αξιολόγηση της επιφανειακής και υπόγειας στάγδην άρδευσης σε καλλιέργεια ζαχαρότευτλων. *Πρακτικά 2ου Εθνικού Συνεδρίου Εταιρείας Γεωργικών Μηχανικών Ελλάδος* (ΕΓΜΕ), 28-30 Σεπτεμβρίου, Βόλος, σ. 157-164.
5. Sakellariou-Makrantonaki, M., Kalfountzos, D., Vyrlas, P., Kapetanios, B., 2002. Water saving using modern irrigation methods. *Proceedings of Hydrorama, 3rd International Forum: Integrated Water Management: The Key to Sustainable Water Resources*, EYDAP, March 21-22, Athens, Greece, pp. 96-102.
6. Sakellariou-Makrantonaki M., Kalfountzos, D., Vyrlas, P., 2003. Water saving and yield increase of sugar beet with subsurface drip irrigation. *Global Nest: the International Journal*, 4(2-3):85-91.

7. Elmaloglou, S., Diamantopoulos, E., 2007. Wetting front advance patterns and water losses by deep percolation under the root zone as influenced by pulsed drip irrigation. *Agric. Water Manage.* 90:160-163.
8. Μήτσιος, Ι., Τούλιος, Μ., Χαρούλης, Α., Γάτσιος, Φ., Φλωράς, Σ., 2000. *Εδαφολογική μελέτη και εδαφολογικός χάρτης του αγροκτήματος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στην περιοχή του Βελεστίνου*. Εκδόσεις Zymel. Αθήνα.
9. Battam, M.A., Sutton, B.G., 2003. Soil pits as a simple design aid for subsurface drip irrigation systems. *Irrig Sci.* 22:135–141.
10. Hanson, B.R., May, D.M., 2004. Effect of subsurface drip irrigation on processing tomato yield, water table depth, soil salinity, and profitability. *Agric. Water Manage.* 68(1):1-17.

(171)

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΑΖΩΤΟΥ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ ΑΓΡΟΥ ΚΑΛΛΙΕΡΓΟΥΜΕΝΟΥ ΜΕ ΚΑΛΑΜΠΟΚΙ ΕΝΣΙΡΩΣΗΣ

Β. Αντωνόπουλος¹, Ε. Λεκάκης² και Α. Παυλάτου-Βε³

¹Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Γεωπονική Σχολή, Τομέας Εγγείων
Βελτιώσεων, Γεωργικής Μηχανικής και Εδαφολογίας, Τ.Κ. 54124, Θεσσαλονίκη,
¹vasanton@agro.auth.gr, ²lekakichr@msn.com, ³ave@agro.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της εργασίας αυτής ήταν η εφαρμογή και η αξιολόγηση ενός μαθηματικού μοντέλου προσομοίωσης της κίνησης του νερού και της δυναμικής του αζώτου στο έδαφος, σε καλλιέργεια καλαμποκιού ενσίρωσης. Για την εκτίμηση της φαινόμενης πυκνότητας, των παραμέτρων της χαρακτηριστικής καμπύλης του εδάφους και της υδραυλικής αγωγιμότητας κορεσμού χρησιμοποιήθηκαν πεδοσυναρτήσεις από τη διεθνή βιβλιογραφία. Τα αποτελέσματα του μοντέλου έδειξαν ότι οι πεδοσυναρτήσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν ικανοποιητικώς στην πρόβλεψη της διακύμανσης της υγρασίας και της συγκέντρωσης του νιτρικού αζώτου του εδάφους.

SIMULATION OF SOIL WATER AND NITROGEN DYNAMICS IN A SILAGE CORNFIELD.

V. Antonopoulos¹, E. Lekakis² and A. Pavlatou – Ve³

¹Aristotle University of Thessaloniki, Sch. of Agriculture, Department of Hydraulics,
Soil Science and Agricultural Engineering, 54124, Thessaloniki,
¹vasanton@agro.auth.gr, ²lekakichr@msn.com, ³ave@agro.auth.gr

ANSTRACT

The objective of this work was the application and evaluation of a mathematical model for the simulation of water and nitrogen dynamics in a silage cornfield. Pedotransfer functions (PTFs) were used for the estimation of soil bulk density, the parameters of soil retention curve and saturated hydraulic conductivity. Results showed that simulations with the pedotransfer functions predict the water content and nitrate nitrogen reasonably well.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το αυξημένο ενδιαφέρον για τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της γεωργίας, έχει εντείνει την επιθυμία για την πρόβλεψη της εποχιακής διακύμανσης και κατανομής της εδαφικής υγρασίας αλλά και των μετασχηματισμών και της μεταφοράς του αζώτου στο έδαφος. Η χρήση μαθηματικών μοντέλων για την προσομοίωση του εδαφικού νερού και αζώτου γίνεται με σκοπό τη βέλτιστη διαχείριση και εφαρμογή τους με τελικό αποτέλεσμα την εξοικονόμηση υδατικών πόρων, την αύξηση της παραγωγής και τον περιορισμό των αρνητικών επιπτώσεων από την περίσσεια αζώτου στο περιβάλλον.

Για τη χρήση μοντέλων για την προσομοίωση της δυναμικής του εδαφικού νερού και της μεταφοράς των ουσιών στο έδαφος απαιτείται η εκτίμηση των υδραυλικών ιδιοτήτων του εδάφους όπως η χαρακτηριστική καμπύλη, η υδραυλική αγωγιμότητα αλλά και η φαινόμενη πυκνότητα. Η άμεση μέτρηση αυτών των ιδιοτήτων είναι μια εξειδικευμένη και χρονοβόρος διαδικασία. Η χρήση πεδοσυναρτήσεων αποτελεί μια πρόκληση για την αντικατάσταση των άμεσων μετρήσεων, καθώς απαιτούνται απλά δεδομένα που προσδιορίζονται με ευκολία και σε σύντομο χρονικό διάστημα [1], [2], [3].

Σκοποί της εργασίας αυτής είναι 1) να εξεταστούν ορισμένες πεδοσυναρτήσεις ως προς την εφαρμογή τους στην προσομοίωση του νερού και του αζώτου, και 2) η εκτίμηση του υδατικού ισοζυγίου και του ισοζυγίου μάζας αζώτου για τη χρονική περίοδο της ανάπτυξης του καλαμποκιού ενσίρωσης και την αμέσως επόμενη περίοδο.

2. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ WANISIM

2.1. Περιγραφή του μοντέλου WANISIM

Το μοντέλο WANISIM [4], [5] αναπτύχθηκε για την προσομοίωση της δυναμικής του νερού και του αζώτου στο περίπλοκο σύστημα έδαφος - φυτό - ατμόσφαιρα. Βασίζεται στην αριθμητική επίλυση των εξισώσεων που περιγράφουν τη ροή του νερού και τη μεταφορά και τους μετασχηματισμούς του αζώτου, σε έδαφος μεταβαλλόμενο βαθμού κορεσμού, με τη μέθοδο Galerkin των πεπερασμένων στοιχείων.

2.2. Υδραυλικές ιδιότητες του εδάφους

Για την επίλυση της εξίσωσης κίνησης του νερού, απαιτείται ο προσδιορισμός των συναρτησιακών σχέσεων της εδαφικής υγρασίας $\theta(h)$ και της υδραυλικής αγωγιμότητας $K(h)$. Το μοντέλο WANISIM χρησιμοποιεί τις εξισώσεις του van Genuchten [9] για τη χαρακτηριστική καμπύλη και την υδραυλική αγωγιμότητα που έχουν ως εξής:

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) / [1 + (\alpha|h|)^n]^m, \quad m = 1 - 1/n \quad (1)$$

$$K(h) = K_{sat} K_r = K_{sat} \left\{ 1 - (\alpha h)^{n-1} \cdot [1 + (\alpha h)^n]^{-m} \right\} / [1 + (\alpha h)^n]^{m/2} \quad (2)$$

όπου θ είναι η περιεχόμενη εδαφική υγρασία ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), θ_r και θ_s είναι η υπολειμματική και η υγρασία κορεσμού αντίστοιχα ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), h είναι το ύψος πίεσης (cm), α και n είναι εμπειρικές σταθερές και K_{sat} είναι η υδραυλική αγωγιμότητα κορεσμού (cm hr^{-1}). Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί και η σχέση του Gardner [10] υπολογισμού της υδραυλικής αγωγιμότητας:

$$K(h) = K_{sat} / (1 + (b \cdot h)^\lambda) \quad (3)$$

όπου b και λ είναι εμπειρικές παράμετροι.

Με πεδοσυναρτήσεις είναι δυνατόν να εκτιμηθούν οι παράμετροι των συναρτήσεων της χαρακτηριστικής καμπύλης και της υδραυλικής αγωγιμότητας από τις φυσικές ιδιότητες του εδάφους που εύκολα προσδιορίζονται στο εργαστήριο.

Οι Vereecken et al. [11] πρότειναν πεδοσυναρτήσεις για τις τέσσερις παραμέτρους

της εξίσωσης της χαρακτηριστικής καμπύλης του van Genuchten (1). Η μορφή των συναρτήσεων αυτών και ο συντελεστής συσχέτισης για κάθε σχέση δίνονται παρακάτω.

$$\theta_s = 0,838 - 0,283(\rho_b) + 0,0013(CI), r^2 = 0,849 \quad (4)$$

$$\theta_r = 0,015 + 0,005(CI) + 0,014(C), r^2 = 0,702 \quad (5)$$

$$\ln(\alpha) = -2,486 + 0,025(Sa) - 0,351(C) - 2,617(\rho_b) - 0,023(CI), r^2 = 0,621 \quad (6)$$

$$\ln(n) = 0,053 - 0,009(Sa) - 0,013(CI) + 0,00015(Sa)^2, r^2 = 0,556 \quad (7)$$

όπου ρ_b (gr cm^{-3}) είναι η φαινόμενη πυκνότητα του εδάφους, C είναι το ποσοστό του περιεχόμενου οργανικού άνθρακα, CI και Sa είναι τα ποσοστά της περιεχόμενης αργίλου και άμμου αντίστοιχα. Οι παραπάνω πεδοσυναρτήσεις προσδιορίστηκαν για τιμή της παραμέτρου $m = 1$.

Οι Vereecken et al. [11] πρότειναν και τις εξής πεδοσυναρτήσεις για την εκτίμηση των παραμέτρων της σχέσεως του Gardner (εξ. 3) για την υδραυλική αγωγιμότητα:

$$\ln(K_{sat}) = 20,62 - 0,96 \ln(CI) - 0,66 \ln(Sa) - 0,46 \ln(C) - 8,43(\rho_b), r^2 = 0,2 \quad (8)$$

$$\ln(b) = -0,73 - 0,0187(Sa) + 0,058(CI), r^2 = 0,315 \quad (9)$$

$$\ln(\lambda) = 1,186 - 0,194 \ln(CI) - 0,0489 \ln(Si), r^2 = 0,533 \quad (10)$$

όπου Si είναι το ποσοστό της περιεχόμενης ιλύος.

Οι Saxton et al. [12] πρότειναν σχέσεις για τον προσδιορισμό της περιεχόμενης υγρασίας εδάφους σε διάφορα ύψη πίεσης ως εξής:

$$\theta = (h/A)^{1/B}, \text{ για } 100 < h \leq 15.000 \quad (11)$$

$$\theta = \theta_{100} + (100 - h)(\theta_s - \theta_{100})/(100 - h_e), \text{ για } h_e < h \leq 100 \quad (12)$$

$$\theta = \theta_s, \text{ για } 0 \leq h \leq h_e \quad (13)$$

όπου θ_{100} είναι η υγρασία σε ύψος πίεσης $h = 100 \text{ cm}$, A και B είναι σταθερές και h_e είναι η πίεση των φυσαλίδων αέρα που προσδιορίζονται ως εξής:

$$\ln(A) = -4,396 - 0,0715(CI) - 4,880 \cdot 10^{-4}(Sa)^2 - 4,285 \cdot 10^{-5}(Sa)^2 \quad (14)$$

$$\ln(B) = -3,140 - 0,00222(CI)^2 - 3,484 \cdot 10^{-5}(Sa)^2(CI) \quad (15)$$

$$\theta_s = 0,332 - 7,251 \cdot 10^{-4}(Sa) + 0,1276 \log_{10}(CI) \quad (16)$$

$$h_e = 1000(-0,108 + 0,341 \theta_s) \quad (17)$$

$$\ln(\theta_{100}) = [2,302 - \ln(A)]/B \quad (18)$$

Με το πρόγραμμα Rosetta [13] και δεδομένα εισόδου την κοκκομετρική σύσταση, τη φαινόμενη πυκνότητα και τις τιμές της περιεχόμενης υγρασίας σε ύψη πίεσης 33 και 1500 kPa, υπολογίζονται οι παράμετροι θ_s , θ_r , α , n και K_{sat} της εξίσωσης του van Genuchten.

Οι Wösten et al. [14] μελέτησαν μια σειρά από συνεχείς πεδοσυναρτήσεις σε εδάφη της Ευρωπαϊκής βάσης δεδομένων HYPRES. Πρότειναν σχέσεις που συνυπολογίζουν την επίδραση του βάθους του εδάφους με την εισαγωγή μιας μεταβλητής, topsoil , που λαμβάνει τις τιμές 0 ή 1 ανάλογα με το βάθος. Το επιφανειακό έδαφος θεωρείται ότι φτάνει μέχρι το βάθος των 25 cm [15].

3. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Τα απαραίτητα πειραματικά δεδομένα συγκεντρώθηκαν από πειραματικό τεμάχιο έκτασης 0,15 στρεμμάτων στο Αγρόκτημα του Α.Π.Θ.. Η σπορά πραγματοποιήθηκε στις 30 Απριλίου με την ποικιλία αραβοσίτου PR 31G98, σε αποστάσεις 0,80 m μεταξύ των γραμμών και 0,15 m επί της γραμμής. Η πυκνότητα των σπόρων ήταν 88.000 φυτά/εκτάριο. Στις 19 Απριλίου εφαρμόστηκαν 22 kg N ανά στρέμμα (82% $\text{NH}_4\text{-N}$ και 18% $\text{NO}_3\text{-N}$). Με τις αρδεύσεις εφαρμόστηκαν 355 mm νερού και η βροχόπτωση από 5 Απριλίου έως 28 Ιουλίου ανήλθε σε 98,4 mm. Η μέθοδος άρδευσης ήταν καταιονισμός. Η καλλιέργεια συγκομίστηκε στις 9 Αυγούστου, στο στάδιο του ενσιρώματος.

Η φαινόμενη πυκνότητα, ρ_b , για κάθε στρώση του εδάφους, εκτιμήθηκε με βάση τα ποσοστά της οργανικής ουσίας και τη μηχανική σύσταση, ως η μέση τιμή των τιμών που

προέκυψαν από 5 διαφορετικές πεδοσυναρτήσεις που επιλέχθηκαν από τη διεθνή βιβλιογραφία [6], [7], [8]. Οι φυσικές ιδιότητες του εδάφους δίνονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Φυσικές ιδιότητες του εδάφους

Βάθος	Άμμος (%)	Ιλύς (%)	Άργιλος (%)	ρ_b	Χαρακτηρισμός
0-25	67,46	19,46	13,08	1,345	sandy loam
25-45	72,42	18,38	9,2	1,474	sandy loam
45-65	80,46	15,22	4,32	1,546	loamy sand
65-120	80,22	13,34	6,44	1,53	loamy sand

Στον Πίνακα 2 δίνονται οι τιμές των παραμέτρων της εξίσωσης του van Genuchten για τη χαρακτηριστική καμπύλη και η κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα όπως υπολογίστηκαν από τα δεδομένα του πειραματικού αγρού για τις τέσσερις στρώσεις εδάφους με εφαρμογή τριών διαφορετικών ομάδων πεδοσυναρτήσεων.

Πίνακας 2. Παράμετροι των εξισώσεων του van Genuchten

Πεδοσυναρτήσε ις	Βάθος cm	θ_s $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	θ_r $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	a cm^{-1}	n	K_{sat} cm hr^{-1}
Vereecken et al.	0-25	0,4744	0,0945	0,0069	0,9593	2,349
	25-45	0,4328	0,0667	0,0075	1,0707	1,606
	45-65	0,4061	0,0396	0,0091	1,2761	2,251
	65-120	0,4134	0,0518	0,0087	1,2369	1,447
Wösten et al.	0-25	0,4429	0,01	0,0546	1,2757	4,047
	25-45	0,4064	0,01	0,0619	1,3263	1,882
	45-65	0,3825	0,01	0,0617	1,4357	1,781
	65-120	0,3847	0,01	0,0685	1,3922	1,868
Saxton et al.	0-25	0,4293	0,0405	0,0383	1,3434	3,956
	25-45	0,3891	0,0333	0,0360	1,3521	2,645
	45-65	0,3660	0,0253	0,0407	1,3737	2,922
	65-120	0,3762	0,0294	0,0411	1,3706	3,123

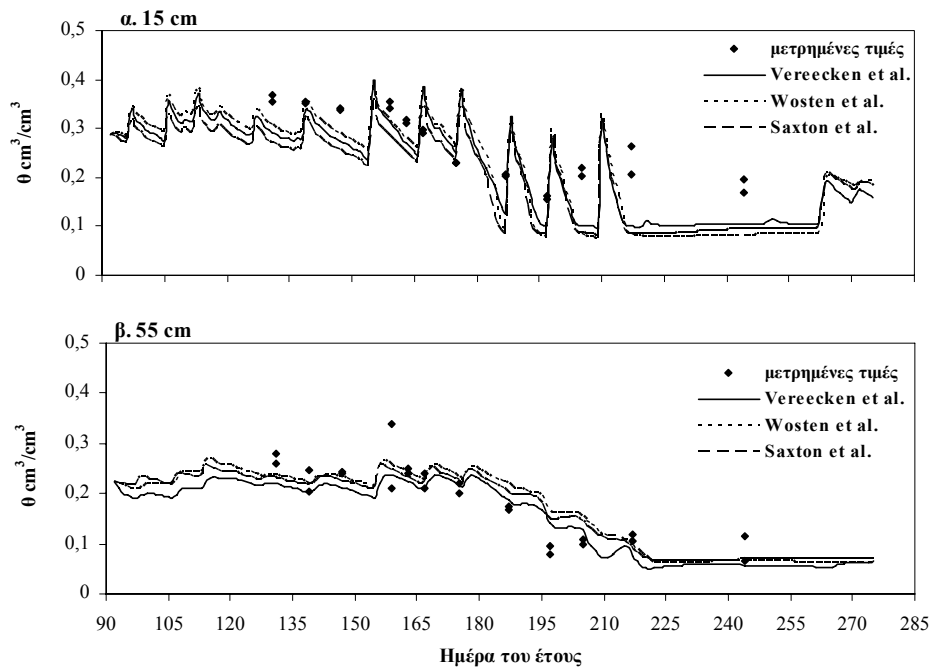
Στον πειραματικό αγρό λαμβάνονταν δείγματα εδάφους κάθε 7 έως 15 ημέρες σε αντιπροσωπευτικό βάθος κάθε εδαφικής στρώσεως. Στα δείγματα προσδιοριζόταν η περιεχόμενη εδαφική υγρασία και η συγκέντρωση του ανόργανου και ολικού αζώτου. Διάφορα χαρακτηριστικά της ανάπτυξης των φυτών μετρήθηκαν κατά τη διάρκεια της βλαστικής περιόδου του καλαμποκιού. Οι μετρήσεις αυτές περιλάμβαναν το δείκτη φυλλικής επιφάνειας (LAI), το ύψος των φυτών, τον αριθμό των φύλλων, την ξηρά φυτομάζα και το περιεχόμενο ολικό άζωτο των φυτών.

Η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς υπολογίστηκε από τα ημερήσια μετεωρολογικά δεδομένα από το σταθμό της Μίκρας. Ως σταθερές των μετασχηματισμών του αζώτου στο έδαφος, χρησιμοποιήθηκαν τιμές από τη βιβλιογραφία οι οποίες διορθώθηκαν και προσαρμόστηκαν κατά τη φάση ρύθμισης του μοντέλου.

4. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1. Αποτελέσματα νερού και αζώτου

Η προσομοίωση της δυναμικής του νερού και του αζώτου πραγματοποιήθηκε και για τις τρεις ομάδες πεδοσυναρτήσεων εκτίμησης των παραμέτρων των εξισώσεων του van Genuchten. Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται η διακύμανση της εδαφικής υγρασίας στα βάθη των 15 και 55 cm, στο χρονικό διάστημα από 01/04 έως 30/09/2004, με τις μετρημένες και με τις υπολογισμένες, από το μοντέλο WANISIM τιμές.

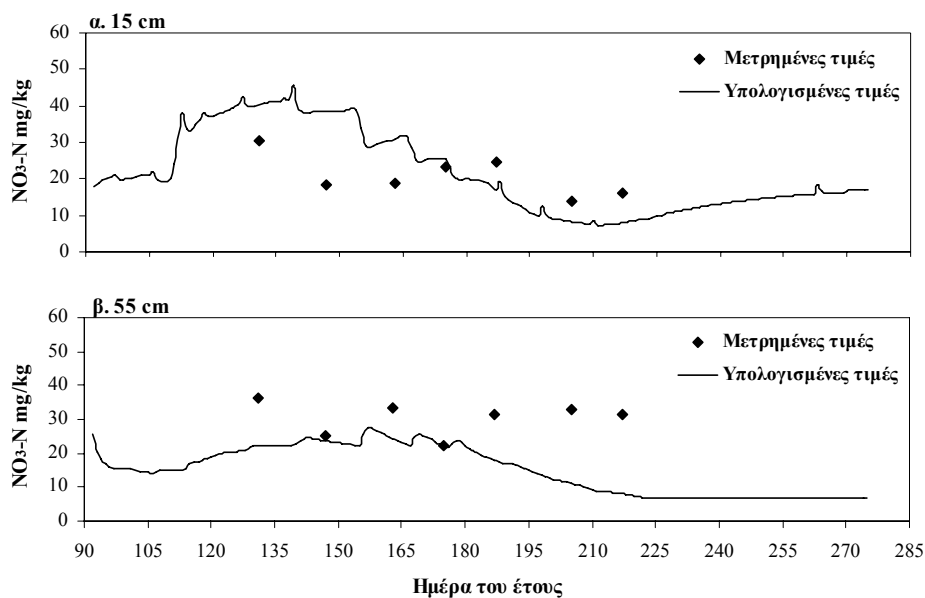


Σχήμα 1. Σύγκριση μετρημένων και υπολογισμένων τιμών εδαφικής υγρασίας

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1, οι υπολογισμένες τιμές με τις χαρακτηριστικές καμπύλες, οι παράμετροι των οποίων προέκυψαν από τρεις ομάδες πεδοσυναρτήσεων, ακολουθούν τις διακυμάνσεις στο χρόνο της μετρημένης εδαφικής υγρασίας. Οι διαφορές ανάμεσα στα αποτελέσματα του μοντέλου από τις τρεις χαρακτηριστικές καμπύλες είναι μικρές. Τα παραπάνω επιβεβαιώνονται και από τα στατιστικά κριτήρια [1], [5] που δίνονται στον Πίνακα 3.

Η κίνηση του νερού επηρεάζει άμεσα τη μεταφορά και τους μετασχηματισμούς του αζώτου του εδάφους. Καθώς τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της υγρασίας δεν διαφέρουν ανάμεσα στις διαφορετικές περιπτώσεις πεδοσυναρτήσεων όμοια δεν διαφέρουν και αυτά του αζώτου. Για την προσομοίωση του αζώτου χρησιμοποιήθηκαν οι πεδοσυναρτήσεις των Vereecken et al. [11] των παραμέτρων της χαρακτηριστικής καμπύλης καθώς από τα στατιστικά κριτήρια προκύπτει ότι υπερτερούν σε σχέση με τις πεδοσυναρτήσεις των Saxton et al. [12] και Wosten et al. [14], στην προσομοίωση της υγρασίας του εδάφους.

Στο Σχήμα 2 παρουσιάζονται οι μετρημένες και υπολογισμένες τιμές συγκέντρωσης του νιτρικού αζώτου στα βάθη των 15 και 55 cm, στο χρονικό διάστημα από 01/04 έως 30/09/2004.



Σχήμα 2. Μετρημένες και υπολογισμένες τιμές νιτρικού αζώτου σε mg/kg.

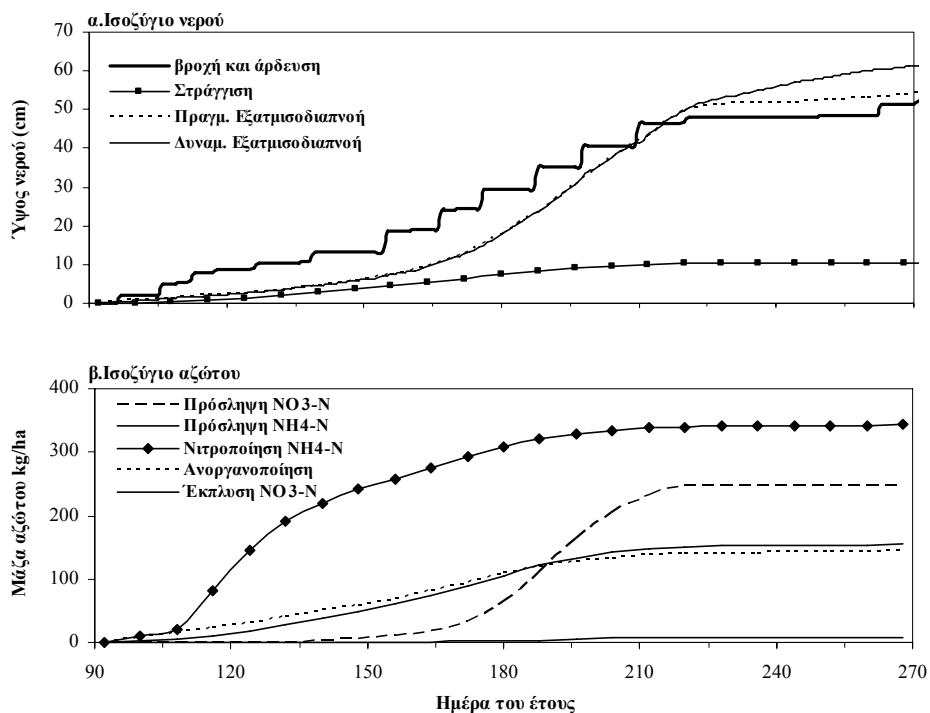
Πίνακας 3. Τιμές στατιστικών κριτηρίων (μέσο σφάλμα, E, σφάλμα τετραγώνου αποκλίσεων, RMSE, συντελεστής ελλείμματος μάζας, CRM, και αποδοτικότητα του μοντέλου, EF) για την προσομοίωση της υγρασίας και του αζώτου.

Βάθος εδάφους (cm)	Στατιστικό κριτήριο προσομοίωσης υγρασίας			
	E (cm ³ cm ⁻³)	RMSE (%)	CRM	EF
Vereecken et al.				
10-20	-0,049	27,714	0,180	-0,131
50-60	-0,012	17,236	0,066	0,776
Wösten et al.				
10-20	-0,052	31,237	0,194	-0,437
50-60	0,008	18,083	-0,042	0,754
Saxton et al.				
10-20	-0,070	32,450	0,260	-0,550
50-60	0,000	15,664	0,002	0,815
Βάθος εδάφους (cm)	Στατιστικό κριτήριο προσομοίωσης νιτρικού αζώτου			
	E (cm ³ /cm ³)	RMSE (%)	CRM	EF
Vereecken et al.				
10-20	3,315	52,322	-0,939	-3,196
50-60	-11,840	47,716	-0,013	-8,946

4.2. Ισοζύγιο νερού και αζώτου

Η αθροιστική εξατμισοδιαπνοή που υπολογίστηκε από το μοντέλο είναι ίση με 50,86 cm, με την πραγματική εξατμηση και διαπνοή να ανέρχονται σε 10,27 cm και 40,59 cm νερού αντίστοιχα (Σχήμα 3). Η αθροιστική βαθιά διήθηση υπολογίστηκε ίση με 10,2 cm νερού. Το ισοζύγιο του νερού για όλη την περίοδο προσομοίωσης (Απρίλιος-Αύγουστος) προέκυψε ελλειμματικό κατά 13,17 cm νερού.

Η αθροιστική πρόσληψη $\text{NH}_4\text{-N}$ και $\text{NO}_3\text{-N}$ υπολογίστηκαν ίσες με 8,8 kg/ha και 248,3 kg/ha, αντίστοιχα (Σχήμα 3). Το ισοζύγιο του αζώτου προέκυψε ελλειμματικό κατά 61,28 kg/ha. Η αθροιστική έκπλυση $\text{NH}_4\text{-N}$ και $\text{NO}_3\text{-N}$ προέκυψαν ίσες με 5,4 kg/ha και 151 kg/ha, αντίστοιχα. Η αθροιστική νιτροποίηση $\text{NH}_4\text{-N}$ υπολογίστηκε 340 kg/ha, η ανοργανοποίηση της οργανικής ουσίας του εδάφους προέκυψε ίση με 139 kg/ha και η απονιτροποίηση του $\text{NO}_3\text{-N}$ 7,12 kg/ha.



Σχήμα 3. Ισοζύγιο νερού και αζώτου στο έδαφος

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με το μοντέλο WANISIM και τη σύγκριση με τις μετρημένες τιμές υγρασίας και νιτρικού αζώτου, προκύπτει ότι οι πεδосυναρτήσεις είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν με επιτυχία για την εκτίμηση των παραμέτρων της χαρακτηριστικής καμπύλης. Έτσι αποφεύγεται το σύνολο των εργασιών στον αγρό και στο εργαστήριο για τον προσδιορισμό των παραμέτρων της χαρακτηριστικής καμπύλης που απαιτούν χρόνο και ειδικό εξοπλισμό. Η διερεύνηση πεδосυναρτήσεων σε ευρεία κλίμακα, η προσαρμογή τους σε συγκεκριμένους τύπους εδαφών, κλιμάτων και περιοχών και η δημιουργία βάσεων εξισώσεων στο μέλλον, θα διευκολύνουν τη χρήση μοντέλων προσομοίωσης σε επίπεδο παραγωγικών μονάδων για την ορθότερη διαχείριση του νερού και του αζώτου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Antonopoulos, V.Z., 2000. Modeling of soil water dynamics in an irrigated corn field using direct and pedotransfer functions for hydraulic properties. *Journal of Irrigation and Drainage Systems*, 14: 325-342
2. Kaur, R., Kumar, S., Gurung, H.P., 2002. A pedotransfer function for estimating soil bulk density from basic soil data and its comparison with existing PTFs. *Australian Journal of Soil Research*, CSIRO Publishing, 40: 847-857.
3. Nemes, A., Schaap, M.G. and Wösten, J.H.M., 2003. Functional evaluation of pedotransfer functions derived from different scales of data collection. *Soil Science Society of America Journal*, 67: 1093-1102.
4. Αντωνόπουλος, Β., 1998. WANISIM, Μονοδιάστατο μοντέλο προσομοίωσης της δυναμικής του νερού και του αζώτου στο έδαφος. Μονογραφία, Τμήμα Γεωπονίας, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, σελ.82.
5. Antonopoulos, V. and Wyseure, G., 1998. Modeling of water and nitrogen dynamics on an undisturbed soil and a restored soil after open-cast mining. *Agricultural Water Management*, 37: 21-40.
6. Manrique, L.A. and Jones, C.A., 1991. Bulk density of soils in relation to soil physical and chemical properties. *Soil Science Society of America Journal*, 55: 476-481.
7. Alexander E.B., 1980. Bulk density of California soils in relation to other soil properties. *Soil Science Society of America Journal*, 44: 689-692.
8. Rawls, W.J., 1983. Estimating soil bulk density from particle size analysis and organic matter content. *Soil Science*, 135: 123-125.
9. van Genuchten, M.T., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44: 892–898.
10. Gardner, W.R., 1958. Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. *Soil Science*, 85: 228-232.
11. Vereecken, H., Maes, J., Feyen, J. and Darius, P., 1989. Estimating the soil moisture retention characteristics from texture, bulk density and carbon content. *Soil Science*, 148: 389–403.
12. Saxton, K.E., Rawls, W.J., Romberger, J.S. and Papendick, R.I., 1986. Estimating generalized soil water characteristics from texture. *Soil Science Society of America Journal*, 50: 1031–1036.
13. Schaap, M.G., Leij, F.J. and van Genuchten. M.T., 2001. ROSETTA: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of Hydrology*, 251(3–4): 163–176.
14. Wösten, J.H.M., Lilly, A., Nemes, A. and Le Bas, C., 1999. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. *Geoderma* 90:169–185.
15. Dexter, A.R., Czyz E.A. and Gate O.P., 2004. Soil structure and the saturated hydraulic conductivity of subsoils. *Soil and Tillage Research*, 79: 185-189.

(173)

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΑΖΩΤΟΥ ΣΕ ΟΡΥΖΩΝΑ ΜΕ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ GLEAMS

B.Z. Αντωνόπουλος^{1a}, B.Γ. Ασchonίτης^{1b}, M.H. Rahil¹, E.H. Λεκάκης¹

¹ Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Γεωπονική Σχολή, Τομέας Εγγείων Βελτιώσεων, Γεωργ. Μηχ. & Εδαφ., Τ.Κ. 54124, Θεσ/νίκη, avasanton@agro.auth.gr, bvaschoni@agro.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία γίνεται ανάλυση του ισοζυγίου του νερού και του αζώτου, σε πειραματικό ορυζώνα της περιοχής Σίνδου Θεσσαλονίκης. Η διερεύνηση επικεντρώνεται στην ανάλυση και επεξεργασία των υδρολογικών, υδραυλικών, εδαφοχημικών και φυτικών παραμέτρων του ορυζώνα με το μοντέλο GLEAMS V3.0. Για την εφαρμογή του μοντέλου κρίθηκε απαραίτητη η τροποποίησή του, έτσι ώστε να λαμβάνει υπόψη την επίδραση της κατάκλυσης στο ισοζύγιο νερού και αζώτου. Η περίοδος προσομοίωσης είναι ένα έτος (2005) και από τα αποτελέσματα που εξήχθησαν, προκύπτει ότι το μοντέλο περιγράφει ικανοποιητικά το ισοζύγιο νερού και αζώτου στους ορυζώνες.

SIMULATION OF WATER AND NITROGEN BALANCE IN RICE FIELD WITH THE GLEAMS MODEL

V.Z. Antonopoulos^{1a}, V.G. Aschonitis^{1b}, M.H. Rahil¹, E.H. Lekakis¹

¹ Aristotle University of Thessaloniki, Sch. of Agriculture, Department of Hydraulics, Soil Sc. and Agriculture Engineering, 54124, Thessaloniki, vasanton@agro.auth.gr, bvaschoni@agro.auth.gr

ABSTRACT

This research work investigates the water and nitrogen balance of an experimental rice-field in Sindos-Thessaloniki region. The investigation focuses on the analysis and elaboration of hydrologic, hydraulic, chemical and plant parameters of the rice-field with the GLEAMS V3.0 model. For the implementation of the model, modifications were necessary so as to describe ponding conditions and their effects on the water and nitrogen balance. The simulation period is one year (2005) and it is inferred from the simulation results that the model can describe satisfactorily the rice-field's water and nitrogen balance.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το ρύζι είναι η καλλιέργεια με την μεγαλύτερη κατανάλωση νερού, λόγω της μεθόδου άρδευσης (κατάκλυση). Στην πεδιάδα Θεσσαλονίκης φιλοξενούνται οι μεγαλύτερες εκτάσεις ορυζώνων πανελληνίως, οι οποίες ανέρχονται στα 120-195 km² [1]. Οι εκτάσεις αυτές βρίσκονται εντός των δέλτα των ποταμών Αξιού-Γαλλικού, τα οποία παρόλο που αποτελούν προστατευόμενες περιοχές, δέχονται μέρος των γεωργικών λυμάτων της περιοχής.

Η υιοθέτηση πρακτικών βέλτιστης διαχείρισης των υδατικών πόρων στους ορυζώνες είναι αναγκαία τόσο για την εξοικονόμηση νερού όσο και για την προστασία τους από τη ρύπανση λόγω των αζωτούχων λιπασμάτων. Για να επιτευχθεί ο στόχος αυτός, είναι αναγκαίο να εκτιμηθούν οι συνιστώσες του ισοζυγίου του νερού και του αζώτου στους ορυζώνες με τη βοήθεια διαφόρων μαθηματικών μοντέλων. Οι σημαντικότερες εφαρμογές μαθηματικών μοντέλων για την καλλιέργεια του ρυζιού έγιναν με τα μοντέλα PADDIMOD [2], GLEAMS-PADDY [3], SAWAH [4], κ.α., οι οποίες όμως αναφέρονται σε χώρες εκτός της ζώνης των μεσογειακών χωρών.

Σκοπός της εργασίας είναι η εκτίμηση του ισοζυγίου του νερού και του αζώτου σε πειραματικό ορυζώνα για την καλλιεργητική περίοδο (2005) με το μοντέλο GLEAMS V3.0 [5] μετά από τροποποιήσεις του. Για τη ρύθμισή του μετρήθηκαν όλες οι εισροές και εκροές του νερού και αζώτου, οι φυσικο-χημικές και οι υδραυλικές παράμετροι του εδάφους καθώς και τα χαρακτηριστικά ανάπτυξης της καλλιέργειας του ρυζιού.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1. Περιγραφή του μοντέλου GLEAMS

Το μοντέλο GLEAMS V3.0 [5] είναι ημιεμπειρικό και μονοδιάστατο κατά την κατακόρυφη διεύθυνση. Στις δυνατότητες του μοντέλου περιλαμβάνονται η περιγραφή της κίνησης του νερού στο εδαφικό προφίλ, η εκτίμηση της επιφανειακής απορροής, της διάβρωσης, της μεταφοράς μάζας των θρεπτικών στοιχείων (αζώτου και φωσφόρου) καθώς και των φυτοφαρμάκων στο έδαφος. Κύριος στόχος του μοντέλου είναι η εκτίμηση των συνολικών εκροών των αγροχημικών ουσιών από τις γεωργικές δραστηριότητες. Για την εφαρμογή του μοντέλου σε συνθήκες καλλιέργειας ρυζιού κρίθηκε απαραίτητη η τροποποίησή του, έτσι ώστε να λαμβάνει υπόψη τις συνθήκες κατάκλυσης και την επιρροή τους στο ισοζύγιο νερού και αζώτου στους ορυζώνες.

2.2.1. Υδρολογικό υπομοντέλο

Ο βασικότερος παράγοντας για τον υπολογισμό του υδατικού ισοζυγίου στους ορυζώνες είναι το ύψος του λιμνάζοντος νερού WD στην επιφάνεια του εδάφους (Σχήμα 1).

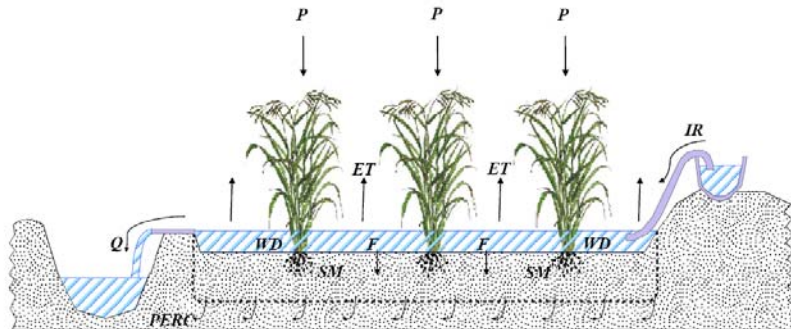
Για τον υπολογισμό του, το μοντέλο τροποποιήθηκε σύμφωνα με την παραδοχή ότι απορροή συμβαίνει μόνο όταν το νερό ξεπερνά το ύψος του αναχώματος στα κατάντη του ορυζώνα [3]. Κάτω από αυτές τις συνθήκες, η εκτίμηση της επιφανειακής απορροής και του συνδυασμένου υδατικού ισοζυγίου τόσο στο έδαφος όσο και στο νερό κατάκλυσης δίνεται αντίστοιχα από τις εξισώσεις

$$\begin{aligned} \text{όταν } WD_i > HD \text{ τότε } Q_i &= WD_i - HD \text{ και } WD_i = HD \\ \text{όταν } WD_i \leq HD \text{ τότε } WD_i &= WD_i \text{ και } Q_i = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

και

$$\left\{ \begin{matrix} WD_i \\ + \\ SM_i \end{matrix} \right\} = \left\{ \begin{matrix} WD_{i-1} + P_i + IR_i - F_i - Q \\ + \\ SM_{i-1} + F_i - PERC_i \end{matrix} \right\} - ET \quad (2)$$

όπου WD: το ύψος λιμνάζοντος νερού στην επιφάνεια του εδάφους (cm), Q: η επιφανειακή εκροή (cm day⁻¹), P: η βροχόπτωση (cm day⁻¹), IR: η άρδευση (cm day⁻¹), ET: η εξατμισοδιαπνοή (cm day⁻¹), F: η διήθηση (cm day⁻¹) και PERC: η στράγγιση ή βαθειά διήθηση (cm day⁻¹).



Σχήμα 1. Αναπαράσταση του ισοζυγίου νερού σε τυπικό ορυζώνα

Η εξίσωση διήθησης που χρησιμοποιείται, είναι μια τροποποίηση της εξίσωσης των Green and Ampt [6], η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{dF}{dt} = K_s \left(\frac{H_c \phi (ST_o - ST_i) + F}{F} \right) \quad (3)$$

όπου F: η αθροιστική διηθητικότητα (cm), K_s: η αποτελεσματική κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα (cm/day), t: ο χρόνος (day), H_c: διαφορά υδραυλικού φορτίου (cm), ST_i: ο αρχικός βαθμός κορεσμού πριν τη βροχόπτωση ή άρδευση, ST_o: ο τελικός βαθμός κορεσμού ο οποίος είναι ίσος με την μονάδα (κορεσμός 100%) τη χρονική στιγμή κατά την οποία αρχίζει να λιμνάζει το νερό στην επιφάνεια και φ: το πορώδες (cm³/cm³). Η διήθηση του νερού προς τις βαθύτερες στρώσεις γίνεται με τη μέθοδο διόδευσης της εδαφικής υγρασίας (storage routing technique) [6], σύμφωνα με την οποία λαμβάνει χώρα καθοδική κίνηση νερού προς τα βαθύτερα στρώματα μετά την πλήρωση της υδατοϊκανότητας των υπερκείμενων στρώσεων από τη βροχή ή την άρδευση. Το μοντέλο λαμβάνει υπόψη την ύπαρξη υπόγειας στάθμης και την στράγγιση του εδάφους όταν υπάρχει στραγγιστική τάφρος. Η παροχή στράγγισης ανά μονάδα πλάτους εξαρτάται από την απόσταση της επιφάνειας του εδάφους από τη στάθμη του νερού στη στραγγιστική τάφρο. Η ρύθμισή της έγινε ταυτόχρονα με τις μετρημένες τιμές εδαφικής υγρασίας και επιφανειακής απορροής γιατί η παροχή στράγγισης μετά τον κορεσμό του εδάφους επηρεάζει τη διήθηση νερού από την επιφάνεια, τη διακύμανση του ύψους του νερού κατάκλυσης και επομένως την επιφανειακή απορροή.

Ο υπολογισμός της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής από το μοντέλο γίνεται με την μέθοδο του Ritchie ως άθροισμα της εξάτμισης από το έδαφος και της διαπνοής από το φυτό, οι οποίες είναι συναρτήσεις του LAI και της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής [5]. Με αυτή τη μέθοδο υπολογισμού υποεκτιμάται η εξατμισοδιαπνοή στους ορυζώνες γιατί σε συνθήκες κατάκλυσης η εξάτμιση γίνεται από την ελεύθερη επιφάνεια του νερού και όχι του εδάφους [7]. Για το λόγο αυτό στο μοντέλο έγινε ρύθμιση της εξάτμισης εδάφους με

ένα συντελεστή διόρθωσης, ο οποίος εκφράζει την εξάτμιση από την ελεύθερη επιφάνεια νερού. Η ρύθμιση της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής έγινε με τις υπολογισμένες τιμές της μεθόδου Penman-Monteith κατά FAO [8] με χρήση φυτικού συντελεστή του ρυζιού προσαρμοσμένο στις συνθήκες της περιοχής [9].

2.2.2. Υπομοντέλο αζώτου.

Ο κύκλος του αζώτου περιλαμβάνει την ανοργανοποίηση, την ακινητοποίηση, την αεριοποίηση της αμμωνίας, την απονιτροποίηση, την πρόσληψη από τις ρίζες, τις απώλειες λόγω επιφανειακής απορροής, διήθησης κάτω από το ριζόστρωμα, προσρόφησης στα φερτά υλικά και μεταφοράς τους με την διάβρωση. Επιπλέον λαμβάνεται υπόψη η εισροή από την βροχή, την άρδευση και την λίπανση. Το ισοζύγιο αζώτου στο νερό κατάκλυσης υπολογίζεται σύμφωνα με τις παραδοχές των Chung et al., [3] στο οποίο έγινε και εισαγωγή του όρου πρόσληψης αζώτου από τα *Algae* [10]. Για το ισοζύγιο του αζώτου, το μοντέλο διαχωρίζει το ανόργανο άζωτο στην νιτρική και αμμωνιακή μορφή του, των οποίων το ημερήσιο ισοζύγιο στο σύστημα έδαφος-νερό κατάκλυσης δίνεται, αντίστοιχα από τις σχέσεις:

$$\begin{aligned} NO_{3_d} = NO_{3_{d-1}} + (NIT + FENO + IRNO + PNO)_d \\ - (DNI + QNO + PERCNO + UPNO + UPALNO)_d \end{aligned} \quad (4)$$

και

$$\begin{aligned} NH_{4_d} = NH_{4_{d-1}} + (FENH + MIN)_d - (NIT + QNH \\ + PERCNH + SEDNH + UPNH + UPALNH + VOLN)_d \end{aligned} \quad (5)$$

όπου NO_3 και NH_4 : είναι το νιτρικό και αμμωνιακό άζωτο, αντίστοιχα ($kg\ ha^{-1}$), NIT: η νιτροποίηση ($kg\ ha^{-1}$), MIN: η ανοργανοποίηση ($kg\ ha^{-1}$), VOLN: η αεριοποίηση της αμμωνίας ($kg\ ha^{-1}$) FENO και FENH: η εισροή νιτρικού και αμμωνιακού αζώτου, αντίστοιχα με την λίπανση ($kg\ ha^{-1}$), PNO και IRNO : οι εισροές νιτρικού αζώτου με τη βροχή και την άρδευση αντίστοιχα ($kg\ ha^{-1}$), DNI: η απονιτροποίηση ($kg\ ha^{-1}$), QNO και PERCNO: οι εκροές νιτρικού αζώτου με την επιφανειακή απορροή και την βαθειά διήθηση, αντίστοιχα ($kg\ ha^{-1}$), QNH και PERCNH: οι εκροές αμμωνιακού αζώτου με την επιφανειακή απορροή και την βαθειά διήθηση, αντίστοιχα ($kg\ ha^{-1}$), UPNO και UPNH: η πρόσληψη νιτρικού και αμμωνιακού αζώτου, αντίστοιχα από τα φυτά ($kg\ ha^{-1}$), UPALNO και UPALNH: η πρόσληψη νιτρικού και αμμωνιακού αζώτου, αντίστοιχα από τα *Algae* ($kg\ ha^{-1}$), SEDNH: η εκροή του προσροφημένου αμμωνιακού αζώτου στα φερτά υλικά με τη διάβρωση ($kg\ ha^{-1}$) και d: δείκτης χρονικού βήματος (day).

2.2.3. Υπομοντέλο διάβρωσης.

Παρόλο που το μοντέλο GLEAMS είναι μονοδιάστατο, στο υπομοντέλο της διάβρωσης δίνεται η δυνατότητα να εισαχθούν κάποια βασικά χαρακτηριστικά του αγρού, όπως η κλίση του εδάφους κατά μήκος της επιφανειακής ροής και η επιφανειακή διαμόρφωση του αγρού. Στο μοντέλο, το φαινόμενο της διάβρωσης περιγράφεται από την απόσπαση, μεταφορά και απόθεση εδαφικών υλικών με χρήση της παγκόσμιας εξίσωσης απώλειας εδάφους (Universal Soil Loss Equation-USLE) [11]. Επειδή για την καλλιέργεια του ρυζιού οι αγροί διαμορφώνονται σε λεκάνες με πυθμένα σχεδόν μηδενικής κλίσης και περιφερειακά αναχώματα για την επίτευξη της κατάκλυσης, στο μοντέλο γίνεται η παραδοχή ότι η διάβρωση του εδάφους είναι αμελητέα. Η συγκεκριμένη παραδοχή ενισχύεται και από το γεγονός ότι η ταχύτητα του νερού στην επιφάνεια του εδάφους και η επίδραση της έντασης βροχόπτωσης στην διάβρωση, οι οποίες είναι παράμετροι της USLE, είναι σχεδόν μηδενικές. Η πρώτη επηρεάζεται από

τη σχεδόν μηδενική κλίση του εδάφους και την αντίσταση της ροής από τα φυτά, ενώ η δεύτερη από το γεγονός ότι το έδαφος προστατεύεται από το επιφανειακό στρώμα νερού και από την φυτοκόμη. Έτσι, απώλειες αζώτου από το έδαφος με το επιφανειακό νερό έχουμε μόνο λόγω διάχυσης και όχι λόγω μεταφοράς εδαφικών τεμαχιδίων.

2.2. Περιγραφή πειραματικού αγρού και μετρήσεις πεδίου

Ο πειραματικός αγρός βρίσκεται στην ευρύτερη περιοχή Σίνδου μεταξύ Αξιού και Γαλλικού ποταμού, νοτιοανατολικά της πεδιάδας Θεσσαλονίκης και αρδεύεται από τον ποταμό Αξιό (ανατολική προσαγωγός διώρυγα-Τ.Ο.Ε.Β. Χαλάστρας-Καλοχωρίου). Το σχήμα του αγρού είναι ορθογωνικό, συνολικής έκτασης 5.51 στρεμμάτων, με διαστάσεις 190 m και 29 m και σχεδόν μηδενική κλίση. Στο συγκεκριμένο αγρό σχεδιάστηκαν και εκτελέστηκαν πειραματικές μετρήσεις για όλες τις εισροές, εκροές του νερού και αζώτου, τις φυσικές, υδραυλικές και χημικές παραμέτρους του εδάφους καθώς και τα χαρακτηριστικά ανάπτυξης της καλλιέργειας του ρυζιού, για την καλλιεργητική περίοδο 2005.

Η έναρξη των αρδεύσεων με κατάκλυση του αγρού έγινε στις 12 Μαΐου, μέσω του αρδευτικού δικτύου ανοιχτών αγωγών. Από την έναρξη της κατάκλυσης και μέχρι τις 20 Σεπτεμβρίου, παρατηρήθηκε συνεχής εισροή νερού για τη διατήρηση της στάθμης στην επιφάνεια του εδάφους στα 5-10 cm, με μικρές ενδιάμεσες περιόδους διακοπής της άρδευσης. Τις τελευταίες 24 ημέρες πριν τη συγκομιδή, διεκόπει εντελώς η άρδευση για να στραγγίσει ο αγρός. Η εισροή νερού από τα καναλέτα ήταν περίπου 2.0-3.0 L/sec, ενώ η εκροή από την έξοδο του χωραφιού ήταν περίπου 0.75-1.1 L/sec.

Για την μέτρηση των φυσικο-χημικών και υδραυλικών χαρακτηριστικών πάρθηκαν δείγματα ανά 30 cm μέχρι τα 120 cm. Η μηχανική σύσταση του εδάφους, για τις διάφορες εδαφικές στρώσεις του προφίλ των 120 cm είναι από silty-clay έως clay. Η υδραυλική αγωγιμότητα της κάθε εδαφικής στρώσης μετρήθηκε σε αδιατάρακτα δείγματα με περατόμετρο μεταβλητού φορτίου, η εδαφική υγρασία με την σταθμική μέθοδο, ενώ η υδατοϊκανότητα και το σημείο μόνιμης μάρανσης εκτιμήθηκαν από τις χαρακτηριστικές καμπύλες μετά από μετρήσεις σε δίσκους πίεσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι μετά την κατάκλυση επήλθε κορεσμός σε όλες τις εδαφικές στρώσεις, ενώ η εδαφική υγρασία στην επιφανειακή στρώση έφτασε μέχρι και 70% κ.ο., με εμφανή την καταστροφή της εδαφικής δομής και τη δημιουργία λάσπης.

Η σπορά του πειραματικού αγρού έγινε στις 15 Μαΐου, ενώ η συγκομιδή στις 14 Οκτωβρίου 2005. Μετά την εβδομηκοστή ημέρα από τη σπορά παρατηρήθηκε το μέγιστο ύψος των φυτών και το μέγιστο βάθος του ριζικού τους συστήματος με τιμές 70-80 και 25-30 cm, αντίστοιχα. Μετρήσεις του δείκτη φυλλικής επιφάνειας, της ολικής φυτομάζας και της συγκέντρωσης ολικού αζώτου λαμβάνονταν ανά δυο εβδομάδες, σε όλη την καλλιεργητική περίοδο. Η καλλιέργεια λιπάνθηκε βασικά και επιφανειακά στις 10 Μαΐου και στις 2 Ιουλίου αντίστοιχα, με συνολική εφαρμογή 15 kg N/στρέμμα.

Για το άζωτο στο έδαφος έγιναν δειγματοληψίες σε τέσσερα βάθη ανά 30 cm κάθε 10-15 ημέρες, στα οποία μετρήθηκαν οι συγκεντρώσεις του νιτρικού και αμμωνιακού αζώτου. Επιπλέον μετρήθηκαν οι συγκεντρώσεις τους στο νερό άρδευσης και στο νερό της επιφανειακής απορροής.

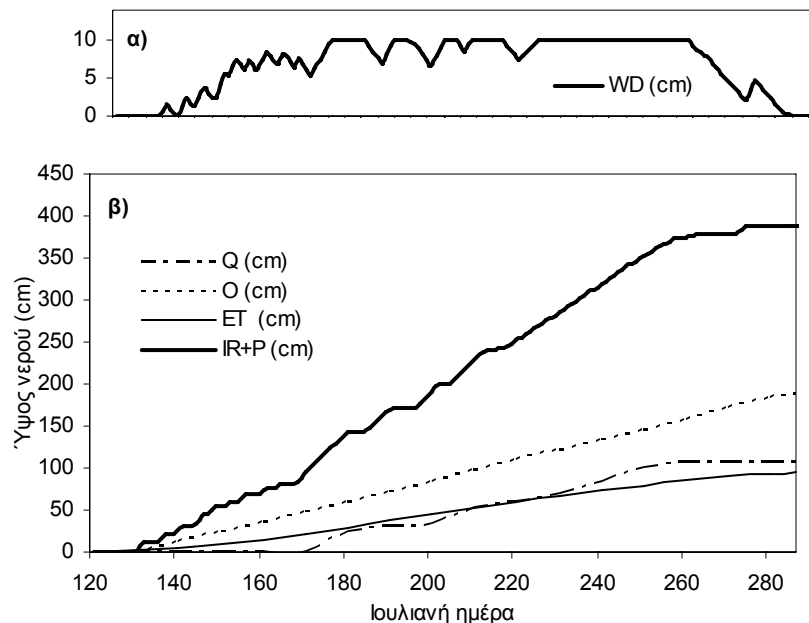
Η εκτίμηση του εισρεόμενου νερού από τη βροχόπτωση και ο υπολογισμός της εξατμισοδιαπνοής από το μοντέλο έγινε με ημερήσια δεδομένα από τοπικό μετεωρολογικό σταθμό.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

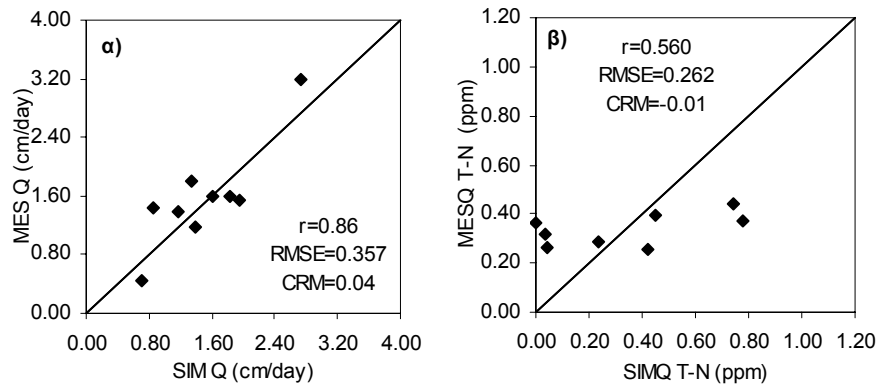
Το τροποποιημένο μοντέλο GLEAMS V.3.0 εφαρμόστηκε για την εκτίμηση του ισοζυγίου νερού και του ολικού ανόργανου αζώτου T-N (νιτρικό+αμμωνιακό άζωτο) σε πειραματικό ορυζώνα για την καλλιεργητική περίοδο του έτους 2005.

Τα αποτελέσματα του μοντέλου για το ισοζύγιο νερού παρουσιάζονται στα Σχήματα 2α και 2β καθώς και στον Πίνακα 1α, μετά από ρύθμιση του μοντέλου με τις μετρήσεις επιφανειακής απορροής (Σχήμα 3α). Για το υδατικό ισοζύγιο προκύπτει ότι η επιφανειακή απορροή, η εξατμισοδιαπνοή και η βαθειά διήθηση αποτελούν το 28.2, 24.6 και 47.2%, αντίστοιχα, των ολικών απωλειών νερού, από τις οποίες τόσο η επιφανειακή απορροή όσο και η βαθειά διήθηση οδηγούνται στις στραγγιστικές τάφρους.

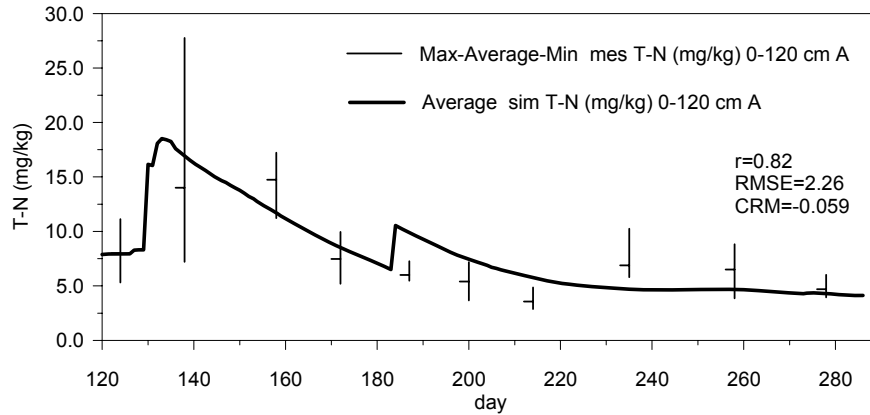
Τα αποτελέσματα του μοντέλου για το ισοζύγιο αζώτου δίνονται στον Πίνακα 1β, ενώ στα Σχήματα 3β και 4 δίνεται η σύγκριση μετρημένων και υπολογισμένων τιμών της συγκέντρωσης ολικού ανόργανου αζώτου στο νερό εκροής (ppm) και στο έδαφος (mg/kg) για το προφίλ εδάφους των 0-120 cm, αντίστοιχα. Για το ισοζύγιο αζώτου προκύπτει ότι οι απώλειες αζώτου λόγω πρόσληψης από την καλλιέργεια και τα *Algae* αποτελούν το 41.98% και 7.18%, αντίστοιχα των ολικών απωλειών, οι οποίες όμως είναι με την μορφή φυτομάζας. Το άζωτο που χάνεται με την επιφανειακή απορροή, τη βαθειά διήθηση και την απονιτροποίηση αποτελεί το 1.54, 23.58 και 25.7% των ολικών απωλειών, αντίστοιχα. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η βαθειά διήθηση και η απονιτροποίηση είναι οι κύριοι παράγοντες απωλειών αζώτου. Σχετικά με τη συνεισφορά των παραπάνω διαδικασιών στο φαινόμενο της νιτρορύπανσης των υδάτων που οδηγούνται στα στραγγιστικά δίκτυα των ορυζώνων, η βαθειά διήθηση έχει τον κύριο ρόλο.



Σχήμα 2. α) Εκτίμηση του ύψους λιμνάζοντος νερού (WD), β) Αθροιστικές τιμές της εισροής νερού από την βροχή και την άρδευση (IR+P), την επιφανειακή απορροή (Q), τη διήθηση (PERC) και την πραγματική εξατμισοδιαπνοή (ET).



Σχήμα 3. α) Μετρημένες (MESQ) και υπολογισμένες (SIMQ) παροχές επιφανειακής απορροής (cm/day), β) Μετρημένες (MESQ T-N) και υπολογισμένες (SIMQ T-N) τιμές ολικού ανόργανου αζώτου (ppm) στο νερό επιφανειακής απορροής.



Σχήμα 4. Ελάχιστες, μέσες και μέγιστες μετρημένες (mes) και υπολογισμένες τιμές (sim) της συγκέντρωσης ολικού ανόργανου αζώτου (mg/kg) σε όλο το προφίλ των 0-120 cm για την καλλιεργητική περίοδο 2005.

Πίνακας 1.α) Ισοζύγιο νερού και β) αζώτου στον πειραματικό ορυζώνα του προφίλ εδάφους 120 cm στο τέλος της καλλιεργητικής περιόδου (167 ημέρες).

α) Εισροές-εκροές νερού					Ισοζύγιο	
IR	P	Q	PERC	ET		
364.46	24.86	-106.89	-187.4	-95.4	-0.4	(cm)
20081.75	1369.79	-5889.64	-10327.4	-5256.54	-22.03	(m ³)

β) Εισροές-εκροές ανόργανου αζώτου T-N (kg/ha)								
IR+P N	FEN	MIN	UPALN	UPN	PERCN	QN	DNI	Ισοζύγιο
48.02	150.00	42.78	-22.09	-129.06	-72.50	-4.76	-79.00	-66.61

Εισροές-εκροές αζώτου με IR+P N: άρδευση + βροχόπτωση, FEN: λίπανση, MIN: ανοργανοποίηση, UPALN: πρόσληψη από τα *Algae*, UPN: πρόσληψη από την καλλιέργεια, PERCN: βαθιά διήθηση, QN: επιφανειακή απορροή, DNI: απονιτροποίηση.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της παραπάνω εφαρμογής και σε συνδυασμό με τη χρήση στατιστικών κριτηρίων, τα οποία δίνονται στα σχήματα μετρημένων και υπολογισμένων τιμών, προκύπτει ότι το μοντέλο περιγράφει ικανοποιητικά το ισοζύγιο νερού και αζώτου μέσα στους ορυζώνες. Το γεγονός αυτό, το καθιστά εύχρηστο εργαλείο για την βέλτιστη διαχείριση του αρδευτικού νερού και της αζωτούχου λίπανσης στους ορυζώνες, σκοπεύοντας στην παράλληλη διατήρηση των υψηλών αποδόσεων της καλλιέργειας και στη μείωση του φαινομένου της νιτρορύπανσης.

Ευχαριστίες

Οι συγγραφείς ευχαριστούν το ΥΠ.Ε.Π.Θ και την Ε.Ε. για την οικονομική ενίσχυση του ερευνητικού έργου «Διαχείριση νερού και αζώτου σε ορυζώνα για εξοικονόμηση νερού και προστασία υδάτινου περιβάλλοντος», το οποίο χρηματοδοτήθηκε από την Ειδική Υπηρεσία Διαχείρισης ΕΠΕΑΕΚ - ΠΥΘΑΓΟΡΑΣ II.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. MED-Rice, 2003. *Guidance Document for Environmental Risk Assessments of Active Substances used on Rice in the EU for Annex I Inclusion*. Working Group on Med-Rice, EU Document Reference SANCO/1090/2000-rev.1, Brussels, June 2003, 11-42 pp.
2. Jeon, J.H., Yoon, C.G., Ham, J.H., Jung, K.W., 2005. Model development for surface drainage loading estimates from paddy rice fields. *Paddy Water Environ.* (3): 93–101.
3. Chung, S.O., Kim, H.S., Kim, J.S., 2003. Model development for nutrient loading from paddy rice fields. *Agricultural Water Manag.* (62): 1-17.
4. Singh K.B., Gajri P.R., Arora V.K., 2000. Modelling the effects of soil and water management practices on the water balance and performance of rice. *Agricultural Water Manag.* (49):77-95
5. Knisel, W.G. and Davis, M. F., 2000. *GLEAMS: Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems*. Version 3.0 User's Manual, Publication No. SEWRL-WGK/FMD-050199, revised 081500.
6. Knisel, W.G., 1980. *CREAMS: A field-scale model for Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems*. USDA, Science and Education Administration, Conservation Research Report No. 26, 640 pp.
7. Αντωνόπουλος Β.Ζ., Ασχονίτης Β.Γ., Λίτσας, Β.Δ., 2007. Προσομοίωση του ισοζυγίου νερού σε ορυζώνα με το μοντέλο GLEAMS. 6^ο Εθνικό Συνέδριο ΕΕΛΥΠ “Ολοκληρωμένη διαχείριση υδατικών πόρων με βάση τη λεκάνη απορροής”. 14-16 Ιουνίου, Χανιά, σελ 325-333.
8. Allen, R.G., Smith, M., Perrier, A., Pereira, L.S., 1994a,b. An update for the definition of reference evapotranspiration. *ICID Bull.* 43(2): 1-92.
9. Πανώρας Α., Παπαζαφειρίου Ε., Πουλτσίδου Θ., 2001. Υπολογισμός φυτικών συντελεστών για έξι μεθόδους εξατμισοδιαπνοής στο νότιο τμήμα της πεδιάδας Θεσσαλονίκης. *Αγροτική Έρευνα* 24(1): 37-45.
10. Anastacio, P.M., Nielsen, S.N., Frias, A.F., Marques, J.C., 1999. CRISP (crayfish and rice integrated system of production): 4.Modelling water, algae and oxygen dynamics. *Ecological Modelling* (123): 29-40.
11. Wischmeier, W.H., and Smith, D.D., 1978. *Predicting rainfall erosion losses – a guide to conservation planning*. USDA, Agric. Handbook No. 537.

(175)

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΡΔΕΥΟΜΕΝΗΣ ΓΕΩΡΓΙΑΣ ΣΤΗΝ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΤΩΝ ΣΤΡΑΓΓΙΣΤΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

Β. Αντωνόπουλος^{1α}, Β. Λίτσκας^{2β}, Β. Ασχονίτης^{1β} και Σ. Τσιούρης^{2α}

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο, Γεωπονική Σχολή, 54124, Θεσσαλονίκη

¹Τομέας Εγγείων Βελτιώσεων, Γεωργ. Μηχ. και Εδαφ., ^avasanton@agro.auth.gr,
^bvaschoni@agro.auth.gr

²Τομέας Φυτών Μεγ. Καλλιέργ. και Οικολογίας, ^astsiouri@agro.auth.gr,
^bvlitskas@agro.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της εργασίας είναι η εκτίμηση των επιπτώσεων της άρδευσης στην ποιότητα του στραγγιστικού νερού μιας έκτασης (~1500 στρ.) καλλιεργούμενης κυρίως με ρύζι, στην περιοχή της Σίνδου – Χαλάστρας (νομός Θεσσαλονίκης). Σε δείγματα νερού από το στραγγιστικό και το αρδευτικό δίκτυο εξετάστηκαν οι παράμετροι: ηλεκτρική αγωγιμότητα, pH, νιτρικά, αμμωνιακά, ολικός φώσφορος, κάλιο, ασβέστιο, μαγνήσιο, νάτριο και αναλογία προσροφημένου νατρίου (SAR).

IMPACT OF IRRIGATED AGRICULTURE ON DRAINAGE WATER QUALITY

V. Antonopoulos^{1a}, V. Litskas^{2b}, V. Aschonitis^{1b} and S. Tsiouris^{2a}

Aristotle University, Sch. of Agriculture, 54124, Thessaloniki

¹Department of Hydraulics, Soil Sci. and Agr. Engineering, ^avasanton@agro.auth.gr,
^bvaschoni@agro.auth.gr

²Department of Crop science and Ecology, ^astsiouri@agro.auth.gr,
^bvlitskas@agro.auth.gr

ABSTRACT

The aim of this research work is the evaluation of irrigated agriculture impacts on drainage water quality in an area (~ 150 ha) cultivated mainly with rice, located in the prefecture of Thessaloniki (among cities Sindos and Halastra). Samples were taken from irrigation and drainage network in order to examine water quality parameters, such as: electrical conductivity, pH, nitrates, ammonium, total phosphorus, potassium, calcium, magnesium, sodium and sodium adsorption ratio (SAR).

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ένας από τους κυριότερους παράγοντες για την υποβάθμιση της ποιότητας των υπόγειων και επιφανειακών υδάτων αποτελεί η μη σημειακή ρύπανση, η οποία προέρχεται ως επί το πλείστον από τα λύματα των γεωργικών δραστηριοτήτων. Το αρδευτικό νερό και το νερό της βροχής εμπλουτίζονται με άλατα, θρεπτικά στοιχεία (N και P), υπολείμματα φυτοφαρμάκων, ιζήματα και παθογόνους οργανισμούς [1,2] τόσο κατά την επιφανειακή απορροή όσο και κατά τη στράγγιση των αγρών. Ο βαθμός της ρύπανσης των τελικών αποδεκτών τους εξαρτάται από τα υδρογεωλογικά και εδαφολογικά χαρακτηριστικά της αρδευόμενης έκτασης, τα καλλιεργούμενα είδη, τις εφαρμόζόμενες γεωργικές πρακτικές, την επάρκεια και την ποιότητα του αρδευτικού νερού καθώς και την ύπαρξη ή μη στραγγιστικού δικτύου [3].

Τα τελευταία έτη έγινε προσπάθεια να ορισθούν διάφορα κριτήρια σχετικά με την ποιότητα του νερού και να εφαρμοστούν οδηγίες με στόχο τον περιορισμό της ρύπανσης των υδατικών οικοσυστημάτων από το νερό που επιστρέφει μετά την άρδευση. Ενδεικτικά αναφέρεται η οδηγία πλαίσιο για τα νερά (2000/60) της Ευρωπαϊκής Ένωσης [4].

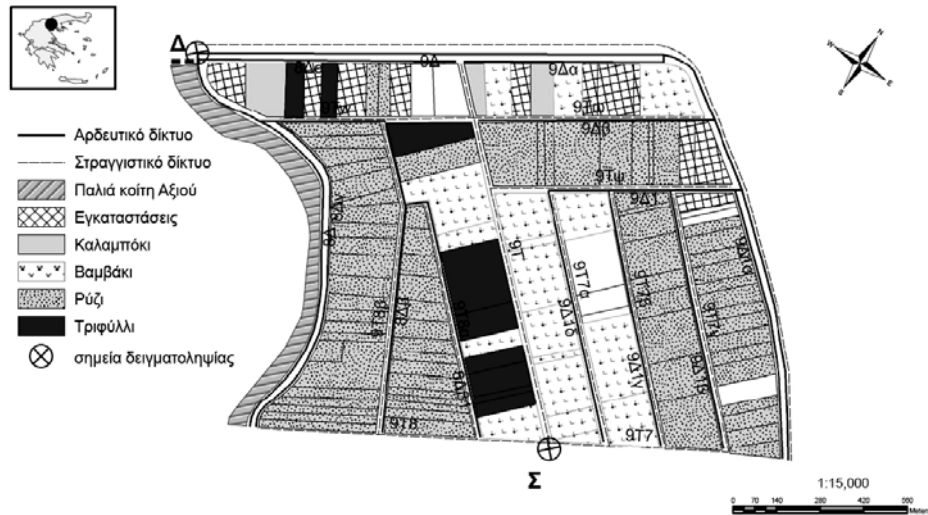
Στις περιοχές με καλλιέργειες ρυζιού οι ανάγκες σε αρδευτικό νερό είναι μεγάλες. Σημαντικό μέρος του εφαρμόζομενου νερού επιστρέφει στα υδατικά οικοσυστήματα, μέσω του στραγγιστικού δικτύου και της επιφανειακής απορροής. Σκοπός της εργασίας είναι να εκτιμηθούν οι επιπτώσεις στην ποιότητα του νερού των στραγγιστικών δικτύων από το νερό που απορρέει και στραγγίζει λόγω της άρδευσης των καλλιεργούμενων εκτάσεων.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Η ποιότητα του αρδευτικού και του στραγγιστικού νερού μελετήθηκε σε έκταση, 1500 στρεμμάτων περίπου, η οποία βρίσκεται στην περιοχή Σίνδου – Χαλάστρας (νομός Θεσσαλονίκης) και καλλιεργήθηκε κατά το έτος 2006 με ρύζι (~800 στρ.), βαμβάκι (~350 στρ.) και μηδική (~130 στρ.) (Σχήμα 1). Τα εδάφη της περιοχής ανήκουν στην τάξη των Entisols (Typic Xerofluvents) [5]. Η περιοχή αρδεύεται με δίκτυο ανοικτών αγωγών και το αρδευτικό νερό προέρχεται από τον Αζίο ο οποίος είναι ήδη επιβαρυνμένος με άζωτο (νιτρικά), όσον αφορά τα θρεπτικά στοιχεία [6,7]. Το μεγαλύτερο μέρος του νερού των στραγγιστικών δικτύων προέρχεται είτε από τους ορυζώνες είτε από απευθείας εκροές των αρδευτικών διωρύγων [8,9]. Το νερό των στραγγιστικών τάφρων της περιοχής καταλήγει στο Θερμαϊκό κόλπο.

Οι μετρήσεις των ποιοτικών παραμέτρων στο νερό του αρδευτικού και του στραγγιστικού δικτύου έγιναν για το διάστημα της λειτουργίας των δικτύων (Μάιος – Σεπτέμβριος, 2006). Έγιναν 12 δειγματοληψίες σε δύο θέσεις – στην κύρια στραγγιστική τάφρο (στο Σχήμα 1, σημείο Σ), και στην κύρια διώρυγα του αρδευτικού δικτύου (στο Σχήμα 1, σημείο Δ). Μετρήθηκαν οι παράμετροι: ηλεκτρική αγωγιμότητα (αγωγιμόμετρο, GLP 31 – Crison) και pH (πεχάμετρο, GLP 23 – Crison). Με το φασματοφωτόμετρο προσδιορίστηκαν τα νιτρικά (210/270 nm), τα αμμωνιακά (650 nm) [10,11] και ο ολικός φώσφορος (882 nm) [12]. Το ασβέστιο και το μαγνήσιο προσδιορίστηκαν στη συσκευή της ατομικής απορρόφησης ενώ το κάλιο και το νάτριο προσδιορίστηκαν στο φλογοφωτόμετρο [13,14]. Υπολογίστηκε επίσης και η αναλογία προσροφημένου νατρίου (SAR).

Υπολογίστηκαν για κάθε παράμετρο ο μέσος όρος και η τυπική απόκλιση. Αποκλείστηκαν από τους υπολογισμούς οι τιμές στο τέλος της αρδευτικής περιόδου, οι οποίες παρουσίασαν μεγάλη αύξηση εξαιτίας των μειωμένων παροχών στην αρδευτική διώρυγα και τη στραγγιστική τάφρο.



Σχήμα 1. Περιοχή μελέτης. Σημειώνονται τα σημεία δειγματοληψίας από την κύρια αρδευτική διώρυγα (Δ) και την κύρια στραγγιστική τάφρο (Σ)

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

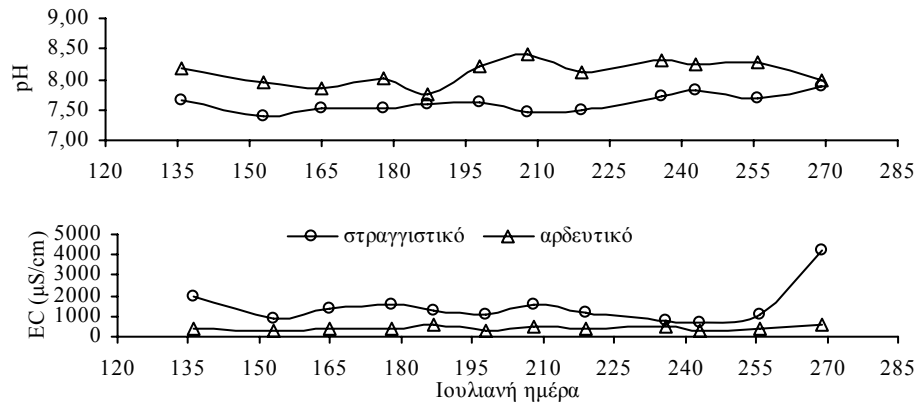
Στον πίνακα 1 δίδονται ο μέσος όρος, το εύρος τιμών και η τυπική απόκλιση των παραμέτρων της ποιότητας του νερού, που προσδιορίστηκαν στα δείγματα του αρδευτικού και του στραγγιστικού νερού.

Πίνακας 1. Μέσος όρος, εύρος τιμών και τυπική απόκλιση των παραμέτρων ποιότητας του νερού

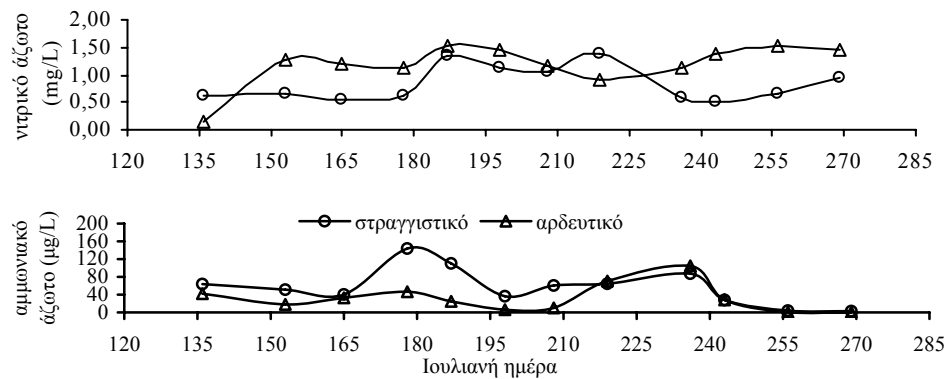
Ποιοτική παράμετρος	Μέσος όρος		Εύρος τιμών		Τυπική απόκλιση	
	Αρδευτικό (Α)	Στραγγιστικό (Σ)	(Α)	(Σ)	(Α)	(Σ)
pH	8,1	7,6	7,8–8,4	7,4–7,9	0,2	0,1
ECw(μS/cm)	388,4	943,4	280–582	683–1555	82,7	408,2
NO ₃ –N(mg/L)	1,17	0,82	0,16–1,52	0,51–1,38	0,38	0,33
NH ₄ –N(μg/L)	38,4	68,7	28–105	28–143,9	30,1	35,9
Ρολικός(mg/L)	0,08	0,12	0,07–0,23	0,07–0,44	0,08	0,1
Ca(mg/L)	35,9	61,6	10,8–57	23–90	13,6	20,2
Mg(mg/L)	10,1	22	5–15,1	15,9–33,5	3	5,5
K(mg/L)	2,3	3,9	1,5–5	2,7–6,1	1	0,9
Na(mg/L)	100	276	18–155	214–350	60	87
SAR	3,8	8,0	0,79–7,8	3,8–10	2,3	1,7

Οι τιμές του pH στο αρδευτικό νερό (μ.ό. 8,1) ήταν υψηλότερες από τις αντίστοιχες τιμές στο νερό της στραγγιστικής τάφρου (μ.ό. 7,6), ενώ το αντίθετο παρατηρήθηκε με τις τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (Σχήμα 2). Η μέση τιμή της αγωγιμότητας στο αρδευτικό νερό ήταν 388,4 μS/cm ενώ στο στραγγιστικό νερό 943,4 μS/cm. Η συγκέντρωση του νιτρικού αζώτου (Σχήμα 3) ήταν υψηλότερη στο αρδευτικό νερό (μ.ό. 1,17 mg/L) σε σύγκριση με την αντίστοιχη στο στραγγιστικό νερό (μ.ό. 0,82 mg/L). Η

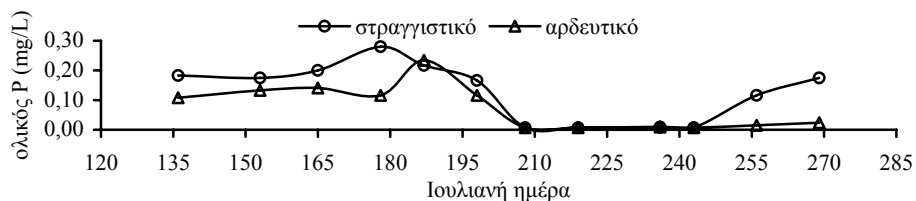
συγκέντρωση του $\text{NH}_4 - \text{N}$ (Σχήμα 3) βρέθηκε αρκετά χαμηλότερη από την αντίστοιχη του $\text{NO}_3 - \text{N}$ τόσο στο αρδευτικό (μ.ό. $38,4 \mu\text{g L}^{-1}$) όσο και στο στραγγιστικό νερό (μ.ό. $68,7 \mu\text{g L}^{-1}$).



Σχήμα 2. Τιμές pH και ηλεκτρικής αγωγιμότητας στο στραγγιστικό και το αρδευτικό νερό



Σχήμα 3. Μεταβολή της συγκέντρωσης του νιτρικού και αμμωνιακού αζώτου

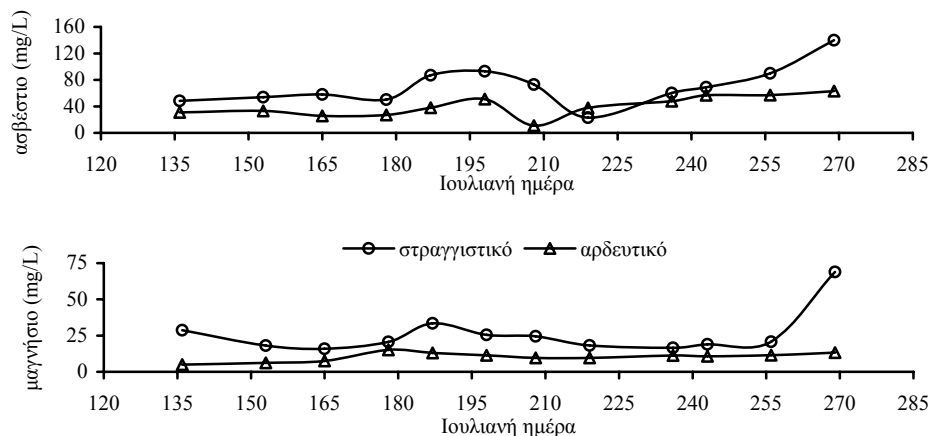


Σχήμα 4. Μεταβολή της συγκέντρωσης του ολικού φωσφόρου με το χρόνο

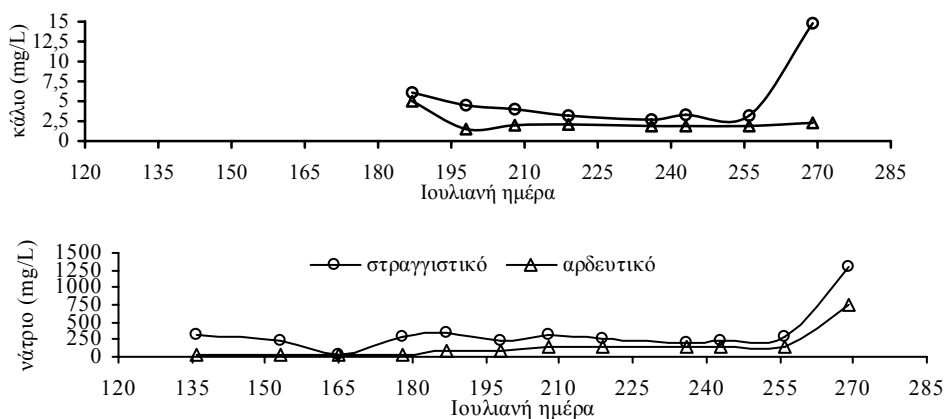
Ο μέσος όρος της συγκέντρωσης του ολικού φωσφόρου στη στραγγιστική τάφρο ήταν $0,12 \text{ mg/L}$ ενώ στο αρδευτικό νερό ήταν $0,08 \text{ mg/L}$. Στο σχήμα 4 φαίνεται η μεταβολή στο χρόνο των τιμών του ολικού φωσφόρου.

Η συγκέντρωση των κατιόντων ασβεστίου, μαγνησίου, καλίου και νατρίου ήταν μεγαλύτερη στο νερό του στραγγιστικού από την αντίστοιχη συγκέντρωση στο νερό του αρδευτικού δικτύου, για όλη σχεδόν τη διάρκεια της περιόδου δειγματοληψίας (Σχήμα 5 και 6). Η μέση συγκέντρωση του ασβεστίου στα δείγματα από το αρδευτικό και το

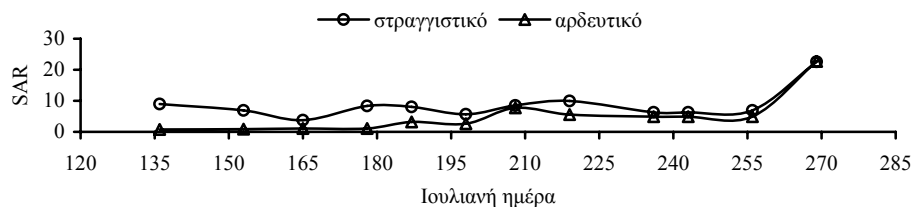
στραγγιστικό δίκτυο ήταν 35,9 και 61,6 mg L⁻¹, αντίστοιχα. Η μέση συγκέντρωση του μαγνησίου στο αρδευτικό νερό ήταν 10,1 mg/L και στο στραγγιστικό 22 mg/L. Οι αντίστοιχες τιμές για το κάλιο ήταν 2,3 mg/L στο νερό της αρδευτικής διώρυγας και 3,9 mg/L στο νερό της στραγγιστικής τάφρου. Η μέση συγκέντρωση του νατρίου ήταν 100 mg/L στο αρδευτικό και 276 mg/L στο στραγγιστικό νερό. Τέλος, οι μέσες τιμές του SAR βρέθηκαν 3,8 και 8,0 στο αρδευτικό και στραγγιστικό νερό, αντίστοιχα (Σχήμα 7).



Σχήμα 5. Μεταβολή της συγκέντρωσης του ασβεστίου και του μαγνησίου με το χρόνο



Σχήμα 6. Μεταβολή της συγκέντρωσης του καλίου και του νατρίου με το χρόνο



Σχήμα 7. Μεταβολή του SAR με το χρόνο, στο αρδευτικό και το στραγγιστικό δίκτυο

4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρουσία και η δραστηριότητα των φυτών και των μικροοργανισμών στο στραγγιστικό δίκτυο έχει ως αποτέλεσμα τον υποβιβασμό του pH (μ.ό 7,6) σε σχέση με το pH του αρδευτικού νερού (μ.ό. 8,1). Οι κυριότερες πηγές πρωτονίων στο νερό των στραγγιστικών δικτύων είναι οι αντιδράσεις πρόσληψης κατιόντων από τα φυτά και τα φύκη, η διάσπαση του CO₂ και η διάσπαση των οργανικών οξέων [15]. Με βάση τις τιμές της αγωγιμότητας το αρδευτικό νερό κατατάσσεται ως μέσης αλατότητας [16]. Οι τιμές αυτές, δεν παρουσιάζουν διαφορές από παλαιότερες μετρήσεις της ηλεκτρικής αγωγιμότητας των νερών του ποταμού Αξιού [17]. Η υψηλή υπόγεια στάθμη, ο τύπος των εδαφών και οι τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στο αρδευτικό νερό δείχνουν ότι θα πρέπει να υπάρχει παρακολούθηση τόσο των εδαφών όσο και του αρδευτικού νερού για την αποφυγή των προβλημάτων αλάτωσης – νατρίωσης των εδαφών. Το νερό της στραγγιστικής τάφρου κατατάσσεται ως υψηλής αλατότητας [16]. Με τη διαδικασία της άρδευσης – στράγγισης (κυρίως των ορυζώνων) το νερό εμπλουτίζεται σε άλατα και ιζήματα και αυξάνεται η αγωγιμότητα του στη στραγγιστική τάφρο [3]. Στην τελευταία δειγματοληψία παρατηρήθηκε πολύ υψηλή αγωγιμότητα στο νερό της στραγγιστικής τάφρου επειδή αυτή την περίοδο οι εκροές από τους αγρούς και η παροχή στην τάφρο είναι μικρές. Εφόσον το στραγγιστικό νερό χρησιμοποιηθεί για την άρδευση των καλλιεργειών κατάντη της συγκεκριμένης περιοχής, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ο τύπος των εδαφών και η ποιοτική τους κατάσταση καθώς και οι καλλιέργειες που πρόκειται να αρδευτούν, προκειμένου να επιτευχθεί ορθή διαχείριση των εδαφικών και υδατικών πόρων.

Οι υψηλότερες συγκεντρώσεις του νιτρικού αζώτου στο αρδευτικό νερό, το οποίο προέρχεται από τον ποταμό Αξιό, οφείλονται στη ρύπανση του ποταμού από γεωργικές και αστικές πηγές στα ανάντη της περιοχής μελέτης [6,7]. Η πρόσληψη του N από τις καλλιέργειες και τα υδροτοπικά φυτά, που υπάρχουν άφθονα στα πρανή των επιμέρους στραγγιστικών δικτύων, σε συνδυασμό με τις αναγωγικές συνθήκες που δημιουργούνται στο νερό της στραγγιστικής τάφρου – οι οποίες ευνοούν την απονιτροποίηση – συμβάλουν στη μείωση της συγκέντρωσης του NO₃ – N [18]. Η αύξηση της συγκέντρωσης του NO₃ – N στο στραγγιστικό νερό μετά την 175^η ημέρα (τέλος Ιουνίου) οφείλεται στην επιφανειακή λίπανση των καλλιεργειών (κυρίως των ορυζώνων), η οποία προηγείται των σχετικών δειγματοληψιών. Η συγκέντρωση του NH₄ – N στο νερό της στραγγιστικής τάφρου είναι υψηλότερη, λόγω των αναγωγικών συνθηκών, από την αντίστοιχη συγκέντρωση στο αρδευτικό νερό.

Οι τιμές της συγκέντρωσης του ολικού φωσφόρου μηδενίζονται κατά το μήνα Αύγουστο, τόσο στο στραγγιστικό όσο και στο αρδευτικό νερό. Παρατηρήθηκαν ελαφρώς υψηλότερες τιμές στο στραγγιστικό νερό, οι οποίες πιθανόν να οφείλονται στη διάβρωση του εδάφους στα πρανή των επιμέρους στραγγιστικών τάφρων, την περίοδο όπου η ανανέωση του νερού των ορυζώνων είναι συνεχής και υπάρχουν απορροές από τους ορυζώνες προς το στραγγιστικό δίκτυο. Παρόμοιες συγκεντρώσεις P έχουν μετρηθεί σε απορροές από γεωργικές εκτάσεις αλλά και σε στραγγιστικά δίκτυα της χώρας [18,19]. Η αύξηση της συγκέντρωσης του P προς το τέλος της καλλιεργητικής περιόδου οφείλεται στη μείωση του όγκου του νερού μέσα στην αρδευτική διώρυγα και τη στραγγιστική τάφρο. Σημειώνεται ότι ο P στους ορυζώνες προστίθεται μόνο κατά τη βασική λίπανση (μέσα Απριλίου) ενώ δεν προστίθεται P κατά την επιφανειακή λίπανση για την αποφυγή ανάπτυξης των φυκών, μέσα στις λεκάνες.

Όπως προαναφέρθηκε, η συγκέντρωση των κατιόντων ασβεστίου, μαγνησίου, καλίου και νατρίου βρέθηκε μεγαλύτερη στο νερό του στραγγιστικού από την αντίστοιχη στο νερό του αρδευτικού δικτύου. Μεγαλύτερες συγκεντρώσεις των κατιόντων στο νερό στράγγισης μετρήθηκαν κατά την περίοδο της πλήρους λειτουργίας

του αρδευτικού δικτύου (αρχές Ιουλίου – αρχές Αυγούστου). Το κατιόν με την υψηλότερη συγκέντρωση είναι το νάτριο, γεγονός το οποίο σχετίζεται με τη γειτνίαση της περιοχής με τη θάλασσα [20]. Η αύξηση της συγκέντρωσης των κατιόντων στο τέλος της αρδευτικής περιόδου, τόσο στο στραγγιστικό όσο και στο αρδευτικό νερό οφείλεται στις μειωμένες παροχές στα αντίστοιχα δίκτυα.

Με βάση τις τιμές του SAR, το αρδευτικό νερό χαρακτηρίζεται ως νερό χαμηλής περιεκτικότητας σε νάτριο ($SAR < 10$) [16]. Παρατηρήθηκε αύξηση του SAR μετά το μήνα Ιούνιο. Ομοίως, το νερό της στραγγιστικής τάφρου χαρακτηρίζεται οριακά ως νερό χαμηλής περιεκτικότητας σε Na. Η αύξηση του SAR στο τέλος της αρδευτικής περιόδου οφείλεται, όπως προαναφέρθηκε, στη μειωμένη παροχή στην αρδευτική και στραγγιστική τάφρο.

Η επιστημονική έρευνα στην ευρύτερη περιοχή δείχνει ότι η ρυζοκαλλιέργεια έχει τις μεγαλύτερες απαιτήσεις σε νερό, σε σύγκριση με τις υπόλοιπες καλλιέργειες [9]. Επομένως, το μεγαλύτερο μέρος του νερού που καταλήγει στην κύρια στραγγιστική τάφρο οφείλεται στις απορροές και τη στράγγιση των ορυζώνων. Το πρόγραμμα λίπανσης και άρδευσης των καλλιεργειών – κατά κύριο λόγο των ορυζώνων – επηρεάζει τη συγκέντρωση του αζώτου και του φωσφόρου αλλά και τις τιμές της αγωγιμότητας στο στραγγιστικό νερό.

Η απότομη αύξηση των τιμών όλων σχεδόν των παραμέτρων προς το τέλος της αρδευτικής περιόδου (τέλος Σεπτεμβρίου), ιδιαίτερα στο στραγγιστικό νερό, οφείλεται στη μείωση του όγκου του νερού στη στραγγιστική τάφρο. Το νερό στην τάφρο είναι σχεδόν στάσιμο την περίοδο αυτή.

Τέλος, θα πρέπει να υπάρξει παρακολούθηση της ποιότητας του αρδευτικού νερού, αλλά και της ποιότητας των εδαφών, για να μη δημιουργηθούν έντονα προβλήματα αλάτωσης – νατρίωσης στους αγρούς της περιοχής.

5. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς ευχαριστούν το ΥΠ.Ε.Π.Θ και την Ευρωπαϊκή Ένωση για την οικονομική ενίσχυση του ερευνητικού έργου [Διαχείριση νερού και αζώτου σε ορυζώνα για εξοικονόμηση νερού και προστασία υδάτινου περιβάλλοντος], το οποίο χρηματοδοτήθηκε από την Ειδική Υπηρεσία Διαχείρισης ΕΠΕΑΕΚ [ΠΥΘΑΓΟΡΑΣ II] καθώς και το Ινστιτούτο Εγγείων Βελτιώσεων (Σίνδος) για την παραχώρηση του εργαστηρίου χημικών αναλύσεων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

26. Αντωνόπουλος, Β.Ζ., 1991. Υποβάθμιση των υδατορευμάτων από το νερό που επιστρέφει μετά την άρδευση. *Γεωργική Έρευνα*, 15: 271 – 281.
27. Ritter, W. F. and Shirmohammadi, A., 2001. *Agricultural nonpoint source pollution*. CRC press, New York U.S.A, pp 1 – 2.
28. Gausape, J., Quilez D. and Aragues, R., 2004. Salt and nitrate concentrations in the surface waters of the CR – V irrigation district (Bardenas I, Spain): Diagnosis and prescriptions for reducing off – site contamination. *Journal of Hydrology*, 295: 87 – 100.
29. European Union, 2000. Directive 2000/60 of the European Parliament and of the Council establishing a framework for community action in the field of water pollution. *Official Journal L327*, 22/12/2000: 1 – 72.
30. Ινστιτούτο Εδαφολογίας Θεσσαλονίκης (ΕΘ.Ι.ΑΓ.Ε), 2003. *Εδαφολογική Μελέτη νομού Θεσσαλονίκης – Περιοχή Γαλλικού/Αξιού*. σελ. 137 – 138.

31. Antonopoulos V. Z. and Papamichail D. M., 2002. Trend analysis of water quality parameters for two transboundary rivers in northern Greece. In: Kungolos A. G. et al (eds), Proceedings of the international conference: *Protection and restoration of the environment*, Skiathos. vol. VI, pp 83 – 90.
32. 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, and Soil Pollution*, 129: 13–32.
33. Αραμπατζής, Γ., Χατζηγιαννάκης, Ε. και Πανώρας, Α., 2005. Απώλειες νερού κατά τη διανομή και εφαρμογή του σε συλλογικά αρδευτικά δίκτυα. *Ελληνική Επιτροπή Διαχείρισης Υδατικών Πόρων (Ε.Ε.Δ.Υ.Π.)*, πρακτικά 5^{ου} πανελληνίου συνεδρίου, 6-9 Απριλίου, Ξάνθη.
34. Αντωνόπουλος Β.Ζ., Ασχονίτης Β.Γ. και Λίτσкас, Β.Δ., 2007. Προσομοίωση του ισοζυγίου νερού σε ορυζώνα με το μοντέλο GLEAMS. 6^ο Εθνικό Συνέδριο ΕΕΔΥΠ “Ολοκληρωμένη διαχείριση υδατικών πόρων με βάση τη λεκάνη απορροής”. 14-16 Ιουνίου, Χανιά.
35. Clesceri, L.S., Greenberg, A.E. and Truseell, R.R., 1989. *Standard methods for examination of water and wastewater*. 17th Edition. APHA, AWWA, WPCF. Washington, DC, USA.
36. Nelson, D.W., 1983. Determination of ammonium in KCl extracts of soils by the salicylate method. *Commun. Soil Sci. Soc. Am. J.* 42: 1051 – 1062.
37. Olsen, S.R. and Sommers, L.E., 1982. Phosphorus. In: Page A.L. et al. (Eds), *Methods of soil Analysis Part 2 – chemical and microbiological properties*. Pp. 403 – 430. 2nd Edition. Agronomy 9, ASA, SSSA. Madison, Winsconsin.
38. Αλεξιάδης, Κ.Α. 1967. *Φυσική και Χημική ανάλυση του εδάφους*. Θεσσαλονίκη.
39. Thomas, G.W. 1982. Exchangeable cations. In: Page A.L. et al. (Eds), *Methods of soil Analysis Part 2 – chemical and microbiological properties*. Pp. 403 – 430. 2nd Edition. Agronomy 9, ASA, SSSA. Madison, Winsconsin.
40. U.S. Environmental Protection Agency, 1999. *Free water surface wetlands for wastewater treatment. A technology assessment*. Phoenix, Arizona
41. Αντωνόπουλος, Β. Ζ., 2003. *Υδραυλική Περιβάλλοντος και ποιότητα επιφανειακών υδάτων*. Εκδόσεις Γιαχούδη, Θεσσαλονίκη, σελ. 446.
42. Αντωνόπουλος, Β. και Τσιούρης, Σ., 1991. Σχέσεις παροχής και ποιοτικών παραμέτρων του νερού στον ποταμό Αξιό. *Πρακτικά συνεδρίου Περιβαλλοντικής Επιστήμης και Τεχνολογίας*, 2 – 5 Σεπτεμβρίου, Μόλυβος Μυτιλήνης, σελ. 640 – 648.
43. Skoulikidis, N., Zagana, E., Nikolaidis, N. P. and Drosos, Th., 2002. Nutrient contribution of agriculture in the lower Acheloos basin. Proceedings of the international conference: *Protection and Restoration of the Environment VI*, Skiathos, July 1 – 5. pp. 505 – 512.
44. Tsiouris, S. E., Mamolos, A. P., Kalburtji, K.L. and Barbayiannis, N., 2002. Fertilizer management in watersheds of two Ramsar wetlands and effects on quality of inflowing water. *Environmental management*, 29: 610 – 619.
45. Χατζηγιαννάκης, Ε., Ματσή, Θ., Αραμπατζής Γ. και Ηλίας, Α., 2006. Επισκόπηση των εδαφών της περιοχής Χαλάστρας – Καλοχωρίου σχετικά με το πρόβλημα αλάτωσης – νατρίωσης. *Πρακτικά 11^{ου} Πανελληνίου Εδαφολογικού Συνεδρίου* (4 – 7 Οκτωβρίου, Άρτα). Σελ. 539 – 546.

(176)

ΜΟΝΙΜΗ ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ ΡΟΗ ΣΕ ΑΝΟΙΚΤΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ ΤΡΑΠΕΖΟΕΙΔΟΥΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ

Μ. Θεοχάρης

ΤΕΙ Ηπείρου, Τμήμα Φυτικής Παραγωγής, Εργαστήριο Αρδεύσεων και Στραγγίσεων,
Κωστακιοί Άρτας Τ.Κ. 47100, e-mail: theoxar@teiep.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι μεταβλητές, που υπεισέρχονται στη μελέτη του προβλήματος της μόνιμης ομοιόμορφης ροής στους ανοικτούς αγωγούς τραπεζοειδούς διατομής, είναι το βάθος ροής, το πλάτος του πυθμένα, η κλίση των πρανών, η παροχή, ο συντελεστής τραχύτητας και η κατά μήκος κλίση του αγωγού. Από όλους τους τρόπους υπολογισμού επικρατέστερος είναι ο υπολογισμός με την εξίσωση του R. Manning, η οποία όμως είναι πεπλεγμένη συνάρτηση των μεταβλητών του προβλήματος, γεγονός που επιβάλλει την εφαρμογή κοπιαστικής και χρονοβόρας επαναληπτικής διαδικασίας. Σε αυτό το άρθρο παρουσιάζεται ένα πρόγραμμα Η/Υ, το οποίο είναι προσιτό σε ευρύ φάσμα ερευνητών και μπορεί να ενσωματωθεί ως υπορουτίνα σε μεγάλα λογισμικά πακέτα υπολογισμών σε ανοικτούς αγωγούς.

STEADY UNIFORM FLOW IN TRAPEZOIDAL OPEN CHANNELS

M. Theocharis

Technical Educational Institution of Epirus, Department of Crop Production, Laboratory
of Irrigation and Drainage, 47100 Arta, Greece , e-mail: theoxar@teiep.gr

ABSTRACT

The variables of the problem of steady uniform flow in open channels of trapezoidal cross-section are: the flow depth, the bed width, the side slopes, the discharge, the roughness coefficient and the hydraulic slope. Among the suggested calculation methods, the Manning's formula is the prevailed one. However, the Manning's formula for trapezoidal sections is a complex function of a lot of variables; its solution is time consuming and requires a lot of iterations. In this paper a Visual Basic program for the study of uniform flow in trapezoidal channels is presented, which is approachable to a wide range of researchers and therefore can be used as a subroutine in computational programs for open channel networks.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Όταν ένας αγωγός μεταφοράς νερού παρουσιάζει ελεύθερη υγρή επιφάνεια ονομάζεται *ανοικτός αγωγός* ή *αγωγός ελεύθερης ροής*. Η πίεση στην επιφάνεια του υγρού είναι σταθερή και ίση με την ατμοσφαιρική. Οι δυνάμεις που προκαλούν τη ροή στους ανοικτούς αγωγούς οφείλονται στη βαρύτητα, ενώ οι δυνάμεις που επιβραδύνουν τη ροή οφείλονται στην ιξώδη διάτμηση και στις τριβές κατά μήκος των τοιχωμάτων του αγωγού. (Οι δυνάμεις επιφανειακής τάσεως και η αντίσταση του αέρα πάνω στη ελεύθερη επιφάνεια θεωρούνται αμελητέες και δεν παίρνονται υπόψη) [1]. Το βάθος ροής, η παροχή και οι κλίσεις του πυθμένα και της ελεύθερης επιφάνειας αλληλεξαρτώνται και επομένως η μελέτη τέτοιων προβλημάτων είναι πιο δύσκολη από τη μελέτη προβλημάτων ροής υπό πίεση [2]. Γενικά διακρίνονται δύο είδη ανοικτών αγωγών, οι *τεχνητοί αγωγοί* και οι *φυσικοί αγωγοί*, ανάλογα με την αρχική τους διαμόρφωση. Οι φυσικοί ανοικτοί αγωγοί έχουν συνήθως διάφορες διατομές, με ακανόνιστα σχήματα και με μεγάλη ποικιλία τραχύτητας στα τοιχώματά τους. Οι τεχνητοί αγωγοί επίσης έχουν διάφορες διατομές, αλλά εξαιτίας της κατασκευής τους από τον άνθρωπο, αυτοί είναι γνωστής γεωμετρίας και υλικών κατασκευής και η ποικιλία της τραχύτητας είναι μικρότερη. Οι τεχνητοί αγωγοί ονομάζονται *πρισματικοί* όταν η διατομή και η κλίση του πυθμένα τους είναι σταθερές. Οι πρισματικοί αγωγοί ονομάζονται *ορθογωνικοί*, *τραπεζοειδείς*, *τριγωνικοί*, *ημικυκλικοί*, *παραβολικοί* κ.λπ., ανάλογα με το γεωμετρικό σχήμα της διατομής τους [1].

2. ΕΙΔΗ ΡΟΗΣ

Η ροή σε ανοικτούς αγωγούς μπορεί να χωριστεί σε διάφορες κατηγορίες και να περιγραφεί με διάφορους τρόπους. Έτσι με βάση τη μεταβολή των διαφόρων παραμέτρων της ροής σε σχέση με το χρόνο και το χώρο η ροή διακρίνεται σε α. Σταθερή και ασταθή ροή, β. Στρωτή και τυρβώδη ροή, γ. Ομοιόμορφη και ανομοιόμορφη ροή, δ. Υποκρίσιμη, υπερκρίσιμη και κρίσιμη ροή και ε. Αστρόβιλη και στροβιλώδη ροή.

2.1. Σταθερή και ασταθής ροή

Η ροή σε έναν ανοικτό αγωγό ονομάζεται σταθερή ή μόνιμη όταν οι μεταβλητές της σε ένα σημείο (ταχύτητα, βάθος κ.λπ.) είναι ανεξάρτητες από το χρόνο. Αυτό εξασφαλίζεται από τη συνθήκη $\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} = 0$. Στην αντίθετη περίπτωση, δηλαδή

όταν $\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} \neq 0$, η ροή ονομάζεται ασταθής ή μη μόνιμη.

2.2. Στρωτή και Τυρβώδης ροή

Με βάση τον αριθμό Reynolds η ροή διακρίνεται σε στρωτή ροή ($Re < 500$) και σε τυρβώδη ροή ($Re > 2000$) [1]. Η ενδιάμεση κατάσταση ροής ονομάζεται μεταβατική. Ο αριθμός Reynolds για ανοικτούς αγωγούς υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Re = \frac{4RV}{\nu} \quad (1)$$

όπου R είναι η υδραυλική ακτίνα της υγρής διατομής σε m, V είναι η μέση ταχύτητα ροής σε m/s και ν είναι το κινηματικό ιξώδες του ρεόντος νερού σε m²/s. Η τυρβώδης ροή είναι συχνότερη και αναφέρεται σε περισσότερα από 99 % των προβλημάτων της ροής των ανοικτών αγωγών που απαντώνται στην πράξη.

2.3. Ομοιόμορφη και ανομοιόμορφη ροή

Η ροή ονομάζεται ομοιόμορφη όταν οι μεταβλητές της σε μία χρονική στιγμή είναι ανεξάρτητες από το χώρο, δηλαδή είναι οι ίδιες σε όλα τα σημεία κατά μήκος του αγωγού. Αυτό εξασφαλίζεται από τη συνθήκη $\frac{\partial \bar{u}}{\partial L} = 0$. Στην αντίθετη περίπτωση

δηλαδή όταν $\frac{\partial \bar{u}}{\partial L} \neq 0$, η ροή ονομάζεται ανομοιόμορφη. Η ροή στους ανοικτούς αγωγούς είναι κατά κανόνα ασταθής και ανομοιόμορφη. Λόγω όμως της πολυπλοκότητάς της, τα προβλήματα των τεχνητών ανοικτών αγωγών αντιμετωπίζονται στην πράξη με την παραδοχή μόνιμης ομοιόμορφης ροής στα ευθύγραμμα τμήματα των αγωγών μεγάλου μήκους και μόνιμης ανομοιόμορφης ροής στις γωνίες, ρυθμιστικές θυρίδες, στους καταβαθμούς, εκχειλιστές κ.λπ.

2.4. Υποκρίσιμη, κρίσιμη και υπερκρίσιμη, ροή

Υποκρίσιμη είναι η ροή όταν η ταχύτητά της είναι μικρότερη από την κρίσιμη ταχύτητα. Υπερκρίσιμη είναι η ροή όταν η ταχύτητά της είναι μεγαλύτερη από την κρίσιμη ταχύτητα, ενώ όταν η ταχύτητα ροής είναι ίση με την κρίσιμη ταχύτητα η ροή ονομάζεται κρίσιμη [1] και οι δυνάμεις μάζας και αδρανείας είναι ίσες [4]. Ο έλεγχος της κατάστασης της ροής γίνεται με αριθμό Froude, F_r , ο οποίος είναι ένας αδιάστατος αριθμός που ορίζεται ως το πηλίκο της μέσης ταχύτητας της ροής, V , προς την ταχύτητα μεταδόσεως των μικρών κυμάτων, c , όπου $c = \sqrt{gE/B}$, E = υγρή διατομή και B = πλάτος διατομής στην επιφάνεια του νερού. Η ταχύτητα μεταδόσεως των μικρών κυμάτων c , ισούται με την κρίσιμη ταχύτητα. Για ορθογωνικούς αγωγούς, όπου $y = \frac{E}{B}$ είναι το υδραυλικό βάθος ροής η κρίσιμη ταχύτητα είναι $c = \sqrt{gy}$. Σύμφωνα με τα παραπάνω [1], η τιμή του αριθμού Froude είναι:

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{gE/B}} \quad (2)$$

Όταν είναι $F_r < 1$ η ροή είναι υποκρίσιμη. Όταν είναι $F_r > 1$ η ροή είναι υπερκρίσιμη. Όταν είναι $F_r = 1$ η ροή είναι κρίσιμη.

2.5. Αστρόβιλη και στροβιλώδης ροή

Αστρόβιλη λέγεται η ροή όταν τα σωματίδια δε διαθέτουν γωνιακή ταχύτητα περί το κέντρο τους, ($\nabla \times \bar{u} = 0 \rightarrow \omega = 0$). Σε αντίθετη περίπτωση λέγεται στροβιλώδης. Στα πραγματικά ρευστά η ροή είναι πάντα, λιγότερο ή περισσότερο, στροβιλώδης. Λόγω όμως του ότι το νερό διαθέτει μικρό ιξώδες, η επίδραση του εξασθενεί γρήγορα πέρα από τα τοιχώματα και περιορίζεται σε ένα λεπτό στρώμα σε αυτά. Η ροή διαμορφώνεται κυρίως από δυνάμεις βαρύτητας δηλαδή θεωρείται αστρόβιλη, και η επίδραση του ιξώδους, (και της τραχύτητας), λαμβάνεται υπόψη μέσω εμπειρικών τύπων απωλειών [3].

3. ΤΥΠΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΜΟΝΙΜΗΣ ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗΣ ΡΟΗΣ ΣΕ ΑΝΟΙΚΤΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ

Οι χρησιμοποιούμενοι τύποι υπολογισμού της ταχύτητας της μόνιμης ομοιόμορφης ροής σε ανοικτούς αγωγούς είναι της γενικής μορφής [1],[2],[3]:

$$V = C\sqrt{RJ} \quad (3)$$

όπου V είναι η μέση ταχύτητα ροής σε m/s, C είναι συντελεστής τραχύτητας σε $m^{1/2}/s$, J είναι η κλίση της γραμμής ενεργείας και R είναι η υδραυλική ακτίνα σε m. Η σχέση αυτή προτάθηκε από το Γάλλο μηχανικό Antoine Chezy ύστερα από μετρήσεις που έκανε σε χωμάτινη διώρυγα και στον ποταμό Seine το 1769 [3]. Ο τύπος του Chezy ισχύει μόνο για ομοιόμορφη ροή σε τραχείς αγωγούς και με μεγάλη σχετική ταχύτητα. Οι συνηθέστερες από τις εκφράσεις υπολογισμού του συντελεστή τραχύτητας, προτάθηκαν από τους Darcy-Weisbach, τους Manning - Strickler, τον Bazin, τους Kutter -Ganguillet, τον Kutter, και τον Powell (πίνακας 1). Από όλους αυτούς τους τρόπους υπολογισμού της τραχύτητας επικρατέστερος είναι ο υπολογισμός με την εξίσωση των Manning - Strickler.

Πίνακας 1. Τιμές του συντελεστή τραχύτητας του Chezy για τον υπολογισμό της μόνιμης ομοιόμορφης ροής σε ανοικτούς αγωγούς [1], [5], [6], [7], [8].

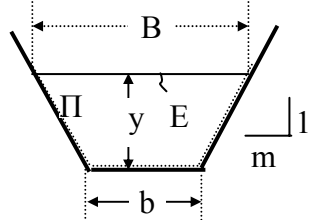
Όνομα ερευνητή	C	Παρατηρήσεις
1 Τύπος των Darcy – Weisbach [1]	$\sqrt{\frac{8g}{f}}$	Ο συντελεστής f εξαρτάται από την τραχύτητα του αγωγού και τον αριθμό του Reynolds .
2 Τύπος των Manning – Strickler [5].	$\frac{m}{n} R^{1/6}$	Στο διεθνές σύστημα είναι $m=1$ και στο Αγγλοσαξονικό $m=1,49$.
3 Τύπος του Bazin [6].	$\frac{87}{1 + \frac{\gamma}{\sqrt{R}}}$	Εφαρμόζεται μόνο στη Γαλλία και δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα για ταχύτητες 1,20 m/s.
4 Τύπος των Kutter – Ganguillet [7].	$\frac{23 + \frac{0,00155}{J} + \frac{1}{n}}{1 + \left(23 + \frac{0,00155}{J}\right) \frac{n}{\sqrt{R}}}$	Η χρήση του είναι περιορισμένη και αντί για αυτόν χρησιμοποιείται ο τύπος του Manning.
5 Τύπος του Kutter [7].	$\frac{100\sqrt{R}}{m + R}$	Εφαρμόζεται κυρίως στον υπολογισμό δικτύων υπονόμων.
6 Τύπος του Powell [8].	$-m \log \left(\frac{C}{R_e} + \frac{\varepsilon}{R} \right)$	Στο Αγγλοσαξονικό σύστημα είναι $m=42$ και στο διεθνές $m=23,182$.

4. ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΩΝ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΜΟΝΙΜΗΣ ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗΣ ΡΟΗΣ ΣΕ ΑΝΟΙΚΤΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ ΤΡΑΠΕΖΟΕΙΔΟΥΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ

Η επίλυση των προβλημάτων της μόνιμης ομοιόμορφης ροής των ασυμπίεστων ρευστών απαιτεί την ταυτόχρονη λύση της εξίσωσης συνεχείας και της ημιεμπειρικής εξίσωσης του Manning. Για την περίπτωση της τραπεζοειδούς διατομής ισχύουν οι σχέσεις:

$$E = by + my^2 \quad (4), \quad \Pi = b + 2y\sqrt{1 + m^2} \quad (5), \quad \text{και} \quad R = \frac{by + my^2}{b + 2y\sqrt{1 + m^2}} \quad (6)$$

Επομένως η εξίσωση του Manning παίρνει τη μορφή:

$$\frac{Q}{E} = \frac{1}{n} J^{1/2} \left(\frac{by + my^2}{b + 2y\sqrt{1+m^2}} \right)^{2/3} \quad (7)$$


Σχήμα 1. Χαρακτηριστικά τραπεζοειδούς διατομής.

Οι μεταβλητές του προβλήματος είναι το βάθος ροής, y , το πλάτος του πυθμένα, b , η κλίση των πρανών, m , η παροχή του αγωγού, Q , ο συντελεστής του Manning, n , και η κατά μήκος κλίση του αγωγού, J . Όταν από αυτές είναι γνωστές οι πέντε μπορεί να υπολογιστεί η έκτη. Η τραπεζοειδής διατομή είναι γενική περίπτωση και μεταπίπτει σε ορθογωνική διατομή όταν $m=0$, καθώς επίσης σε τριγωνική διατομή όταν $b=0$.

4. ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΩΝ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΗ ΒΟΗΘΕΙΑ Η/Υ

Η δυσκολία στην επίλυση των προβλημάτων οφείλεται στο ότι η εξίσωση του Manning είναι πεπλεγμένη συνάρτηση των γεωμετρικών στοιχείων της διατομής με αποτέλεσμα να απαιτείται η εφαρμογή επαναληπτικής διαδικασίας η οποία είναι κοπιαστική και χρονοβόρα, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για εκτεταμένα δίκτυα αγωγών, όπου ο υπολογισμός πρέπει να συνδυάζεται αυτόματα με τον υπολογισμό άλλων μεγεθών. Για το λόγο αυτό αναπτύχθηκε ένα απλό πρόγραμμα υπολογισμού, το οποίο να είναι προσιτό σε ευρύ φάσμα ερευνητών και να μπορεί να ενσωματωθεί ως υπορουτίνα σε υπολογιστικά πακέτα για ανοικτούς αγωγούς. Στη συνέχεια παρουσιάζεται ένα τέτοιο πρόγραμμα σε γλώσσα Microsoft Visual Basic, με τη βοήθεια του οποίου υπολογίζεται το ένα από τα μεγέθη: y , b , m , Q , n , J , όταν είναι γνωστά τα υπόλοιπα πέντε.

5.1. Εισαγωγή δεδομένων

Στα κελιά D6 έως D11 ενός λογιστικού φύλλου (spreadsheet) εισάγονται τα μεγέθη y , b , m , Q , n και J αντίστοιχα. Στο κελί που αφορά το άγνωστο μέγεθος εισάγεται το σημείο, ; , και στα υπόλοιπα οι τιμές των γνωστών δεδομένων. Στο κελί D12 εισάγεται η εξίσωση του Manning, (εξ. 7), η οποία έχει την έκφραση: $=\text{if}(d9=""; g26;d9))/(\text{if}(d6=""; g26*d7+d8*g26^2;\text{if}(d7=""; g26*d6+d8*d6^2;\text{if}(d8=""; d7*d6+g26*d6^2;d7*d6+d8*d6^2))))-(1/(\text{if}(d10=""; g26;d10)))*((\text{if}(d11=""; g26;d11))^{1/2})*(((\text{if}(d6=""; g26*d7+d8*g26^2;\text{if}(d7=""; g26*d6+d8*d6^2;\text{if}(d8=""; d7*d6+g26*d6^2;d7*d6+d8*d6^2))))/(\text{if}(d6=""; d7+2*g26*((1+d8^2)^{1/2});\text{if}(d7=""; g26+2*d6*((1+d8^2)^{1/2});\text{if}(d8=""; d7+2*d6*((1+g26^2)^{1/2});d7+2*d6*((1+d8^2)^{1/2}))))))^{2/3})$ και ισχύει για όλες τις περιπτώσεις.

5.2. Επίλυση του προβλήματος

Για την επίλυση του προβλήματος αναπτύσσεται η μακροεντολή :

Sub Μακροεντολή1()

Μόνιμη Ομοιόμορφη Ροή σε Ανοικτούς Αγωγούς Τραπεζοειδούς Διατομής

'Καταγραφή μακροεντολής 26/5/2007 από Μενέλαο Θεοχάρη

```

If Range("d6") = ";" Then
Range("a2").Cells = "Υπολογισμός του βάθους ροής αγωγού τραπεζοειδούς διατομής"
Range("d12").GoalSeek Goal:=0, ChangingCell:=Range("g24")
Range("g24").Select
Range("a13").Cells = "Ζητείται το βάθος ροής"
Range("a7").Cells = "Το πλάτος του πυθμένα"
Range("a8").Cells = "Η κλίση των πρανών"
Range("a9").Cells = "Η παροχή του αγωγού"
Range("a10").Cells = "Ο συντελεστής του Manning"
Range("a11").Cells = "Η κατά μήκος κλίση του αγωγού"
Range("a24").Cells = "Από την επίλυση της εξίσωσης (5) προκύπτει το βάθος ροής :"
Range("f24").Cells = "y ="
Range("h24").Cells = "m"
ElseIf Range("d7") = ";" Then
Range("a2").Cells = "Υπολογισμός του πλάτους πυθμένα αγωγού τραπεζοειδούς διατομής"
Range("d12").GoalSeek Goal:=0, ChangingCell:=Range("g24")
Range("g24").Select
Range("a13").Cells = "Ζητείται το πλάτος του πυθμένα"
Range("a24").Cells = "Από την επίλυση της εξίσωσης (5) προκύπτει το πλάτος του πυθμένα : "
Range("f24").Cells = "b ="
Range("h24").Cells = "m"
ElseIf Range("d8") = ";" Then
Range("a2").Cells = "Υπολογισμός της κλίσης των πρανών αγωγού τραπεζοειδούς διατομής "
Range("d12").GoalSeek Goal:=0, ChangingCell:=Range("g24")
Range("g24").Select
Range("a13").Cells = "Ζητείται η κλίση των πρανών"
Range("a24").Cells = "Από την επίλυση της εξίσωσης (5) προκύπτει η κλίση των πρανών : "
Range("f24").Cells = "m ="
Range("h24").Cells = ""
ElseIf Range("d9") = ";" Then
Range("a2").Cells = "Υπολογισμός της παροχής αγωγού τραπεζοειδούς διατομής"
Range("d12").GoalSeek Goal:=0, ChangingCell:=Range("g24")
Range("g24").Select
Range("a13").Cells = "Ζητείται η παροχή του αγωγού"
Range("a24").Cells = "Από την επίλυση της εξίσωσης (5) προκύπτει η παροχή του αγωγού : "
Range("f24").Cells = "Q ="
Range("h24").Cells = "m3/s"
ElseIf Range("d10") = ";" Then
Range("a2").Cells = "Υπολογισμός του συντελεστή του Manning αγωγού τραπεζοειδούς διατομής"
Range("d12").GoalSeek Goal:=0, ChangingCell:=Range("g24")
Range("g24").Select
Range("a13").Cells = "Ζητείται ο συντελεστής του Manning"
Range("a24").Cells = "Από την επίλυση της εξίσωσης (5) προκύπτει ο συντελεστής του Manning : "

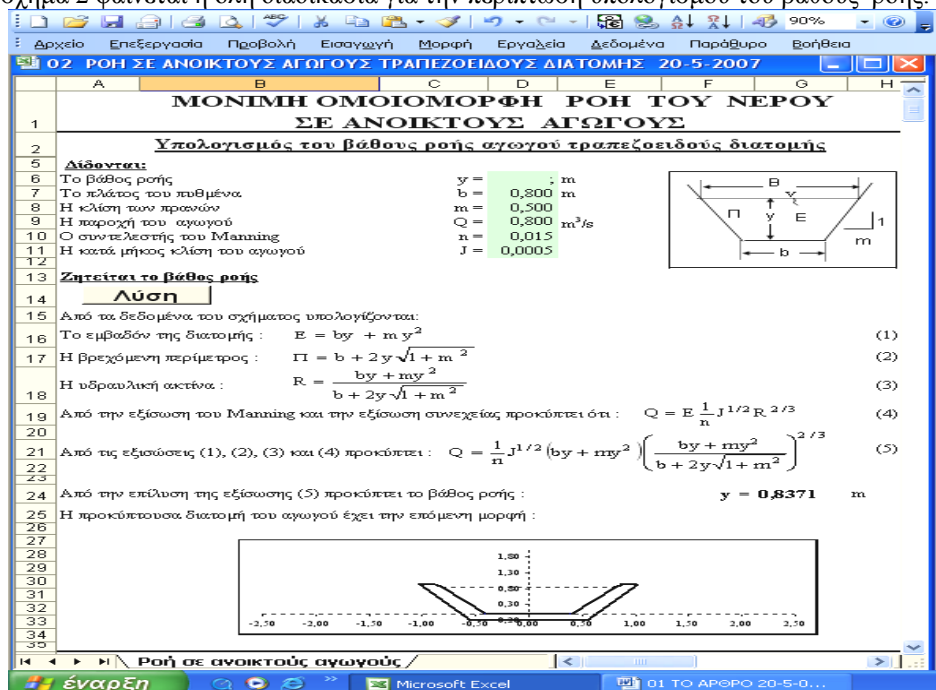
```

```

Range("f24").Cells = " n ="
Range("h24").Cells = ""
ElseIf Range("d11") = ";" Then
Range("a2").Cells = "Υπολογισμός της κατά μήκος κλίσης αγωγού τραπεζοειδούς
διατομής"
Range("d12").GoalSeek Goal: =0, ChangingCell:=Range("g24")
Range("g24").Select
Range("a13").Cells = "Ζητείται η κατά μήκος κλίση του αγωγού"
Range("a24").Cells = "Από την επίλυση της εξίσωσης (5) προκύπτει η κατά μήκος κλίση του
αγωγού:"
Range("f24").Cells = " J ="
Range("h24").Cells = ""
Else
Range("g24").Cells = "1000"
End If
End Sub

```

Στη συνέχεια πατώντας το πλήκτρο **Λύση** προκύπτει η λύση του προβλήματος. Στο σχήμα 2 φαίνεται η όλη διαδικασία για την περίπτωση υπολογισμού του βάθους ροής.



Σχήμα 2. Υπολογιστικό φύλλο για τον προσδιορισμό του βάθους ροής.

5.3. Εφαρμογή

Για $b=0,60$ m, $m=0,30$, $Q=2,00$ m³/s, $n = 0,015$ m και $J=5$ ‰ προκύπτει $y = 0,99$ m.

3. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην περίπτωση των τραπεζοειδών αγωγών οι μεταβλητές που υπεισέρχονται στο πρόβλημα είναι το βάθος ροής, το πλάτος του πυθμένα, η κλίση των πρανών, η παροχή

του αγωγού, ο συντελεστής του Manning, και η κατά μήκος κλίση του αγωγού. Η τραπεζοειδής διατομή είναι γενική, που μεταπίπτει σε ορθογωνική, όταν η κλίση των πρανών είναι μηδενική, και σε τριγωνική διατομή όταν το πλάτος πυθμένα είναι μηδέν.

Η δυσκολία στην επίλυση των προβλημάτων στους τραπεζοειδείς αγωγούς οφείλεται στο ότι η εξίσωση του Manning είναι πεπλεγμένη συνάρτηση των γεωμετρικών και υδραυλικών χαρακτηριστικών, με αποτέλεσμα η επίλυσή της να απαιτεί πολλές και κοπιαστικές πράξεις και να είναι αναπόφευκτη η χρήση Η/Υ.

Το πρόγραμμα επίλυσης των προβλημάτων υπολογισμού των μεταβλητών της σταθερής ομοιόμορφης ροής σε τραπεζοειδείς αγωγούς που αναπτύχθηκε στην παρούσα μελέτη, είναι απλό στη χρήση, δεν απαιτεί εξειδικευμένες γνώσεις πληροφορικής, είναι προσιτό σε ευρύ φάσμα ερευνητών και μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην καθημερινή πράξη. Επίσης μπορεί να ενσωματωθεί ως υπορουτίνα σε άλλα λογισμικά πακέτα για ανοικτούς αγωγούς.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Τερζίδης, Γ., 1982. *Μαθήματα Υδραυλικής*, 3. *Ανοικτοί Αγωγοί*, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, σελ. 9-34.
2. Δημητράκοπουλος, Α. Κ., και Χατζηθεοδώρου, Χ., 1992. *Στοιχεία Υδραυλικής*, Εκδόσεις Παν/μίου Πατρών, Πάτρα, σελ. 345-359
3. Αργυρόπουλος, Π. Α., 1962. *Θεωρητική και Εφαρμοσμένη Υδραυλική*, Οίκος Τεχνικών Εκδόσεων Αφων Ι. Λιόντη, Πειραιεύς, σελ. 117-164
4. Ξανθουλέας, Α. Σ., 1985. *Πίνακες υπολογισμού ομοιόμορφης ροής σε αγωγούς ελεύθερης ροής*, Τεχνικά Χρονικά, Τεύχη 10-12/1985, Αθήνα.
5. Manning, R., 1890. *Flow of water in open channels and pipes*, Trans. Inst. of Civil Eng. of Ireland, Vol. 20.
6. Bazin, H., 1869. *Etude d'une nouvelle formule pour calculer le débit des canaux déversés*, Mémoire No 41, Annales des ponts et chaussées, Vol. 14.
7. Ganguillet, E. and Kutter, W. R., 1869. *Versuch zur Aufstellung einer neuen allgemeinen Formel für die gleichförmige Bewegung des Wassers in Kanälen und Flüssen*, Zeitschrift des Österreichischen Ingenieur – und Architekten Vereines, Vol. 21, No 1,2,3, Vienna
8. Powell, R. W., and Posey, C. J., 1959. *Resistance Experiments in a Triangular Channel*, Proc. ASCE, Hydraulics Division, May 1959, p. 45.

(177)

ΜΟΝΙΜΗ ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ ΡΟΗ ΣΕ ΑΝΟΙΚΤΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ

Μ. Θεοχάρης

ΤΕΙ Ηπείρου, Τμήμα Φυτικής Παραγωγής, Εργαστήριο Αρδεύσεων και Στραγγίσεων,
Κωστακιοί Αρτας Τ.Κ. 47100, e-mail: theoxar@teiep.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι παράμετροι που υπεισέρχονται στη μελέτη του προβλήματος της μόνιμης ομοιόμορφης ροής στους ανοικτούς αγωγούς κυκλικής διατομής είναι η διάμετρος του αγωγού, το μέσο βάθος ροής (ή το πλάτος της ελεύθερης επιφάνειας), η παροχή του αγωγού, ο συντελεστής του Manning και η κατά μήκος κλίση του αγωγού. Ομοίως για την περίπτωση αγωγών παραβολικής διατομής είναι το μέσο βάθος ροής, το πλάτος της ελεύθερης επιφάνειας, η παροχή του αγωγού, ο συντελεστής του Manning και η κατά μήκος κλίση του αγωγού. Σε αυτό το άρθρο αναπτύσσονται δύο προγράμματα Η/Υ για τον υπολογισμό της ροής στους ανοικτούς αγωγούς κυκλικής και παραβολικής διατομής. Τα προγράμματα είναι απλά, εύκολα στη χρήση, προσιτά σε ευρύ φάσμα ερευνητών και μπορεί να ενσωματωθούν ως υπορουτίνες σε μεγάλα λογισμικά πακέτα υπολογισμών υδραυλικών δικτύων.

STEADY UNIFORM FLOW IN CIRCULAR OR PARABOLIC OPEN CHANNELS

M. Theocharis

Technical Educational Institution of Epirus, Department of Crop Production, Laboratory
of Irrigation and Drainage, 47100 Arta, Greece , e-mail: theoxar@teiep.gr

ABSTRACT

The variables of the problem of steady uniform flow in open channels of circular or parabolic cross-section are the flow depth, the discharge, the factor of roughness and the hydraulic slope. Moreover the pipe diameter is a variable in circular open channels, whereas the width of free surface is a variable in parabolic open channels. Between of all the suggested calculation methods, the Manning's formula is the prevailed one which, however, is a complex function of a lot of variables; its solution is very time consuming and calls for a lot of calculations. In this paper two Visual Basic programs for the study of uniform flow in circular or parabolic channels developed, which are approachable to a wide range of researchers and therefore can be applied as a subroutine in computational programs of hydraulic networks.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

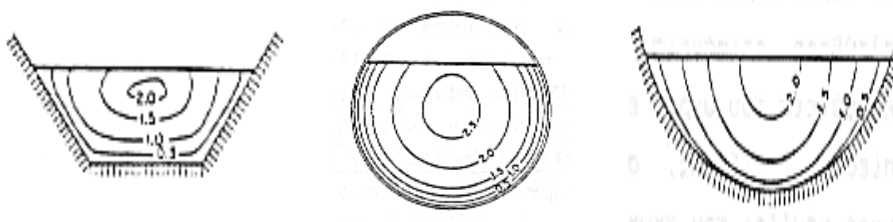
Γενικά διακρίνονται δύο είδη ανοικτών αγωγών, οι *τεχνητοί αγωγοί* και οι *φυσικοί αγωγοί*, ανάλογα με την αρχική τους διαμόρφωση. Οι φυσικοί ανοικτοί αγωγοί έχουν συνήθως διάφορες διατομές, με ακανόνιστα σχήματα και μεγάλη ποικιλία τραχύτητας στα τοιχώματά τους. Οι τεχνητοί αγωγοί επίσης έχουν διάφορες διατομές, αλλά εξαιτίας της κατασκευής τους από τον άνθρωπο, είναι γνωστής γεωμετρίας και υλικών κατασκευής και η ποικιλία της τραχύτητας είναι μικρότερη. Οι τεχνητοί αγωγοί ονομάζονται *πρισματικοί* όταν η διατομή και η κλίση του πυθμένα τους είναι σταθερές. Οι πρισματικοί αγωγοί ονομάζονται *ορθογωνικοί, τραπεζοειδείς, τριγωνικοί, ημικυκλικοί, παραβολικοί* κ.λπ., ανάλογα με το γεωμετρικό σχήμα της διατομής τους [1].

2. ΕΙΔΗ ΡΟΗΣ

Η ροή σε ανοιχτούς αγωγούς μπορεί να χωριστεί σε πολλά είδη και να περιγραφεί με διαφόρους τρόπους. Έτσι με βάση τη μεταβολή των διαφόρων παραμέτρων της ροής σε σχέση με το χώρο και το χρόνο η ροή διακρίνεται σε α. Στρωτή και τυρβώδη ροή β. Υποκρίσιμη, υπερκρίσιμη, και κρίσιμη ροή γ. Σταθερή και ασταθή ροή δ. Ομοιόμορφη και ανομοιόμορφη ροή ή ε. Αστρόβιλη και στροβιλώδη ροή [2],[3].

Η πλειονότητα των ροών στους ανοιχτούς αγωγούς είναι τυρβώδεις και στην πράξη αντιμετωπίζονται στα μεν ευθύγραμμα τμήματα μεγάλου μήκους ως μόνιμες ομοιόμορφες ροές στα δε σημεία μεμονωμένων κατασκευών, ως μόνιμες ανομοιόμορφες ροές. Οι συνήθεις διατομές, με τις οποίες κατασκευάζονται οι τεχνητοί αγωγοί, είναι η τραπεζοειδής (της οποίας ειδική περίπτωση αποτελούν η ορθογωνική και η τριγωνική διατομή), η κυκλική, η παραβολική και σπανιότερα η πεταλοειδής και η ωοειδής.

Η κατανομή της ταχύτητας στους ανοιχτούς αγωγούς και για τυρβώδη ροή εξαρτάται από πολλούς παράγοντες οι σπουδαιότεροι από τους οποίους είναι το ιξώδες, το σχήμα και η τραχύτητα των τοιχωμάτων και τα δευτερεύοντα ρεύματα που συνήθως παρουσιάζονται σε όλους τους τύπους των ανοικτών αγωγών. Γενικά η ταχύτητα έχει μηδενική τιμή πάνω στα τοιχώματα του αγωγού και αυξάνει κατά μη γραμμικό τρόπο με την απόσταση παίρνοντας τη μέγιστη τιμή λίγο κάτω από την ελεύθερη επιφάνεια. Το σχήμα 1 δείχνει την κατανομή της ταχύτητας για τις περιπτώσεις αγωγών τραπεζοειδούς, κυκλικής και παραβολικής διατομής [4].



Σχήμα 1. Κατανομή ταχύτητας σε ανοιχτούς αγωγούς για τυρβώδη ροή

3. ΤΥΠΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΜΟΝΙΜΗΣ ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗΣ ΡΟΗΣ ΣΕ ΑΝΟΙΚΤΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ

Οι χρησιμοποιούμενοι τύποι υπολογισμού της μόνιμης ομοιόμορφης ροής σε ανοικτούς αγωγούς βασίζονται στον τύπο του Chezy [5]:

$$V = C\sqrt{RJ} \quad (1)$$

όπου V είναι η μέση ταχύτητα ροής σε m/s, C είναι συντελεστής τραχύτητας σε $m^{1/2}/s$, J είναι η κλίση της γραμμής ενεργείας και R είναι η υδραυλική ακτίνα σε m. Από όλες εκφράσεις που προτάθηκαν για τον υπολογισμό του C , [2] [5], [6], [7], [8], [9], επικρατέστερη είναι η εξίσωση των Manning - Strickler:

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6} \quad (2)$$

Επομένως η σχέση των Manning – Strickler παίρνει τη μορφή:

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

Για τις λείες επιφάνειες, επειδή ο συντελεστής του Chezy δεν είναι σταθερός αλλά εξαρτάται από τον αριθμό του Reynolds, πρέπει να χρησιμοποιείται ή εξίσωση των Darcy-Weisbach αντί της εξίσωσης των Manning - Strickler.

4. ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΩΝ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΣΕ ΑΓΩΓΟΥΣ ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ

Η επίλυση των προβλημάτων της μόνιμης ομοιόμορφης ροής των ασυμπίεστων ρευστών απαιτεί την ταυτόχρονη λύση της εξίσωσης συνεχείας και της εξίσωσης κινήσεως του Manning [1] [2], [3], [5].

4.1 Αγωγοί κυκλικής διατομής

Για την κυκλική διατομή του σχήματος 2 ισχύουν οι σχέσεις:

$$\varphi = 2 \text{ τοξσυν} \left(1 - \frac{2y}{D} \right) \quad (4)$$

$$b = D \text{ ημ τοξσυν} \left(1 - \frac{2y}{D} \right) \quad (5)$$

$$E = \frac{D^2}{4} \text{ τοξσυν} \left(1 - \frac{2y}{D} \right) + \frac{D}{2} \left(y - \frac{D}{2} \right) \text{ ημ τοξσυν} \left(1 - \frac{2y}{D} \right) \quad (6)$$

$$\Pi = D \text{ τοξσυν} \left(1 - \frac{2y}{D} \right) \quad (7)$$

Επομένως η εξίσωση του Manning παίρνει τη μορφή:

$$Q = \frac{E}{n} J^{1/2} \left(\frac{E}{\Pi} \right)^{2/3} = \frac{1}{n} J^{1/2} \frac{\left[\frac{D^2}{4} \text{ τοξσυν} \left(1 - \frac{2y}{D} \right) + \frac{D}{2} \left(y - \frac{D}{2} \right) \text{ ημ τοξσυν} \left(1 - \frac{2y}{D} \right) \right]^{5/3}}{\left(D \text{ τοξσυν} \left(1 - \frac{2y}{D} \right) \right)^{2/3}} \quad (8)$$

4.2 Αγωγοί παραβολικής διατομής

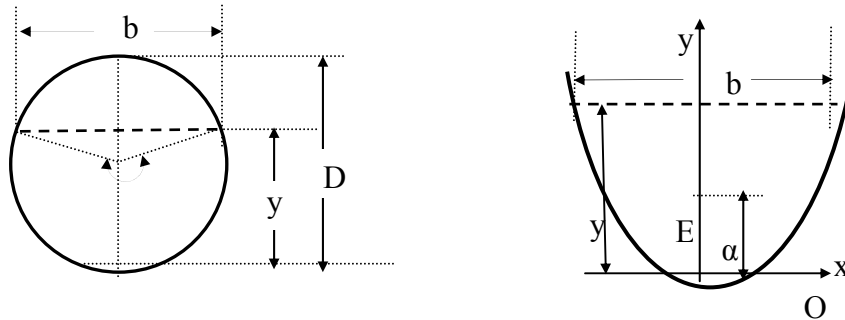
Για την παραβολική διατομή του σχήματος 2 η εξίσωση της παραβολής είναι:

$$(x - x_0)^2 = 4a (y - y_0) \quad (9)$$

$$\text{Είναι } (x_0, y_0) = (0, 0). \text{ Άρα } x^2 = 4ay \Rightarrow y = \frac{1}{4a} x^2 \quad (10)$$

όπου a είναι η απόσταση της εστίας, E , από την κορυφή, O , της παραβολής. Η ποσότητα $p = 2a$ ονομάζεται παράμετρος της παραβολής.

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διατομής, μπορούν να υπολογιστούν ως συνάρτηση των δύο από τις τρεις μεταβλητές a , b και y από τις σχέσεις:



Σχήμα 2. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά κυκλικών και παραβολικών διατομών

$$E = \frac{2}{3} by = \frac{8}{3} a^{1/2} y^{3/2} = \frac{b^3}{24a} \quad (11)$$

$$\Pi = b + \frac{8}{3} \frac{y^2}{b} = b + \frac{b^3}{96a^2} = 2\sqrt{y} \frac{6a + y}{3\sqrt{a}} \quad (12)$$

Επομένως η εξίσωση του Manning παίρνει τη μορφή:

$$\frac{Q}{E} = \frac{1}{n} J^{1/2} \left(\frac{E}{\Pi} \right)^{2/3} \Rightarrow Q = \frac{2}{3n} J^{1/2} \left[\frac{2b^{7/2} y^{5/2}}{3b^2 + 8y^2} \right]^{2/3} \quad (13)$$

Και στις δύο περιπτώσεις διατομών οι μεταβλητές του προβλήματος είναι το μέσο βάθος ροής, y , η παροχή του αγωγού, Q , ο συντελεστής του Manning, n , και η κατά μήκος κλίση του αγωγού, J . Επιπλέον, για μεν την κυκλική διατομή είναι και η διάμετρος του αγωγού, D , για δε για την παραβολική διατομή είναι και το πλάτος της ελεύθερης επιφάνειας, b .

5. ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΩΝ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΗ ΒΟΗΘΕΙΑ Η/Υ

Αναπτύσσονται στη συνέχεια δύο προγράμματα σε Microsoft Visual Basic τα οποία είναι απλά, εύκολα στη χρήση, προσιτά σε ευρύ φάσμα ερευνητών και μπορούν να ενσωματωθούν ως υπορουτίνες σε μεγάλα λογισμικά πακέτα υπολογισμών υδραυλικών δικτύων.

5.1 Αγωγοί κυκλικής διατομής

5.1.1. Εισαγωγή δεδομένων

Στα κελιά D6 έως D10 ενός λογιστικού φύλλου εισάγονται τα μεγέθη y , D , Q , n και J αντίστοιχα. Στο κελί που αφορά το άγνωστο μέγεθος εισάγεται το σημείο, ; , και στα υπόλοιπα οι τιμές των γνωστών δεδομένων. Στο κελί D12 εισάγεται η εξίσωση

του Manning, (εξ.8):
$$= (\text{if}(d8="";g24;d8)) - (1/(\text{if}(d9="";g24;d9))) * (\text{if}(d10="";g24^{(1/2)};d10^{(1/2)})) * ((\text{if}(d6="";((d7^2)/4)*\text{acos}(1-(2*g24/d7))+(d7/2)*(g24-(d7/2))*\sin(\text{acos}(1-(2*g24/d7))));\text{if}(d7="";((g24^2)/4)*\text{acos}(1-(2*d6/g24))+(g24/2)*(d6-(g24/2))*\sin(\text{acos}(1-(2*d6/g24)))));((d7^2)/4)*\text{acos}(1-(2*d6/d7))+(d7/2)*(d6-(d7/2))*\sin(\text{acos}(1-(2*d6/d7))))^{(5/3)))/(\text{if}(d7="";g24*\text{acos}(1-2*d6/g24);d7*\text{acos}(1-2*d6/d7))^{(2/3)}).$$

5.1.2. Επίλυση του προβλήματος

Για την επίλυση του προβλήματος αναπτύσσεται η μακροεντολή :

Sub Μακροεντολή1 ()

Μόνιμη ομοιόμορφη ροή σε ανοικτούς αγωγούς κυκλικής διατομής

Καταγραφή μακροεντολής 15/6/2007 από Μενέλαο Θεοχάρη

If Range ("d6") = ";" Then

Range ("a2").Cells = "Υπολογισμός του βάθους ροής αγωγού κυκλικής διατομής"

Range ("d12").GoalSeek Goal:=0, Changing Cell:=Range("g24")

Range ("g24").Select

Range ("a12").Cells = "Ζητείται το βάθος ροής"

Range ("a7").Cells = "Η διάμετρος του αγωγού"

Range ("a8").Cells = "Η παροχή του αγωγού"

Range ("a9").Cells = "Ο συντελεστής του Manning"

Range ("a10").Cells = "Η κατά μήκος κλίση του αγωγού"

Range ("a24").Cells = "Από την επίλυση της εξίσωσης (5) προκύπτει το βάθος ροής :"

Range ("f24").Cells = "y ="

Range ("h24").Cells = "m"

Else If Range ("d7") = ";" Then

Range ("a2").Cells = "Υπολογισμός της διαμέτρου αγωγού κυκλικής διατομής"

Range ("d12").GoalSeek Goal:=0, Changing Cell:=Range("g24")

Range ("g24").Select

Range ("a12").Cells = "Ζητείται η διάμετρος του αγωγού"

Range ("a24").Cells = "Από την επίλυση της εξίσωσης (5) προκύπτει η διάμετρος του αγωγού: "

Range ("f24").Cells = "D ="

Range ("h24").Cells = "m"

Else If Range ("d8") = ";" Then

Range ("a2").Cells = "Υπολογισμός της παροχής αγωγού κυκλικής διατομής"

Range ("d12").GoalSeek Goal:=0, Changing Cell:=Range("g24")

Range ("g24").Select

Range ("a12").Cells = "Ζητείται η παροχή του αγωγού"

Range ("a24").Cells = "Από την επίλυση της εξίσωσης (5) προκύπτει η παροχή του αγωγού: "

Range ("f24").Cells = "Q ="

Range ("h24").Cells = "m³/s"

Else If Range ("d9") = ";" Then

Range ("a2").Cells = "Υπολογισμός του συντελεστή του Manning αγωγού κυκλικής διατομής"

Range ("d12").GoalSeek Goal:=0, Changing Cell:=Range("g24")

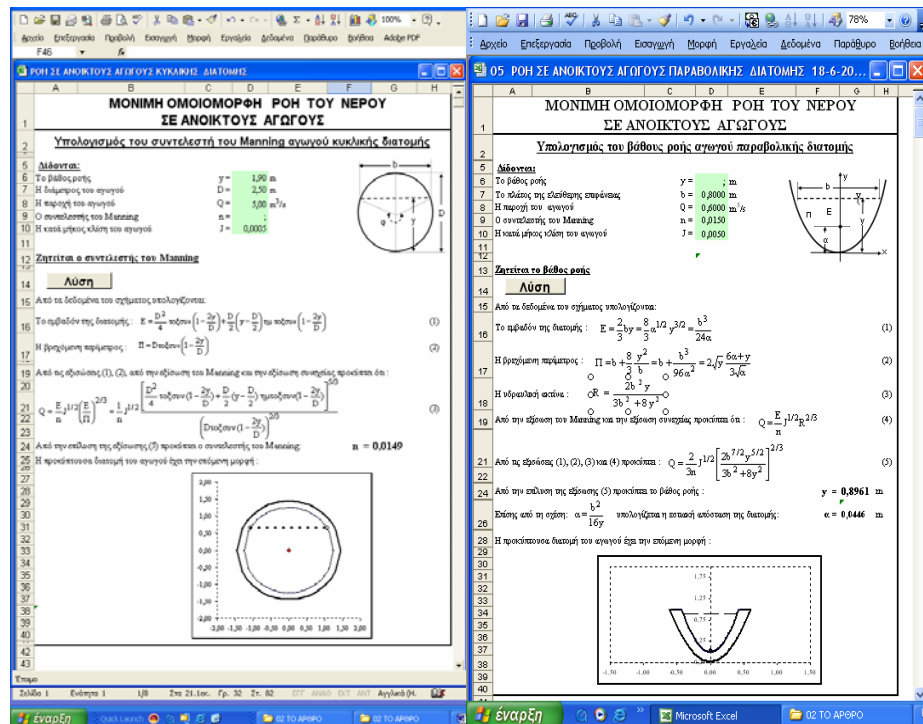
Range ("g24").Select

Range ("a12").Cells = "Ζητείται ο συντελεστής του Manning"

Range ("a24").Cells = "Από την επίλυση της εξίσωσης (5) προκύπτει ο συντελεστής του Manning: "

```

Range ("f24").Cells = " n ="
Range ("h24").Cells = ""
Else If Range ("d10") = ";" Then
Range ("a2").Cells = "Υπολογισμός της κατά μήκος κλίσης αγωγού κυκλικής διατομής"
Range ("d12").GoalSeek Goal:=0, Changing Cell:=Range ("g24")
Range ("g24").Select
Range ("a12").Cells = "Ζητείται η κατά μήκος κλίση του αγωγού"
Range ("a24").Cells = "Από την επίλυση της εξίσωσης (5) προκύπτει η κατά μήκος
κλίση του αγωγού:"
Range ("f24").Cells = " J ="
Range ("h24").Cells = ""
Else
Range ("g24").Cells = "1000"
End If
End Sub
    
```



Σχήμα 3. Υπολογιστικό φύλλο για τον προσδιορισμό του βάθους ροής

Στη συνέχεια πατώντας το πλήκτρο “**Λύση**” προκύπτει η λύση του προβλήματος. Στο σχήμα 3 φαίνεται η όλη διαδικασία για την περίπτωση υπολογισμού του βάθους ροής.

5.2 Αγωγοί παραβολικής διατομής

5.2.1. Εισαγωγή δεδομένων

Στα κελιά D6 έως D10 εισάγονται τα μεγέθη y , b , Q , n και J αντίστοιχα. Στο κελί που αφορά το άγνωστο μέγεθος εισάγεται το σημείο , ; , και στα υπόλοιπα οι τιμές των γνωστών δεδομένων. Στο κελί D12 εισάγεται η εξίσωση του Manning, (εξ.13):

$$=3/2*(if(d8="";g24;d8))-(1/(if(d9="";g24;d9)))*((if(d10="";g24;d10))^(1/2))*(if(d6="";(2*d7^(7/2)*g24^(5/2)/(3*d7^2+8*g24^2))^(2/3);if(d7="";(2*g24^(7/2)*d6^(5/2)/(3*g24^2+8*d6^2))^(2/3);(2*d7^(7/2)*d6^(5/2)/(3*d7^2+8*d6^2))^(2/3))).$$

5.2.2. Επίλυση του προβλήματος

Για την επίλυση του προβλήματος αναπτύσσεται η μακροεντολή :

Sub Μακροεντολή 2()

'Μόνιμη ομοιόμορφη ροή σε ανοικτούς αγωγούς παραβολικής διατομής

'Καταγραφή μακροεντολής 16/6/2007 από Μενέλαο Θεοχάρη

If Range("d6") = ";" Then

Range("a2").Cells = "Υπολογισμός του βάθους ροής αγωγού παραβολικής διατομής"

Range("d12").GoalSeek Goal:=0, Changing Cell:=Range("g24")

Range("g24").Select

Range("a13").Cells = "Ζητείται το βάθος ροής"

Range("a7").Cells = "Το πλάτος της ελεύθερης επιφάνειας"

Range("a8").Cells = "Η παροχή του αγωγού"

Range("a9").Cells = "Ο συντελεστής του Manning"

Range("a10").Cells = "Η κατά μήκος κλίση του αγωγού"

Range("a24").Cells = "Από την επίλυση της εξίσωσης (5) προκύπτει το βάθος ροής :"

Range("f24").Cells = "y ="

Range("h24").Cells = "m"

ElseIf Range("d7") = ";" Then

Range("a2").Cells = "Υπολογισμός του πλάτους της ελεύθερης επιφάνειας αγωγού παραβολικής διατομής"

Range("d12").GoalSeek Goal:=0, Changing Cell:=Range("g24")

Range("g24").Select

Range("a13").Cells = "Ζητείται το πλάτος της ελεύθερης επιφάνειας"

Range("a24").Cells = "Από την επίλυση της εξίσωσης (5) προκύπτει το πλάτος της ελεύθερης επιφάνειας :"

Range("f24").Cells = "b ="

Range("h24").Cells = "m"

ElseIf Range("d8") = ";" Then

Range("a2").Cells = "Υπολογισμός της παροχής αγωγού παραβολικής διατομής"

Range("d12").GoalSeek Goal:=0, Changing Cell:=Range("g24")

Range("g24").Select

Range("a13").Cells = "Ζητείται η παροχή του αγωγού"

Range("a24").Cells = "Από την επίλυση της εξίσωσης (5) προκύπτει η παροχή του αγωγού:"

Range("f24").Cells = "Q ="

Range("h24").Cells = "m³/s"

ElseIf Range("d9") = ";" Then

Range("a2").Cells = "Υπολογισμός του συντελεστή του Manning αγωγού παραβολικής διατομής"

Range("d12").GoalSeek Goal:=0, Changing Cell:=Range("g24")

Range("g24").Select

Range("a13").Cells = "Ζητείται ο συντελεστής του Manning"

Range("a24").Cells = "Από την επίλυση της εξίσωσης (5) προκύπτει ο συντελεστής του Manning :"

Range("f24").Cells = "n ="

Range("h24").Cells = ""

```
ElseIf Range("d10") = ";" Then  
Range("a2").Cells = "Υπολογισμός της κατά μήκος κλίσης αγωγού παραβολικής  
διατομής"  
Range("d12").GoalSeek Goal:=0, Changing Cell:=Range("g24")  
Range("g24").Select  
Range("a13").Cells = "Ζητείται η κατά μήκος κλίση του αγωγού"  
Range("a24").Cells = "Από την επίλυση της εξίσωσης (5) προκύπτει η κατά μήκος  
κλίση του αγωγού :"  
Range("f24").Cells = " J ="  
Range("h24").Cells = ""  
Else  
Range("g24").Cells = "1000"  
End If  
End Sub
```

Στη συνέχεια πατώντας το πλήκτρο “Λύση” προκύπτει η λύση του προβλήματος. . Στο σχήμα 3 φαίνεται η όλη διαδικασία για την περίπτωση υπολογισμού του βάθους ροής.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι συνηθέστεροι τρόποι υπολογισμού της μόνιμης ομοιόμορφης ροής σε ανοικτούς αγωγούς βασίζονται στον τύπο του Chezy και προτάθηκαν από τους Darcy-Weisbach, τον Manning, τον Bazin, τους Kutter-Ganguillet, τον Kutter και τον Powell. Από αυτούς επικρατέστερος είναι ο υπολογισμός με την εξίσωση του R. Manning.

Στην περίπτωση των κυκλικών και παραβολικών αγωγών οι μεταβλητές του προβλήματος είναι το μέσο βάθος ροής, y , η παροχή του αγωγού, Q , ο συντελεστής του Manning, n , και η κατά μήκος κλίση του αγωγού, J . Επιπλέον, για μεν την κυκλική διατομή είναι και η διάμετρος του αγωγού, D , για δε για την παραβολική διατομή είναι και το πλάτος της ελεύθερης επιφάνειας, b .

Η δυσκολία στην επίλυση των προβλημάτων οφείλεται στο ότι η εξίσωση του Manning είναι πεπλεγμένη συνάρτηση των γεωμετρικών στοιχείων της διατομής με αποτέλεσμα η επίλυσή της να απαιτεί πολλές και κοπιαστικές πράξεις με συνέπεια να είναι αναπόφευκτη η χρήση H/Y .

Τα προγράμματα επίλυσης των προβλημάτων ροής, που αναπτύχθηκαν στην παρούσα μελέτη, είναι απλά στη χρήση, δεν απαιτούν εξειδικευμένες γνώσεις πληροφορικής, είναι προσιτά σε ευρύ φάσμα ερευνητών και να μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην καθημερινή πράξη. Επίσης μπορούν να ενσωματωθούν ως υπορουτίνες σε άλλα λογισμικά πακέτα υπολογισμών υδραυλικών δικτύων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Τερζίδης, Γ., 1982. *Μαθήματα Υδραυλικής, 3. Ανοικτοί Αγωγοί*, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
2. Θεοχάρης, Μ., 2007. Μόνιμη ομοιόμορφη ροή σε ανοικτούς αγωγούς τραπεζοειδούς διατομής, *Πρακτ. 5ου Πανελλ. Συν. Γεωργ. Μηχαν.*, Λάρισα 18-20 Οκτ. 2007.
3. Ξανθουλέας, Α. Σ., 1985. *Πίνακες υπολογισμού ομοιόμορφης ροής σε αγωγούς ελεύθερης ροής*, Τεχνικά Χρονικά, Τεύχη 10-12/1985, Αθήνα.
4. Δημητρακόπουλος, Α. Κ., και Χατζηθεοδώρου, Χ., 1992. *Στοιχεία Υδραυλικής*, Εκδόσεις Παν/μίου Πατρών, Πάτρα.
5. Αργυρόπουλος, Π. Α., 1962. *Θεωρητική και Εφαρμοσμένη Υδραυλική*, Οίκος Τεχνικών Εκδόσεων Αφων Ι. Λιόντη, Πειραιεύς.

6. Manning, R., 1890. *Flow of water in open channels and pipes*, Trans. Inst. of Civil Eng. of Ireland, Vol. 20.
7. Bazin, H., 1869. *Etude d'une nouvelle formule pour calculer le débit des canaux déversés*, Mémoire No 41, Annales des ponts et chaussées, Vol. 14.
8. Ganguillet, E. and Kutter, W. R., 1869. *Versuch zur Aufstellung einer neuen allgemeinen Formel für die gleichförmige Bewegung des Wassers in Kanälen und Flüssen*, Zeitschrift des Österreichischen Ingenieur – und Architekten Vereines, Vol. 21, No 1,2,3, Vienna
9. Powell, R. W., and Posey, C. J., 1959. *Resistance Experiments in a Triangular Channel*, Proc. ASCE, Hydraulics Division, May 1959, p. 45.

(192)

ΤΕΧΝΗΤΗ ΕΠΑΝΑΠΛΗΡΩΣΗ ΦΡΕΑΤΙΚΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ ΜΕ ΦΡΕΑΤΙΑ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΠΑΡΟΧΗΣ

Δ.Ν. Καραμούζης και Π.Ε. Γεωργίου*

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Γεωπονική Σχολή, 54124 Θεσσαλονίκη

*e-mail: pantaz@agro.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή μελετάται η διαδικασία της τεχνητής επαναπλήρωσης των ελεύθερων ή φρεατικών υδροφορέων με επιφανειακά νερά μέσα από ειδικά κατασκευασμένα φρεάτια επαναπλήρωσης, στα οποία παροχετεύεται μια σταθερή παροχή. Με τη σχέση κίνησης των υπόγειων νερών στους φρεατικούς υδροφορείς σε ένα κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων, την αρχική και τις οριακές συνθήκες γίνεται η εξαγωγή των αναλυτικών λύσεων για την επαναπλήρωση στους υδροφορείς αυτούς με φρεάτια, καθώς και με συστάδα υδρογεωτρήσεων ώστε να καταστεί δυνατή η βιώσιμη διαχείριση των υδροφορέων. Επιπρόσθετα, δίνονται διάφορες εφαρμογές στις περιπτώσεις αυτές και υπολογίζονται οι απαιτούμενοι χρόνοι για δεδομένες πιεζομετρικές ανόδους στα διάφορα προβλήματα επαναπλήρωσης.

GROUNDWATER ARTIFICIAL RECHARGE IN FREATIC AQUIFERS WITH CONSTANT RECHARGE

D.N. Karamouzis and P.E. Georgiou*

Aristotle University of Thessaloniki, Faculty of Agriculture, 54124 Thessaloniki

*e-mail: pantaz@agro.auth.gr

ABSTRACT

In this paper the process of groundwater artificial recharge of freatic aquifers with surface water through a well with constant recharge is studied. Based on the equation of groundwater flow in a cylindrical coordinate system, on the initial and the boundary conditions, analytical solutions are obtained for the recharge of these aquifers, using a single well or a cluster of wells, thus contributing to sustainable management of aquifers. Furthermore, specific numerical examples for each case are given and the time required for specific piezometric head elevation is calculated.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ένα υδροφόρο στρώμα λέγεται ελεύθερος ή φρεατικός υδροφορέας, αν επικάθεται πάνω σε αδιαπέρατο υπόστρωμα και το υπόγειο νερό του σχηματίζει ελεύθερη υπόγεια στάθμη, κάτω από ατμοσφαιρική πίεση, η οποία αποτελεί την πάνω επιφάνεια της ζώνης κορεσμού. Η υπόγεια στάθμη σ' έναν ελεύθερο υδροφορέα μπορεί να είναι οριζόντια ή να έχει μία κλίση ως προς το οριζόντιο επίπεδο σε περιοχές όπου γίνεται άντληση ή λαμβάνει χώρα εισροή ή εκροή. Οι υδρογεωλογικές σταθερές ή παράμετροι που χαρακτηρίζουν έναν ελεύθερο υδροφορέα είναι ο συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητάς του K , ο οποίος έχει διαστάσεις ταχύτητας [LT^{-1}] και η ειδική απόδοσή του σε νερό S_y , η οποία είναι αδιάστατη και έχει τάξη μεγέθους 10^{-1} ως 10^{-2} .

Όπως αποδείχθηκε [1] από τη γενική μερική διαφορική εξίσωση εξάγεται η γενική σχέση κίνησης των υπόγειων νερών που ισχύει για όλα τα είδη υδροφορέων σε ένα κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων. Η σχέση αυτή σε ελεύθερους ή φρεατικούς υδροφορείς, με τις παραδοχές της αξονικής συμμετρίας, της μικρής κλίσης του πιεζομετρικού φορτίου, της μηδενικής εισόδου από άρδευση ή βροχόπτωση, του σταθερού K και με τη βοήθεια του νόμου του Darcy, γίνεται:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(rh \frac{\partial h}{\partial r} \right) = \frac{S_y}{K} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

η οποία μπορεί να γραφεί

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial h^2}{\partial r} \right) = \frac{S_y}{KB} \frac{\partial h^2}{\partial t} \quad (2)$$

όπου B είναι ένα μέσο πάχος του υδροφορέα στο οποίο λαμβάνει χώρα η υπόγεια ροή.

Στην εξίσωση αυτή, r, t είναι η αξονική και η χρονική συντεταγμένη αντίστοιχα και h είναι το πιεζομετρικό φορτίο ή φορτίο του υπόγειου νερού. Το πρόβλημα της τεχνητής επαναπλήρωσης των υπόγειων νερών ή του τεχνητού εμπλουτισμού των υδροφορέων έχει πολύ μεγάλη οικονομική και περιβαλλοντική σημασία και έχουν ασχοληθεί εκτεταμένα πολλοί ερευνητές [2,3,4]. Η εφαρμογή της επαναπλήρωσης μπορεί να γίνει είτε σε ειδικά διαμορφωμένο σύστημα λεκανών κατάκλυσης, είτε σε ειδικά διανοιγμένα φρεάτια επαναπλήρωσης.

2. ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΚΑΙ ΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Στη συνέχεια της παραγράφου αυτής λύνεται το πρόβλημα της επαναπλήρωσης των φρεατικών υδροφορέων, χρησιμοποιώντας φρεάτια επαναπλήρωσης. Υποθέτουμε ένα φρεάτιο επαναπλήρωσης, που διαπερνά ολόκληρο το πάχος του υδροφορέα, ο οποίος είναι μεγάλης οριζόντιας έκτασης ($r \rightarrow \infty$), εδράζεται σε ένα οριζόντιο αδιαπέρατο υπόστρωμα και ότι στην αρχή η ελεύθερη υπόγεια στάθμη του νερού είναι οριζόντια. Το υδροφόρο στρώμα θεωρείται ότι είναι ομογενές και ισότροπο με σταθερές την υδραυλική αγωγιμότητα K και το συντελεστή ειδικής απόδοσης του υδροφορέα S_y . Το υπόγειο νερό μέσα στο υδροφόρο στρώμα βρίσκεται αρχικά κάτω από ένα σταθερό πιεζομετρικό φορτίο h_0 . Σε κάποια χρονική στιγμή μπαίνει σε λειτουργία η αντλία τροφοδοσίας του φρεατίου. Παραδεχόμαστε ότι αμέσως με τη λειτουργία της αντλίας αρχίζει και η κίνηση του νερού από το φρεάτιο προς τον υδροφορέα, η οποία είναι ακτινική και ασταθής ή μη μόνιμη.

Για καθαρά τεχνικούς λόγους, η τροφοδοσία του φρεατίου επαναπλήρωσης γίνεται με μια σταθερή παροχή Q_0 . Η τιμή της παροχής αυτής πρέπει, σε όλη τη διάρκεια της διενέργειας της επαναπλήρωσης, να είναι τέτοια ώστε να εξασφαλιστεί η ικανοποιητική τροφοδοσία και η μη υπερβολική άνοδος του νερού στο φρεάτιο επαναπλήρωσης. Έτσι,

θα αποφευχθεί η απώλεια νερού, η οποία λαμβάνει χώρα σ' αυτές τις περιπτώσεις, καθώς το νερό πολλές φορές ξεχειλίζει από το φρεάτιο και πλημμυρίζει την γύρω επιφάνεια του εδάφους.

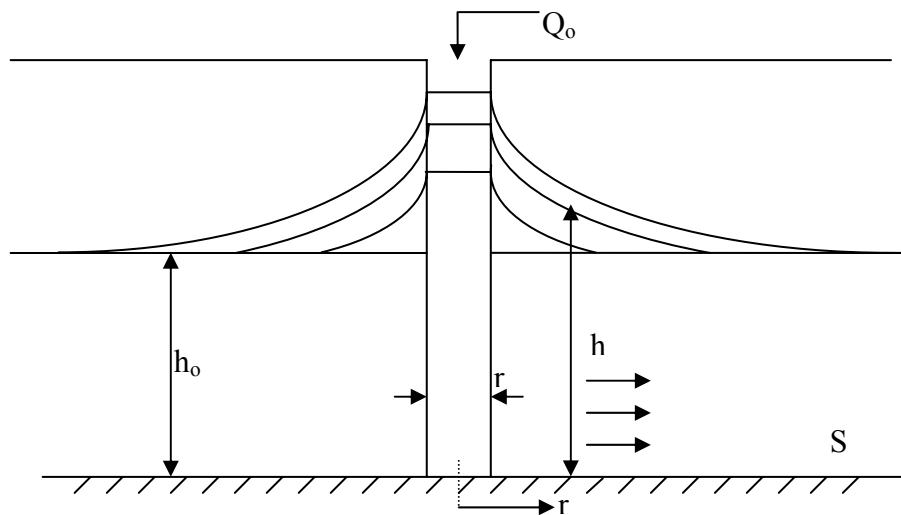
Το φυσικό αυτό πρόβλημα, με τη βοήθεια και του Σχήματος 1 περιγράφεται μαθηματικά από τη διαφορική εξίσωση (1) μία αρχική και δύο οριακές συνθήκες, οι οποίες είναι [5]:

$$h(r,0) = h_0 \quad \text{για } t=0 \quad (3)$$

$$\lim_{r \rightarrow \infty} [h(r,t)] = h_0, \text{ για } t > 0 \quad (4)$$

και

$$\lim_{r \rightarrow r_w} \left(r h \frac{dh}{dr} \right) = -\frac{Q_0}{2\pi K} \quad (5)$$



Σχήμα 1. Επαναπλήρωση φρεατικού υδροφορέα σε φρεάτιο με σταθερή παροχή.

Εισάγοντας τις αδιάστατες μεταβλητές:

$$H(R, \tau) = \frac{h^2(r,t)}{h_0^2}, \quad R = \frac{r}{h_0}, \quad \tau = \frac{KBt}{S_y h_0^2} \quad (6\alpha, \beta, \gamma)$$

το πρόβλημα των εξισώσεων (2), (3), (4) και (5) γράφεται:

$$\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(R \frac{\partial H}{\partial R} \right) = \frac{\partial H}{\partial \tau} \quad (7)$$

$$H(R,0) = 1 \quad (8)$$

$$H(\infty, \tau) = 1 \quad (9)$$

$$\lim_{R \rightarrow 1} \left(R \frac{\partial H}{\partial R} \right) = -\frac{Q_0}{2\pi K h_0^2} \quad (10)$$

Η λύση του προβλήματος αυτού είναι:

$$H(R, \tau) = 1 + \frac{Q_o}{2\pi K h_0^2} W(u) \quad (11)$$

η οποία με αντικατάσταση της σχέσης (6α) γίνεται:

$$h^2(r, t) = h_0^2 + \frac{Q_o}{2\pi K} W(u) \quad (12)$$

Στην σχέση αυτή $u(R, \tau) = u(r, t)$ είναι η μεταβλητή ομοιότητας, η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$u = \frac{r^2 S_y}{4KBt} = \frac{R^2}{4\tau} \quad (13)$$

όπου $W(u)$ είναι η συνάρτηση φρεατίου του Theis, η οποία είναι γνωστή [6,7,8].

Όταν είναι $u < 0.01$, δηλαδή σε μια σχετικά μικρή απόσταση από την υδρογεώτρηση και για μεγάλους χρόνους, η συνάρτηση $W(u)$ προσεγγίζεται μόνο από τους δύο πρώτους όρους της, οπότε με την εκτέλεση των απαραίτητων πράξεων η λύση (12) γίνεται:

$$h^2(r, t) = h_0^2 + \frac{2.3Q_o}{2\pi K} \log \frac{2.25KBt}{r^2 S_y} \quad (14)$$

Η σχέση (14) χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της τιμής του πιεζομετρικού φορτίου $h(r, t)$ σε μια απόσταση r από το φρεάτιο επαναπλήρωσης, σε ένα χρόνο t , μετά την έναρξη της διαδικασίας επαναπλήρωσης, για μεγάλους χρόνους, ώστε να ικανοποιείται η συνθήκη $u < 0.01$.

3. ΕΠΑΝΑΠΛΗΡΩΣΗ ΣΕ ΣΥΣΤΑΔΑ ΥΔΡΟΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ

Εισάγοντας στη λύση (14) την πιεζομετρική άνοδο, η οποία ορίζεται από τη σχέση: $s(r, t) = h(r, t) - h_0$, λαμβάνεται:

$$s(r, t) = \frac{Q_o}{2\pi K(h + h_0)} \ln \frac{2.25KBt}{r^2 S_y} \quad (15)$$

Η σχέση (15) συνεχίζει να είναι μη γραμμική εξαιτίας του πιεζομετρικού φορτίου h που υπάρχει στον παρονομαστή του δεξιού μέλους της. Εισάγοντας στη θέση του ένα μέσο φορτίο $\bar{h} = B$, η παραπάνω σχέση γραμμικοποιείται και γράφεται:

$$s(r, t) = \frac{Q_o}{2\pi K(B + h_0)} \ln \frac{2.25KBt}{r^2 S_y} \quad (16)$$

Λύνοντας ως προς t την παραπάνω σχέση παίρνεται:

$$t = \frac{r^2 S_y}{2.25KB} \exp \left[\frac{2\pi K}{Q_o} (B + h_0) s_\tau \right] \quad (17)$$

Η σχέση (17) δίνει το χρόνο επαναπλήρωσης όταν χρησιμοποιείται μόνο ένα φρεάτιο επαναπλήρωσης.

Στην περίπτωση που η επαναπλήρωση γίνεται σε N φρεάτια, τα οποία απέχουν από ένα σημείο P αποστάσεις $r_1, r_2, r_3, \dots, r_N$, με τη βοήθεια της σχέσης (16) προκύπτει ότι η συνολική πιεζομετρική άνοδος είναι: $s_\tau = s_1 + s_2 + s_3 + \dots + s_N$ οπότε, με αντικατάσταση των αντίστοιχων επιμέρους λύσεων της μορφής (16), μπορεί να γραφεί:

$$s_\tau = \frac{NQ_o}{2\pi K(B + h_0)} \ln \frac{2.25KBt/S_y}{\sqrt{r_1^2 \cdot r_2^2 \cdot \dots \cdot r_N^2}} \quad (18)$$

Η σχέση αυτή δίνει την πιεζομετρική άνοδο όταν η επαναπλήρωση γίνεται ταυτόχρονα σε N φρεάτια. Λύνοντάς την ως προς το χρόνο t λαμβάνεται:

$$t = \frac{\sqrt[3]{r_1^2 \cdot r_2^2 \cdot \dots \cdot r_N^2}}{2.25KB/S_y} \exp \frac{2\pi K(B+h_0)}{NQ_0} s_\tau \quad (19)$$

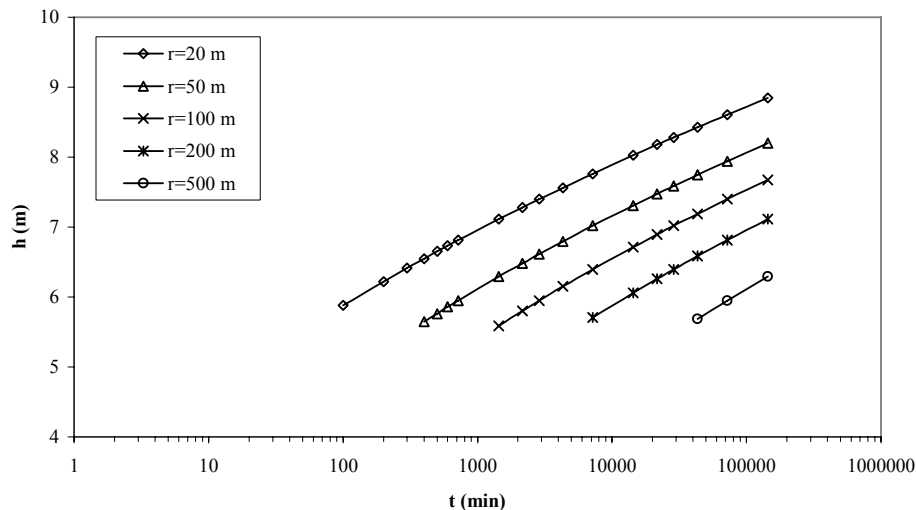
Η σχέση αυτή δίνει το χρόνο στον οποίο πρέπει να λάβει χώρα η επαναπλήρωση της συστάδας των υδρογεωτρήσεων, όταν εφαρμόζεται μια σταθερή παροχή Q_0 σε κάθε φρεάτιο. Όταν στην περιοχή υπάρχει ένα μόνο φρεάτιο επαναπλήρωσης θα είναι $N=1$, οπότε η σχέση (19) δίνει τη σχέση (17). Υπενθυμίζεται ότι σε όλες τις παραπάνω σχέσεις αυτής της παραγράφου είναι $B = \bar{h} = h$.

4. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

4.1. Πιεζομετρική άνοδος από επαναπλήρωση σε φρεάτια

Ας θεωρηθεί ότι η επαναπλήρωση ενός φρεατικού υδροφορέα γίνεται για καθαρά τεχνικούς λόγους με σταθερή παροχή $Q_0=3600 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$ και το αρχικό πιεζομετρικό φορτίο είναι $h_0=5.5 \text{ m}$. Να υπολογιστεί το πιεζομετρικό φορτίο h σε πέντε διαφορετικές αποστάσεις $r_1=20 \text{ m}$, $r_2=50 \text{ m}$, $r_3=100 \text{ m}$, $r_4=200 \text{ m}$ και $r_5=500 \text{ m}$ και για χρόνους επαναπλήρωσης 20, 30, 100, 200, 300, 400, 500 και 600 λεπτών και 0.5, 1, 1.5, 2, 3, 5, 10 20, 30, 50 και 100 ημερών.

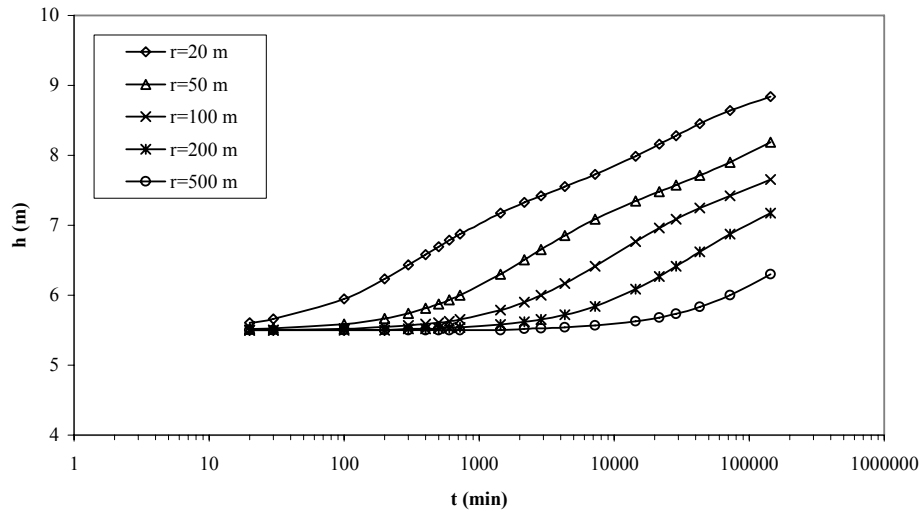
Για μικρές τιμές της απόστασης από την υδρογεώτρηση επαναπλήρωσης και για μεγάλες τιμές του χρόνου t , κατά τους οποίους ικανοποιείται η ανισότητα $u < 0.01$, ισχύει η λύση (14). Εισάγοντας τις τιμές $h_0=5.5 \text{ m}$, $Q_0=3600 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$, $K=95.17 \text{ m}/\text{ημέρα}$, $S_y=0.1$ και $B=5.5 \text{ m}$ στη σχέση (14) υπολογίζεται το πιεζομετρικό φορτίο σε διαφορετικές αποστάσεις από το φρεάτιο επαναπλήρωσης σταθερής παροχής. Στο Σχήμα 2 φαίνεται η μεταβολή του πιεζομετρικού φορτίου με το χρόνο αυτού του προβλήματος.



Σχήμα 2. Μεταβολή πιεζομετρικού φορτίου με το χρόνο για διαφορετικές αποστάσεις από φρεάτιο σταθερής παροχής με εφαρμογή της σχέσης (14).

Στη συνέχεια υπολογίζεται το πιεζομετρικό φορτίο χρησιμοποιώντας τη σχέση (12), όπου $u(r,t)$ ορίζεται με τη σχέση (13) και $W(u)$ είναι η συνάρτηση του Theis, η τιμή της οποίας λαμβάνεται από πίνακες για κάθε τιμή της μεταβλητής u . Εισάγοντας τις τιμές $h_0=5.5 \text{ m}$, $Q_0=3600 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$, $K=95.17 \text{ m}/\text{ημέρα}$ και της συνάρτησης $W(u)$,

υπολογίζεται το πιεζομετρικό φορτίο σε διαφορετικές αποστάσεις από το φρεάτιο επαναπλήρωσης σταθερής παροχής. Στο Σχήμα 3 φαίνεται η μεταβολή του πιεζομετρικού φορτίου με το χρόνο για διαφορετικές αποστάσεις από φρεάτιο σταθερής παροχής.



Σχήμα 3. Μεταβολή πιεζομετρικού φορτίου με το χρόνο για διαφορετικές αποστάσεις από φρεάτιο σταθερής παροχής με εφαρμογή της σχέσης (12).

Συμπερασματικά μπορεί να λεχθεί ότι η σχέση (14) όσον αφορά την επαναπλήρωση ενός φρεατικού υδροφορέα, μεγάλης οριζόντιας έκτασης, ομογενούς και ισότροπου, διατηρώντας σταθερή την παροχή επαναπλήρωσης στο φρεάτιο, μπορεί να εφαρμοσθεί για μικρές αποστάσεις από τη γεώτρηση και για μεγάλους χρόνους γιατί πρέπει να ισχύει ο περιορισμός $u < 0.01$, ενώ η σχέση (12) μπορεί να εφαρμοσθεί χωρίς περιορισμούς, αλλά για να υπάρχουν αποτελέσματα πρέπει στις μεγάλες αποστάσεις από τη γεώτρηση να εφαρμόζονται μεγάλοι χρόνοι επαναπλήρωσης.

4.2. Πιεζομετρική άνοδος από επαναπλήρωση σε συστάδα υδρογεωτρήσεων

Στην εφαρμογή αυτή υπολογίζεται ο χρόνος όταν η επαναπλήρωση εφαρμόζεται σε μια συστάδα υδρογεωτρήσεων με σταθερή παροχή. Το υδροφόρο στρώμα θεωρείται το ίδιο, δηλαδή είναι ένας φρεατικός υδροφορέας υδραυλικής αγωγιμότητας $K=95.17$ m/ημέρα, ειδικής απόδοσης σε νερό $S_y=0.1$ και μεγάλης οριζόντιας έκτασης. Η επαναπλήρωση γίνεται και πάλι με σταθερή παροχή $Q_o=3600$ m³/ημέρα και η ακτίνα των φρεατίων είναι $r_w=0.15$ m. Θεωρείται ότι το αρχικό πιεζομετρικό φορτίο είναι $h_o=5.5$ m και σε κάποιο χρόνο t η συνολική πιεζομετρική άνοδος είναι $s_t=4$ m. Επίσης, υπολογίζεται ο χρόνος που απαιτείται για άνοδο $s_t=2$ m και επιπλέον υπολογίζεται ο χρόνος για $s_t=1.5$ m στην περίπτωση των δύο υδρογεωτρήσεων επαναπλήρωσης.

Από τη σχέση (19) υπολογίζεται ο χρόνος στον οποίο πρέπει να λάβει χώρα η επαναπλήρωση της συστάδας των υδρογεωτρήσεων.

Εισάγοντας λοιπόν τις τιμές $h_o=5.5$ m, $Q_o=3600$ m³/ημέρα, $K=95.17$ m/ημέρα, $S_y=0.1$ και $B=h+(s_t/2)$ στη σχέση (19) υπολογίζεται ο χρόνος επαναπλήρωσης στις εξής περιπτώσεις:

I. Περίπτωση δύο φρεατίων

Όταν τα φρεάτια ισαπέχουν από ένα σημείο P απόσταση $r=r_1=r_2$, ο χρόνος επαναπλήρωσης θα είναι:

$$t = \frac{r^2}{2.25KB/S_y} \exp \frac{2\pi K(B+h_0)}{2Q_0} s_\tau \quad (20)$$

Από την εξίσωση αυτή, εισάγοντας τα δεδομένα του υδροφορέα και για $r_1=r_2=125$ m, δίνει: $t=73.06$ ημέρες για $s_\tau=4$ m, $t=8.24$ ημέρες για $s_\tau=2$ m και $t=5.05$ ημέρες για $s_\tau=1.5$ m.

II. Περίπτωση τριών φρεατίων

Όταν τα φρεάτια απέχουν από ένα σημείο P αποστάσεις r_1 , r_2 και r_3 , η σχέση που δίνει το χρόνο επαναπλήρωσης θα είναι:

$$t = \frac{\sqrt[3]{r_1^2 \cdot r_2^2 \cdot r_3^2}}{2.25KB/S_y} \exp \frac{2\pi K(B+h_0)}{3Q_0} s_\tau \quad (21)$$

και για $r_1=r_2=r_3=r = \alpha\sqrt{3}/3$ η σχέση (21) γίνεται:

$$t = \frac{r^2}{2.25KB/S_y} \exp \frac{2\pi K(B+h_0)}{3Q_0} s_\tau \quad (22)$$

όπου α είναι η πλευρά του ισόπλευρου τριγώνου.

Για $\alpha=120$ m, $r=r_1=r_2=r_3=69.28$, οπότε μετά την εκτέλεση των πράξεων δίνει: $t=5.32$ ημέρες για $s_\tau=4$ m και $t=1.30$ ημέρες για $s_\tau=2$ m.

Όταν τα φρεάτια απέχουν από ένα σημείο P αποστάσεις $r_1=110$ m, $r_2=120$ m και $r_3=145$ m, ο χρόνος επαναπλήρωσης από τη σχέση (21) μετά την εκτέλεση των πράξεων θα είναι: $t=17.08$ ημέρες για $s_\tau=4$ m και $t=4.18$ ημέρες για $s_\tau=2$ m.

III. Περίπτωση τεσσάρων φρεατίων

Όταν τα φρεάτια σχηματίζουν μια τετραγωνική διάταξη πλευράς α θα ισαπέχουν από ένα σημείο P αποστάσεις $r=r_1=r_2=r_3=r_4=\alpha\sqrt{2}/2$ και ο χρόνος επαναπλήρωσης από τη σχέση (19) θα είναι:

$$t = \frac{\sqrt[4]{r_1^2 \cdot r_2^2 \cdot r_3^2 \cdot r_4^2}}{2.25KB/S_y} \exp \frac{2\pi K(B+h_0)}{4Q_0} s_\tau \quad (23)$$

και για $r_1=r_2=r_3=r_4=r$ η σχέση:

$$t = \frac{r^2}{2.25KB/S_y} \exp \frac{2\pi K(B+h_0)}{4Q_0} s_\tau \quad (24)$$

Για $\alpha=148$ m θα είναι $r=r_1=r_2=r_3=r_4=104.65$, οπότε μετά την εκτέλεση των πράξεων δίνει: $t=5.91$ ημέρες για $s_\tau=4$ m και $t=2.13$ ημέρες για $s_\tau=2$ m.

Όταν τα φρεάτια σχηματίζουν ρομβική διάταξη πλευράς α , θα απέχουν από ένα σημείο P αποστάσεις $r_1=r_3=\alpha\sqrt{3}/2=161.08$ m και $r_2=r_4=\alpha/2=93$ m, για $\alpha=186$ m. Από τη σχέση (23) μετά την εκτέλεση των πράξεων, ο χρόνος επαναπλήρωσης θα είναι: $t=8.08$ ημέρες για $s_\tau=4$ m και $t=2.92$ ημέρες για $s_\tau=2$ m.

Όταν τα φρεάτια σχηματίζουν ένα τυχαίο τετράπλευρο και απέχουν από ένα σημείο P αποστάσεις $r_1=135$ m, $r_2=120$ m, $r_3=148$ m και $r_4=155$ m, ο χρόνος επαναπλήρωσης θα είναι: $t=10.40$ ημέρες για $s_\tau=4$ m και $t=3.75$ ημέρες για $s_\tau=2$ m.

Από τις παραπάνω εφαρμογές εύκολα συμπεραίνεται ότι οι εξισώσεις για την επαναπλήρωση ενός φρεατικού υδροφορέα με συστάδα φρεατίων, διατηρώντας σταθερή την παροχή, δίνουν καλά αποτελέσματα σε όλες τις περιπτώσεις.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή μελετήθηκε η διαδικασία της τεχνητής επαναπλήρωσης και διαχείρισης των ελεύθερων ή φρεατικών υδροφορέων. Έγινε εξαγωγή των αναλυτικών λύσεων για την επαναπλήρωση στους υδροφορείς αυτούς με φρεάτιο καθώς επίσης και με συστάδα υδρογεωτρήσεων. Εξετάστηκε η περίπτωση της επαναπλήρωσης ενός υδροφορέα διατηρώντας στο φρεάτιο σταθερή την παροχή. Η σχέση (14) όσον αφορά την επαναπλήρωση ενός φρεατικού υδροφορέα, μεγάλης οριζόντιας έκτασης, ομογενούς και ισότροπου, διατηρώντας σταθερή την παροχή επαναπλήρωσης στο φρεάτιο, μπορεί να εφαρμοσθεί για μικρές αποστάσεις από τη γεώτρηση και για μεγάλους χρόνους γιατί πρέπει να ισχύει ο περιορισμός $u < 0.01$, ενώ η σχέση (12) μπορεί να εφαρμοσθεί χωρίς περιορισμούς, αλλά για να υπάρχουν αποτελέσματα πρέπει στις μεγάλες αποστάσεις από τη γεώτρηση να εφαρμόζονται μεγάλοι χρόνοι επαναπλήρωσης. Οι εξισώσεις για την επαναπλήρωση ενός φρεατικού υδροφορέα με συστάδα φρεατίων, διατηρώντας σταθερή την παροχή, δίνουν καλά αποτελέσματα σε όλες τις περιπτώσεις.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Καραμούζης, Δ.Ν., 2003. *Υδραυλική υπογείων υδάτων 3. Διαφορικές εξισώσεις ροής υπόγειων υδάτων*. Εργαστήριο Γενικής και Γεωργικής Υδραυλικής και Βελτιώσεων, Γεωπονική Σχολή Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη.
2. Johnson, A.I. and Finlayson, D.J., 1989. Artificial recharge of groundwater. *Proc. of Int. Symp.*, ASCE, 644 p.
3. Pyne, D.R., 1995. *Groundwater recharge and wells. A guide to aquifer storage recovery*. Lewis Publishers. 376 p.
4. Καραμούζης, Δ.Ν. και Γεωργίου, Π.Ε., 2006. Αναλυτική προσέγγιση της τεχνητής επαναπλήρωσης κλειστού υπό πίεση υδροφόρου. *Πρακτικά 10^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου της ΕΥΕ*, Ξάνθη, 437-444.
5. Καραμούζης, Δ.Ν., 2007. *Υδραυλική υπογείων υδάτων. 9. Τεχνητή επαναπλήρωση υπόγειων νερών*. Εργαστήριο Γενικής και Γεωργικής Υδραυλικής και Βελτιώσεων, Γεωπονική Σχολή Α.Π.Θ., 127 σελ., Θεσσαλονίκη.
6. Hantush, M.S., 1964. *Hydraulics of wells*. In *Hydroscience*, vol. 1, Academic Press, New York.
7. Huisman, L. and Olsthoorn, T.N., 1983. *Artificial groundwater recharge*. Pitman Advanced Publishing Program. 320 p.
8. Τερζίδης, Γ.Α. και Καραμούζης, Δ.Ν., 1985. *Υδραυλική υπογείων νερών*. Εκδόσεις Ζήτη, 352 σελ., Θεσσαλονίκη.

(193)

ΣΧΕΔΙΟ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΗΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΥΔΡΟΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ Ν. ΚΑΛΥΜΝΟΥ

Δ. Κ. Καπούζος

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Γεωπονική Σχολή, Εργαστήριο Γενικής και Γεωργικής Υδραυλικής και Βελτιώσεων, 54124 Θεσ/νίκη, e-mail: dimkarp@agro.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται ένα σχέδιο ολοκληρωμένης διαχείρισης του υδροσυστήματος της ν. Καλύμνου. Εκτιμώνται οι υδρολογικές συνιστώσες και οι υδατικές απαιτήσεις και επιχειρείται η προσομοίωση του υδροσυστήματος μέσω εφαρμογής εξελιγμένων υπολογιστικών εργαλείων. Η απόκρισή του διερευνάται για διάφορες εναλλακτικές διαχειριστικές πολιτικές με ένα πλήθος στοχαστικών υδρολογικών σεναρίων. Τα αποτελέσματα της στοχαστικής και λειτουργικής προσομοίωσης προσδιόρισαν το εύρος και τη θέση των ελλειμμάτων και αστοχιών. Επίσης, ανέδειξαν την ανάγκη για ενιαία -σε επίπεδο νησιού- και ορθολογική διαχείριση των υδατικών πόρων των λεκανών απορροής.

AN INTEGRATED WATER RESOURCES SYSTEM MANAGEMENT PLAN: THE CASE OF KALYMNOS

D. K. Karpouzou

Aristotle University of Thessaloniki, School of Agriculture, Department of Hydraulics, Soil Science and Agricultural Engineering, 54124, Thessaloniki, dimkarp@agro.auth.gr

ABSTRACT

This paper presents an integrated water resources system management approach. In this context the case of Kalymnos island is investigated. At first, the hydrological components and water demands are analyzed. Then a stochastic and operational simulation of the hydrosystem is attempted. Especially, three water resources management policies are considered and the hydrosystem response is evaluated through a large number of stochastic forecast scenarios. The results of this stochastic and operational simulation determined the range and location of water deficits for each policy. Finally, it is concluded that in case of small islands, such as Kalymnos, there is a strong need of a combined water management policy of hydrologic basins.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

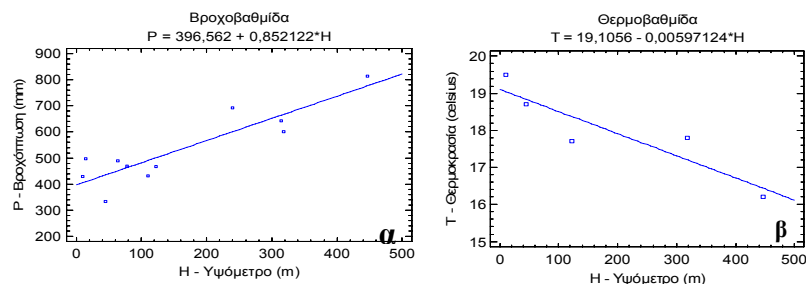
Η Κάλυμνος, είναι το τέταρτο σε έκταση νησί των Δωδεκανήσων με 110,50 km² και με συνολικό μήκος ακτών 104,59 km. Το μέγιστο μήκος είναι 14 km και το μέγιστο πλάτος 13 km. Οι συνεχώς αυξανόμενες υδατικές ανάγκες της νήσου οι οποίες εντείνονται κατά τη θερινή περίοδο κυρίως λόγω της τουριστικής κίνησης και της εφαρμογής των αρδεύσεων, αλλά και η μη συνδυασμένη και τοπικά εντατική εκμετάλλευση των υδατικών πόρων των λεκανών απορροής, δημιουργούν ένα εύθραυστο υδατικό ισοζύγιο προσφοράς και ζήτησης. Στην παρούσα εργασία, η οποία εντάσσεται στα πλαίσια υλοποίησης ερευνητικού προγράμματος χρηματοδοτούμενου από τη ΓΓΕΤ (Γ' ΚΠΣ Επιχειρησιακό Πρόγραμμα Ανταγωνιστικότητα), επιχειρείται η διερεύνηση ενός διαχειριστικού πλαισίου των υδατικών πόρων της νήσου μέσω εφαρμογής εξελιγμένων υπολογιστικών εργαλείων και μεθόδων σε επίπεδο λεκάνης απορροής και συνολικά.

2. ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΑ - ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Το κλίμα του νησιού χαρακτηρίζεται ως μεσογειακό υποτροπικό και ανήκει στη ζώνη της λεμονιάς H8Yw8a. Είναι γενικά θερμό την άνοιξη, το καλοκαίρι και το φθινόπωρο, με ήπιο χειμώνα. Ελλείπει μετεωρολογικών και υδρολογικών στοιχείων η παραγωγή ιστορικών χρονοσειρών βροχόπτωσης και θερμοκρασίας επιτεύχθηκε μέσω αξιοποίησης των μετρήσεων των μετεωρολογικών σταθμών γειτονικών της Καλύμνου νήσων.

2.1. Εκτίμηση επιφανειακής βροχόπτωσης και θερμοκρασίας

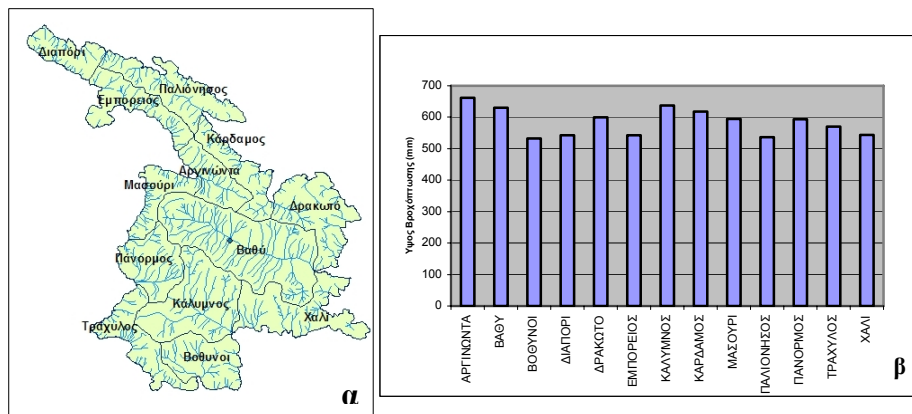
Για τον υπολογισμό της επιφανειακής βροχόπτωσης και θερμοκρασίας στην Κάλυμνο αρχικά προσδιορίστηκαν η βροχοβαθμίδα και θερμοβαθμίδα της ευρύτερης περιοχής. Για τη βροχοβαθμίδα, χρησιμοποιήθηκαν οι μετρήσεις 11 σταθμών για την κοινή περίοδο 1981-1993 που υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα. Οι σταθμοί αυτοί είναι οι εξής: Αστυπάλαια, Κάρπαθος, Κάσος, Κως-Κέφαλος-Ασφένδιο της Κω και Εμπώνας-Καταβιά-Λαέρμα της Ρόδου. Αντίστοιχα, για τον υπολογισμό της θερμοβαθμίδας για την ίδια κοινή περίοδο 1981-1993 ελήφθησαν υπόψη τα διαθέσιμα δεδομένα των σταθμών Αστυπάλαιας, Καρπάθου, Κω και Ρόδου (Εμπώνας και Λαέρμα). Η γραφική απεικόνιση καθώς και η εξίσωση της ευθείας της γραμμικής παλινδρόμησης μεταξύ των υψομέτρων και των υπερετήσιων υψών βροχής και θερμοκρασίας στους παραπάνω σταθμούς παρουσιάζονται στο *σχήμα 1*.



Σχήμα 1. Γραμμική παλινδρόμηση (α) βροχόπτωσης και υψομέτρου και (β) θερμοκρασίας και υψομέτρου

Η γραμμική συσχέτιση που προέκυψε τόσο μεταξύ υψομέτρου και βροχόπτωσης όσο και μεταξύ υψομέτρου και θερμοκρασίας είναι στατιστικά σημαντική καθώς ο

συντελεστής συσχέτισης $|R|$ είναι 0,89 και 0,91 αντίστοιχα. Η επιφανειακή βροχόπτωση και θερμοκρασία σε κάθε μία από τις 13 λεκάνες απορροής (σχήμα 2α) υπολογίσθηκαν με χρήση των παραπάνω τιμών βροχοβαθμίδας-θερμοβαθμίδας και των αντίστοιχων παράγωγων συντελεστών υψομετρικής αναγωγής με σταθμό αναφοράς την Κω. Οι χρονοσειρές βροχόπτωσης και θερμοκρασίας (1981-1993) που παρήχθησαν για κάθε λεκάνη και συνολικά για τη Κάλυμνο επεκτάθηκαν μέχρι και το 2001, έτος μέχρι το οποίο ήταν διαθέσιμα τα δεδομένα βροχόπτωσης και θερμοκρασίας για το σταθμό αναφοράς της Κω. Η μέση ετήσια βροχόπτωση της περιόδου 1981-2001 ανά λεκάνη απορροής παρουσιάζεται στο σχήμα 2β.



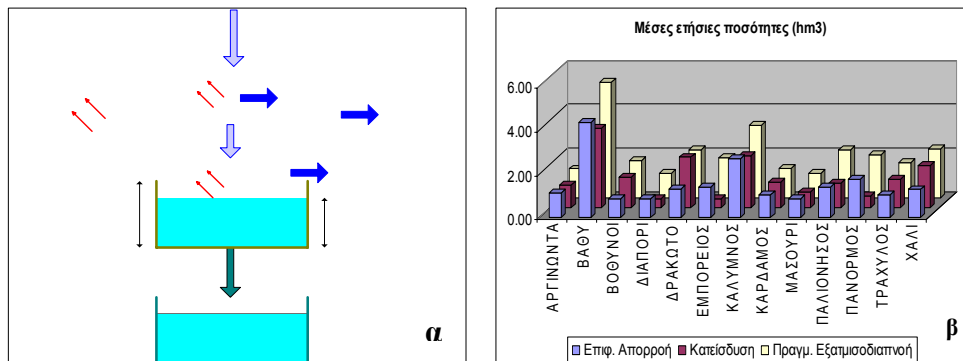
Σχήμα 2. (α) Λεκάνες απορροής ν. Κάλυμνου (επεξεργασία από πηγή [10]) και (β) μέση ετήσια βροχόπτωση ανά λεκάνη απορροής για την περίοδο 1981-2001

2.2 Υδρολογικό ισοζύγιο

Η προσομοίωση των υδρολογικών διεργασιών της κάθε λεκάνης της νήσου η οποία αποσκοπεί στον επιμερισμό της βροχόπτωσης σε απορροή, κατείσδυση και απώλειες λόγω εξατμοδιαπνοής υλοποιήθηκε μέσω εφαρμογής του εννοιολογικού μοντέλου ισοζυγίου εδαφικής υγρασίας «Ζυγός» που αποτελεί μια τροποποιημένη έκδοση του μοντέλου Thornthwaite-Mather. Ως δεδομένα του μοντέλου εισήχθησαν οι 14 παραχθείσες ιστορικές χρονοσειρές βροχόπτωσης (1981-2001) καθώς και οι 14 χρονοσειρές δυνητικής εξατμοδιαπνοής (1981-2001) οι οποίες υπολογίστηκαν με την μέθοδο Thornthwaite με χρήση των 14 χρονοσειρών θερμοκρασίας. Η υπολογιστική διαδικασία υλοποιήθηκε σε μηνιαίο βήμα. Η λειτουργική δομή του μοντέλου (σχήμα 3α) επιτρέπει την προσομοίωση των υδρολογικών διεργασιών μέσω ενός περιορισμένου αριθμού παραμέτρων. Οι τιμές των βασικών παραμέτρων του μοντέλου και συγκεκριμένα του ρυθμού εκφόρτισης μ της δεξαμενής εδαφικής υγρασίας για την παραγωγή κατείσδυσης, της χωρητικότητας της δεξαμενής εδαφικής υγρασίας K και του συντελεστή κ της άμεσης επιφανειακής απορροής ελήφθησαν βάσει των ταξινομημένων (σε κλάσεις) επεξεργασμένων στοιχείων της διαπερατότητας, της μηχανικής σύστασης του εδάφους, της χρήσης γης και της κλίσης του εδάφους, όπως προσδιορίστηκαν για την Κάλυμνο από το ΥΠΑΝ [10]. Η αρχική εκτίμηση της τιμής της εδαφικής υγρασίας θεωρήθηκε ίση με μηδέν με την αιτιολογία ότι η εκκίνηση της προσομοίωσης συμπίπτει με την έναρξη του υδρολογικού έτους.

Από την εφαρμογή του μοντέλου προέκυψαν 42 συνολικά χρονοσειρές επιφανειακής απορροής, πραγματικής εξατμοδιαπνοής και κατείσδυσης σε μηνιαία βάση για κάθε λεκάνη απορροής. Συνολικά για τη ν. Κάλυμνο, για την περίοδο 1981-2001 προέκυψε ότι η ενεργή βροχόπτωση (μετά από αφαίρεση των απωλειών της εξατμοδιαπνοής)

περίπου ισοκατανέμεται στις συνιστώσες της κατείσδυσης και επιφανειακής απορροής. Ο μέσος ετήσιος όγκος της κατείσδυσης ανέρχεται σε 18,3 hm³. Σε άλλες ερευνητικές εργασίες [4],[5],[7],[10] οι μέσες ετήσιες ποσότητες κατείσδυσης κυμαίνονται από 13,5 έως 22,4 hm³. Το μεγαλύτερο ποσοστό όμως των κατεισδυνόντων υδάτων διαφεύγει προς τη θάλασσα με ταχεία εκφόρτιση των καρστικών ασβεστόλιθων [1],[7],[10]. Οι μέσες ετήσιες ποσότητες κατείσδυσης, επιφανειακής απορροής και πραγματικής εξατμοδιαπνοής ανά λεκάνη απορροής παρουσιάζονται στο *σχήμα 3β*.



Σχήμα 3. (α) Λειτουργική δομή του μοντέλου υδρολογικού ισοζυγίου «Ζυγός» και (β) οι μέσες ετήσιες ποσότητες (σε hm³) που υπολογίστηκαν για την περίοδο 1981-2001.

3. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΑΝΑΓΚΩΝ

3.1. Υδρευτικές απαιτήσεις

Οι υδρευτικές ανάγκες εκτιμήθηκαν για την περίοδο 2001-2020 σε μηνιαία κλίμακα και αφορούν τον μόνιμο και εποχιακό πληθυσμό, τη βιομηχανία και την κτηνοτροφία σε επίπεδο λεκάνης απορροής. Το σύνολο των υδρευτικών απαιτήσεων βάσει των στοιχείων της Εθνικής Στατιστικής Υπηρεσίας (ΕΣΥΕ) εντοπίζεται στις λεκάνες Καλύμνου, Βαθέος, Πανόρμου, Αργινώντα, Εμπορείου και Βοθύνων.

3.1.1 Μόνιμος – Εποχιακός Πληθυσμός

Η εκτίμηση της εξέλιξης του μόνιμου πληθυσμού στη ν. Καλύμνο, έγινε με τη γεωμετρική μέθοδο για τα έτη 2001 έως 2020. Βάσει των στοιχείων των γεωγραφικών απογραφών της ΕΣΥΕ ο πληθυσμός για το 2001 ανέρχεται σε 16.235 κατοίκους και ο μέσος ετήσιος ρυθμός μεταβολής του πληθυσμού για τη δεκαετία 1991-2001 σε 0,33%. Ο ΜΕΡΜ για την περίοδο 2001-2020 θεωρήθηκε ίσος με 1% λόγω και της επικείμενης περιφερειακής ανάπτυξης της χώρας με την υλοποίηση των στόχων του Δ' ΚΠΣ. Με τις παραπάνω παραδοχές ο πληθυσμός της νήσου για το έτος 2020 υπολογίστηκε σε 19.614 κατοίκους και επιμερίστηκε στους οικισμούς σύμφωνα με την πληθυσμιακή κατανομή του νησιού από την ΕΣΥΕ για το έτος 2001.

Η εκτίμηση της εξέλιξης του εποχιακού πληθυσμού βασίστηκε στις καταγεγραμμένες διανυκτερεύσεις από τον ΕΟΤ [1] οι οποίες επαυξήθηκαν κατά 50% για να συμπεριλάβουν το σημαντικό ποσοστό επισκεπτών που διαμένει σε μη καταγεγραμμένα από τον ΕΟΤ καταλύματα. Ο ΜΕΡΜ για την περίοδο 2001-2020 θεωρήθηκε ίσος με 5% προκειμένου να αποτυπωθεί η συνεχώς αυξανόμενη τουριστική κίνηση που παρουσιάζει το νησί. Από τις εκτιμήσεις αυτές ο αριθμός των διανυκτερεύσεων για το έτος 2020 ανέρχεται σε 257.506 και επιμερίζεται με αλγόριθμο γεωγραφικής κατανομής βάσει στοιχείων ΕΟΤ και τοπικών δεδομένων.

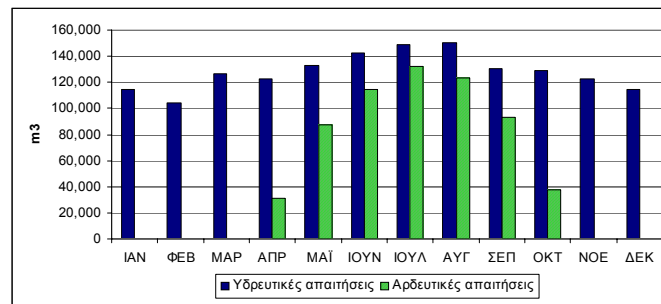
απορροής. Η μηνιαία κατανομή των διανυκτερεύσεων θεωρήθηκε ίση με τη μέση μηνιαία κατανομή των ετών 1995-1996 [3] όπου και υπήρχαν στοιχεία. Η μέση ημερήσια κατανάλωση (ΜΗΚ) για τον μόνιμο πληθυσμό θεωρήθηκε ίση με 150 λ/κατ/ημέρα και με εποχική μεταβολή +/- 10% για τους καλοκαιρινούς και χειμερινούς μήνες αντίστοιχα ενώ η ΜΗΚ για τον εποχιακό πληθυσμό λήφθηκε 165 λ/διαν/ημέρα και σταθερή. Η κατανάλωση νερού για δημοτικές χρήσεις εκτιμήθηκε ως το 10% των υδρευτικών αναγκών του μόνιμου πληθυσμού ενώ οι απώλειες νερού λήφθηκαν ως κυμαινόμενο ποσοστό των υδρευτικών αναγκών του μόνιμου και εποχιακού πληθυσμού και συγκεκριμένα 30% έως 23% για την περίοδο 2007-2020 με σταθερή ετήσια μείωση 0,5% καθώς έχουν αρχίσει σταδιακά να υλοποιούνται έργα εκσυγχρονισμού του δικτύου.

3.1.2 Βιομηχανία - Κτηνοτροφία

Οι απαιτήσεις σε νερό της βιομηχανίας επικεντρώνονται στη λεκάνη της Καλύμνου και είναι περιορισμένες καθώς πρόκειται κυρίως για οικογενειακές επιχειρήσεις [10]. Οι απαιτήσεις σε νερό της κτηνοτροφίας εκτιμήθηκαν βάσει της πληθυσμιακής απογραφής των ζώων [3] λαμβάνοντας ως ΜΗΚ ανά κατηγορία ζώου αυτές που προτείνονται από το Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων (ΥΠΑΑΤ). Η γεωγραφική κατανομή έγινε αναλογικά με την έκταση των λεκανών απορροής καθώς η κτηνοτροφία παρατηρείται διάσπαρτη στο νησί. Οι απαιτήσεις σε νερό της βιομηχανίας και της κτηνοτροφίας εκτιμήθηκαν σε 58.238 m³/έτος με μηνιαία ισοκατανομή ενώ δεν προβλέπεται αύξηση για τα επόμενα χρόνια.

Οι συνολικές υδρευτικές απαιτήσεις για το 2020 φαίνονται στο *σχήμα 4*.

3.2 Αρδευτικές απαιτήσεις



Σχήμα 4. Συνολικές υδρευτικές και αρδευτικές απαιτήσεις της ν. Καλύμνου για το έτος 2020

Από τα στοιχεία της ΕΣΥΕ για το έτος 2004 στο νησί αρδεύονται 1126 στρ., εκ των οποίων 850 στρ. με εσπεριδοειδή και 276 στρ. με κηπευτικά. Οι αρδεύόμενες εκτάσεις κατά είδος καλλιέργειας κατανεμήθηκαν σε επίπεδο λεκάνης απορροής μετά από επικοινωνία με τη Δ/ση Γεωργίας της Ν. Δωδεκανήσων και εντοπίζονται πρωτίστως στη λεκάνη του Βαθέος (87%) και δευτερευόντως στις λεκάνες του Πανόρμου (9%) και της Καλύμνου (4%). Οι αρδευτικές ανάγκες υπολογίστηκαν με την απλή μέθοδο Blaney-Criddle κατά λεκάνη απορροής λαμβάνοντας τις ιστορικές μέσες μηνιαίες τιμές θερμοκρασίας-βροχόπτωσης και τους μηνιαίους φυτικούς συντελεστές για παραθαλάσσιες περιοχές για τα δυο είδη των καλλιεργειών [6]. Οι απώλειες δικτύου θεωρήθηκαν ίσες με 10% κατά τη διανομή και 10% κατά την εφαρμογή του νερού στο χωράφι. Οι συνολικές αρδευτικές απαιτήσεις για το 2020 φαίνονται στο *σχήμα 4*.

4. ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ - ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΔΡΟΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

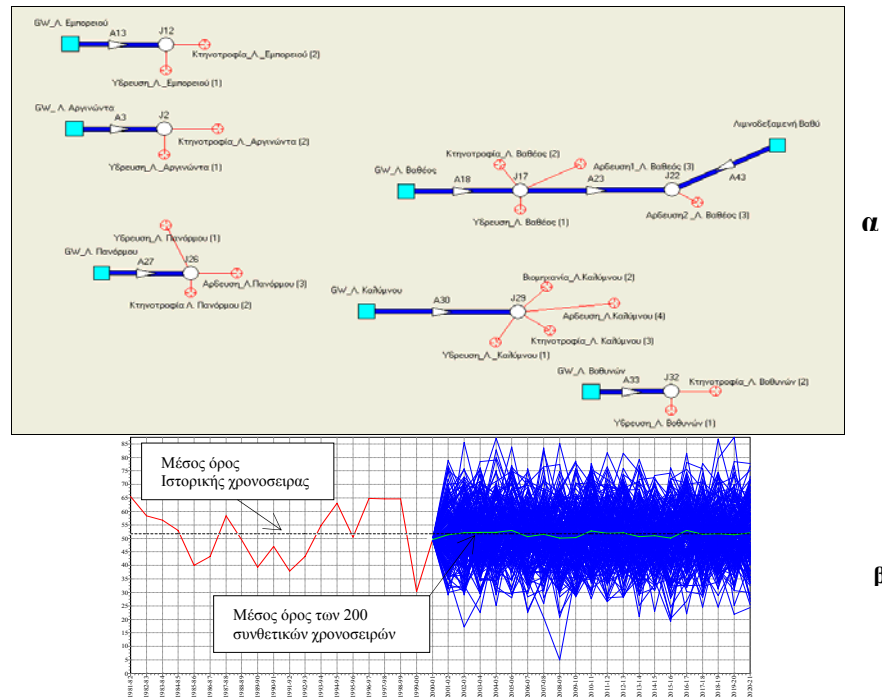
4.1 Στοχαστική προσομοίωση - Σχηματοποίηση υδροσυστήματος

Η μελέτη και απόκριση των υδροσυστημάτων διέπεται από ένα πλήθος αβεβαιοτήτων τόσο σε μηνιαία όσο και σε ετήσια κλίμακα, με σημαντικότερη ασφαλώς την υδρολογική αβεβαιότητα η οποία έγκειται στην αδυναμία ασφαλούς πρόβλεψης της εξέλιξης των υδρολογικών μεταβλητών και στην πολυπλοκότητα των υδρολογικών διεργασιών. Για την ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας, η προσομοίωση του υδροσυστήματος υλοποιείται στοχαστικά. Δηλαδή, οι υδρολογικές μεταβλητές αντιμετωπίζονται ως στοχαστικές ανεξίτητες και παράγεται ένα ευρύ σύνολο ισοπίθανων σεναρίων συνθετικών χρονοσειρών. Το υπολογιστικό σχήμα γέννησης συνθετικών χρονοσειρών «Κασταλία» [2] το οποίο εφαρμόστηκε στην παρούσα εργασία δέχεται ως δεδομένα τα μηνιαία και ετήσια ιστορικά δείγματα των μεταβλητών. Πρώτα, υπολογίζονται τα δειγματικά στατιστικά χαρακτηριστικά, τόσο σε μηνιαία όσο και σε ετήσια βάση. Στην συνέχεια, για κάθε ετήσια μεταβλητή ορίζεται μια θεωρητική συνάρτηση αυτοσυσχέτισης, της οποίας η δομή αναπαράγεται μέσω ενός στάσιμου μοντέλου συμμετρικά κινούμενων μέσων όρων, οι παράμετροι του οποίου εκτιμώνται συναρτήσει των στατιστικών χαρακτηριστικών των ετήσιων ιστορικών χρονοσειρών. Για τη στοχαστική προσομοίωση των μηνιαίων μεταβλητών χρησιμοποιείται ένα περιοδικό μοντέλο αυτοπαλινδρόμησης πρώτης τάξης, PAR(1), διατυπωμένο όπως και το ετήσιο ως πολυμεταβλητό. Οι παράμετροι του μοντέλου εκτιμώνται συναρτήσει των στατιστικών χαρακτηριστικών των μηνιαίων ιστορικών χρονοσειρών. Ακολουθεί η γέννηση των μηνιαίων συνθετικών χρονοσειρών, όπου για κάθε ένα έτος χωριστά, γεννώνται 12 μηνιαίες τιμές μέσω του μοντέλου PAR(1), οι οποίες στη συνέχεια διορθώνονται με γραμμική αναγωγή (μοντέλο επιμερισμού) έτσι ώστε συναρτιζόμενες να είναι συνεπείς με τις αντίστοιχες ετήσιες.

Η σχηματοποίηση του υδροσυστήματος της ν. Καλύμνου (σχήμα 5) αναπτύχθηκε στο περιβάλλον του υπολογιστικού σχήματος «Υδρονομέας» όπου προσομοιώνεται η λειτουργική διασύνδεση των υπόγειων και επιφανειακών υδατικών πόρων με τους κόμβους απόληξης του νερού σε επίπεδο λεκάνης απορροής. Σε κάθε κόμβο απόληξης των λεκανών απορροής εισήχθη η αντίστοιχη υπολογισμένη μηνιαία ζήτηση του νερού ανά κατηγορία χρήσης για την περίοδο προσομοίωσης 2007-2020. Επίσης, ανάλογα με την κατηγορία χρήσης ορίστηκε και η προτεραιότητα ικανοποίησης της ζήτησης. Τα υπόγεια αποθέματα νερού ανά λεκάνη απορροής προσομοιώθηκαν ως ταμιευτήρες υπόγειων υδάτων με μοναδική εισροή την εκμεταλλεύσιμη κατείσδυση (30 έως 40% της συνολικής), δεδομένου ότι το μεγαλύτερο ποσοστό της κατείσδυσης διαφεύγει προς τη θάλασσα. Σημειώνεται ότι το ΙΓΜΕ έχει εκτιμήσει τα εκμεταλλεύσιμα υπόγεια αποθέματα στο 30,77% της συνολικής κατείσδυσης [9]. Η ωφέλιμη χωρητικότητα κάθε υπόγειου ταμιευτήρα καθορίζεται ως ο μέσος ετήσιος όγκος που προκύπτει από την ιστορική χρονοσειρά εκμεταλλεύσιμης κατείσδυσης της αντίστοιχης λεκάνης απορροής. Για παράδειγμα, στη λεκάνη του Βαθέος η ωφέλιμη χωρητικότητα που προκύπτει για εκμεταλλεύσιμη κατείσδυση 40% και 30% είναι $1,45 \text{ hm}^3$ ($=0,4 \cdot 3,63$) και $1,08 \text{ hm}^3$ ($=0,3 \cdot 3,63$) αντίστοιχα. Κάθε επιπλέον ποσότητα κατείσδυσης που τυχόν προκύψει και δεν καταναλωθεί κατά το τρέχον μηνιαίο βήμα θεωρείται και αυτή (όπως και το 60% ή το 70% της κατείσδυσης) ως απώλεια λόγω διαφυγής στη θάλασσα.

Η εκμεταλλεύσιμη κατείσδυση σε κάθε λεκάνη προσομοιώθηκε στοχαστικά μέσω παραγωγής 200 ισοπίθανων σεναρίων συνθετικών χρονοσειρών για τα έτη 2001 έως 2020. Στο σχήμα 5β απεικονίζεται η στοχαστική προσομοίωση για την λεκάνη του Βαθέος. Η λειτουργία της υφιστάμενης λιμνοδεξαμενής στο Βαθύ 156.000 m^3 [8], η οποία προβλέπεται να αρδεύει 300 στρέμματα εσπεριδοειδών, προσομοιώθηκε επίσης

στοχαστικά μέσω παραγωγής 200 σεναρίων συνθετικών χρονοσειρών της βροχής-απορροής και της εξάτμισης.



Σχήμα 5. (α) Σχηματοποίηση υδροσυστήματος Ν. Καλύμνου και (β) απεικόνιση των 200 σεναρίων συνθ. χρονοσειρών της εκμεταλλεύσιμης κατείσδυσης (40%) λεκάνης Βαθός

Κατά τη λειτουργική προσομοίωση σε κάθε μηνιαίο βήμα επιλύεται και ένα διαφορετικό πρόβλημα βελτιστοποίησης, γνωστό και ως πρόβλημα μεταφοράς, μέσω γραμμικού προγραμματισμού. Το πρόβλημα μεταφοράς έγκειται στη βέλτιστη διανομή των πόρων ελαχιστοποιώντας το κόστος μεταφοράς το οποίο εκφράζεται εικονικά και κατά επίπεδο σημαντικότητας περιλαμβάνει α) την ικανοποίηση της ζήτησης κατά προτεραιότητα χρήσης, β) την ελαχιστοποίηση των διαφυγών στη θάλασσα ή υπερχειλίσεων των υπόγειων και επιφανειακών ταμιευτήρων καθώς και γ) την τήρηση ενός τρέχοντος επιθυμητού αποθέματος όταν υπάρχει διασύνδεση των ταμιευτήρων. Οι περιορισμοί αφορούν την προσφορά και ζήτηση.

4.2 Διαχειριστικές πολιτικές

Μέσω της συνδυασμένης χρήσης των εργαλείων της στοχαστικής (Κασταλία) και λειτουργικής (Υδρονομέας) προσομοίωσης διερευνήθηκαν οι παρακάτω τρεις εναλλακτικές διαχειριστικές πολιτικές των υδατικών πόρων της Καλύμνου για την περίοδο 2007-2020, δηλαδή για κάθε πολιτική εκτελέστηκαν 33600 μηνιαίες προσομοιώσεις (200 σεσάρια * 14έτη * 12μήνες).

Διαχειριστική Πολιτική-1

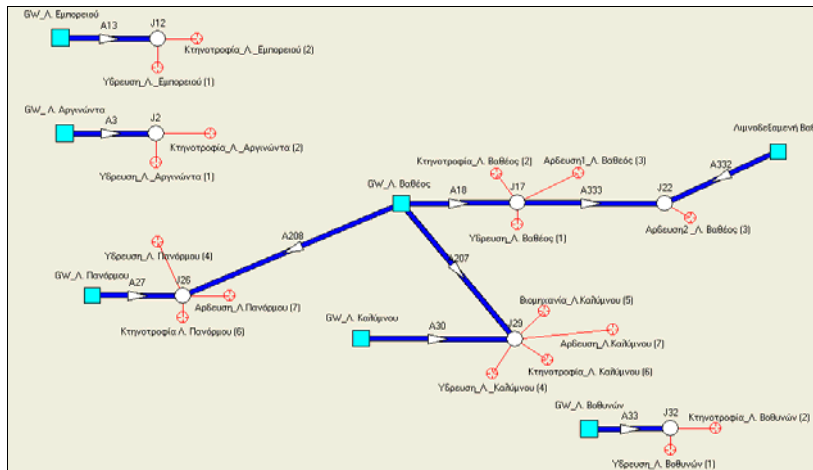
Εξετάζεται η ανεξάρτητη διαχείριση των υδατικών πόρων της κάθε λεκάνης (σχήμα 5) με εκμεταλλεύσιμη κατείσδυση το 40% της ολικής.

Διαχειριστική Πολιτική-2

Εξετάζεται η συνδυασμένη διαχείριση των υπόγειων υδατικών πόρων των λεκανών Βαθέος, Καλύμνου και Πανόρμου (σχήμα 6) με εκμεταλλεύσιμη κατείσδυση το 40% της ολικής.

Διαχειριστική Πολιτική-3

Εξετάζεται η συνδυασμένη διαχείριση των υδατικών πόρων των λεκανών Βαθέος, Καλύμνου και Πανόρμου (σχήμα 6) με εκμεταλλεύσιμη κατείσδυση το 30% της ολικής.



Σχήμα 6. Σχηματοποίηση υδροσυστήματος Ν. Καλύμνου με συνδιαχείριση των υπογείων νερών των λεκανών Βαθέος, Καλύμνου και Πανόρμου

Τα αποτελέσματα από την στοχαστική προσομοίωση του υδροσυστήματος της ν. Καλύμνου για τις τρεις διαχειριστικές πολιτικές παρουσιάζονται συγκεντρωτικά μέσω δεικτών αποτίμησης στον πίνακα 1 μόνο για τις λεκάνες απορροής Καλύμνου, Πανόρμου και Βαθέος όπου παρουσιάστηκαν αστοχίες πλήρους κάλυψης των υδατικών αναγκών και ελλείμματα.

Τα αποτελέσματα της διαχειριστικής πολιτικής-1 δείχνουν ότι παρουσιάζεται ένα σημαντικό έλλειμμα με μέση τιμή 282.000 m³ και μέγιστη 367.000 m³. Το συντριπτικό ποσοστό των ελλειμμάτων εμφανίζεται στη λεκάνη της Καλύμνου η οποία έχει μέγιστες ετήσιες ανάγκες 1.286.400 m³ (έτος 2020). Η κάλυψη του ελλείμματος, στο βαθμό που σήμερα επιτυγχάνεται πιθανόν οφείλεται στην άντληση ποσοτήτων υφάλμυρου νερού σε συνδυασμό με χρήση, κυρίως κατά τους θερινούς μήνες, εμφιαλωμένου πόσιμου νερού. Στη λεκάνη του Πανόρμου, επίσης παρουσιάζεται ένα έλλειμμα το οποίο εντοπίζεται κυρίως την θερινή περίοδο λόγω της αυξημένης τουριστικής κίνησης πρωτίτως και δευτερευόντως λόγω των αρδεύσεων. Στη λεκάνη του Βαθέος παρατηρείται σημαντικό πλεόνασμα του οποίου όμως δεν γίνεται ορθολογική διαχείριση καθόσον οι γεωτρήσεις και κυρίως τα ιδιωτικά πηγάδια άρδευσης συνωστίζονται στο πεδινό τμήμα με ανεξέλεγκτες αντλήσεις προκαλώντας τουλάχιστον κατά τα ξηρά έτη προβλήματα υφαλμύρινσης. Η διαχειριστική πολιτική-2 εξαλείφει σχεδόν πλήρως το πρόβλημα ελλείμματος της λεκάνης της Καλύμνου (Πόθια) και του Πανόρμου εφόσον βέβαια γίνει ορθολογική διαχείριση των υδατικών αποθεμάτων της λεκάνης του Βαθέος. Στη διαχειριστική πολιτική-3 όπου η εκμεταλλεύσιμη κατείσδυση θεωρείται ότι είναι μόνο 30% της συνολικής, τα ελλείμματα επανεμφανίζονται αλλά σε βαθμό πολύ περιορισμένο της τάξης των 50.000-80.000 m³. Η διερεύνηση εκμετάλλευσης και των επιφανειακών απορροών με τη κατασκευή ενδοποτάμιων και εξωποτάμιων μικρών λιμνοδεξαμενών στη λεκάνη του Βαθέος (πέραν της υφιστάμενης) ή/και στη λεκάνη της

Καλύμνου (περιοχή Άργους) μπορεί επίσης να συμβάλλει θετικά στη μείωση ή και στην εξάλειψη του ελλείμματος και στον περιορισμό της υφαλμύρινσης.

Πίνακας 1. Αποτελέσματα των διαχειριστικών πολιτικών 1-2-3 για τις λεκάνες απορροής των οποίων οι ανάγκες δεν καλύπτονται πλήρως

	Διαχειριστική Πολιτική 1				Διαχειριστική Πολιτική 2			Διαχειριστική Πολιτική 3		
	(1) (2)	(3)	(4) (5)	(6) (7)	(3)	(4) (5)	(6) (7)	(3)	(4) (5)	(6) (7)
Υδρευση	<u>1.167</u>	28.5%	<u>0.248</u>	78.8%	0.1%	<u>0.001</u>	99.9%	3.5%	<u>0.028</u>	97.6%
Καλύμνου	1.219		0.319	72.7%		0.004	99.7%		0.047	96.0%
Υδρευση	<u>0.052</u>	0.0%	<u>0.000</u>	100%	0.0%	<u>0.000</u>	100%	1.5%	<u>0.001</u>	98.1%
Βαθέος	0.055		0.000	100%		0.000	100%		0.001	98.1%
Υδρευση	<u>0.156</u>	8.4%	<u>0.009</u>	94.2%	0.1%	<u>0.000</u>	100%	2.5%	<u>0.003</u>	98.1%
Πανόρμου	0.166		0.014	91.0%		0.000	100%		0.006	96.2%
Βιομηχ.	<u>0.032</u>	28.9%	<u>0.009</u>	72.2%	0.1%	<u>0.000</u>	100%	3.6%	<u>0.001</u>	96.9%
Καλύμνου	0.032		0.011	66.0%		0.000	100%		0.002	93.8%
Άρδευση	<u>0.029</u>	38.3%	<u>0.011</u>	62.1%	0.1%	<u>0.000</u>	100%	4.8%	<u>0.001</u>	96.6%
Καλύμνου	0.029		0.014	51.8%		0.000	100%		0.002	93.1%
Άρδευση	<u>0.396</u>	0.0%	<u>0.000</u>	100%	0.0%	<u>0.000</u>	100%	2.5%	<u>0.012</u>	97.0%
Βαθέος	0.396		0.000	100%		0.000	100%		0.021	94.5%
Άρδευση	<u>0.166</u>	0.0%	<u>0.000</u>	100%	0.0%	<u>0.000</u>	100%	1.6%	<u>0.002</u>	98.8%
Βαθέος	0.166		0.000	100%		0.000	100%		0.005	97.0%
Λ/Δ										
Άρδευση	<u>0.060</u>	13.7%	<u>0.005</u>	91.6%	0.1%	<u>0.000</u>	100%	4.4%	<u>0.002</u>	96.6%
Πανόρμου	0.060		0.009	84.9%		0.000	100%		0.003	95.0%
Ετήσιο	Μέσο: 0.282 hm³				Μέσο: 0.001 hm³			Μέσο: 0.050 hm³		
Έλλειμμα	Μέγιστο: 0.367 hm³				Μέγιστο: 0.004 hm³			Μέγιστο: 0.087 hm³		

(1)/(2): Μέσες/μέγιστες ετήσιες ανάγκες σε hm³ (3): Μέση μηνιαία αστοχία για κάλυψη 100% των αναγκών (4)/(5): Μέσο/Μέγιστο ετήσιο έλλειμμα σε hm³ (6)/(7): Ποσοστό κάλυψης μέσων/μέγιστων ετήσιων αναγκών.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η πολυπλοκότητα των υδρολογικών διεργασιών και η αδυναμία ακριβούς πρόβλεψης της εξέλιξης των υδρολογικών μεταβλητών που χαρακτηρίζουν την λειτουργία των υδροσυστημάτων επιβάλλει τη χρήση μιας ολοκληρωμένης και στοχαστικής προσέγγισης μέσω εξελιγμένων υπολογιστικών εργαλείων. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής προσδιόρισαν το εύρος και τη θέση των ελλειμμάτων και αστοχιών και ανέδειξαν επίσης την ανάγκη για την ενιαία -σε επίπεδο νησιού- και ορθολογική διαχείριση των υδατικών πόρων των λεκανών απορροής σε ένα μικρό νησί όπως είναι η Κάλυμνος. Η υιοθέτηση της διαχειριστικής πολιτικής-3 με προσθήκη μικρών λιμνοδεξαμενών θα συμβάλλει στη μείωση ή εξάλειψη του ελλείμματος και της υφαλμύρινσης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Kechagias E, Katsifarakis K.L., 2004. Planning water resources management in small islands, The case of Kalymnos, *Water Air and Soil Pollution: Focus*, 4(4-5):279-288

2. Koutsoyiannis, D., 2000. A generalized mathematical framework for stochastic simulation and forecast of hydrologic time series, *Water Resources Research*, 36(6):1519-1534
3. Αναπτυξιακή εταιρία Νομού Δωδεκανήσων, <http://www.ando.gr>
4. ΙΓΜΕ, 2002. *Υδρογεωλογική Έρευνα Νοτίου Αιγαίου*, Φ. Χαρμανίδης, Αθήνα
5. Μιμίδης Θ., Ρίζος Σ., Τρικοίλη Ε. και Κακαδιάρης Σ., 2006. Διαχείριση των υδατικών πόρων της κοιλάδας Βαθύ της νήσου Καλύμνου, *10^ο Πανελλήνιο Συνέδριο ΕΥΕ*, Ξάνθη, Δεκέμβριος 2006, 249-256.
6. Μπαλτάς, Ε.Α., 2006. Εφαρμοσμένη μετεωρολογία, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη
7. Περιφέρεια Νοτίου Αιγαίου, 1994, *Μελέτη Αξιοποίησης και διαχείρισης του υδάτινου δυναμικού των νήσων της Περιφέρειας Νοτίου Αιγαίου – Νομός Δωδεκανήσου*, Eurosynergy Consulting, Θεσσαλονίκη
8. ΥΠΑΑΤ, 1992. *Οριστική Μελέτη Λιμνοδεξαμενής Βαθύ Καλύμνου*, Θ. Γκόφας, Αθήνα.
9. ΥΠΑΝ, 2003. *Σχέδιο Προγράμματος Διαχείρισης των Υδατικών Πόρων της Χώρας*, Παράρτημα 3 (ΙΓΜΕ), Αθήνα
10. ΥΠΑΝ, 2005. *Ανάλυση συστημάτων και εργαλείων διαχείρισης υδατικών πόρων υδατικού διαμερίσματος νήσων Αιγαίου, Νήσος Κάλυμνος, Α' Φάση: Συλλογή και Επεξεργασία δεδομένων*, Κ/Ξ Υδατοσυστημάτων Αιγαίου, Αθήνα

(195)

Η ΚΟΣΤΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΑΡΔΕΥΤΙΚΟΥ ΝΕΡΟΥ ΩΣ ΜΕΤΡΟ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΟΔΗΓΙΑΣ 2000/60/ΕΕ ΚΑΙ ΤΗΣ ΚΟΙΝΗΣ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΠΟΛΙΤΙΚΗΣ

Ε. Σταυρινός

Δ/νση Σχεδιασμού Εγγ. Έργων & Αξιοπ/σης Εδαφο-Υδατικών Πόρων, Υπουργείο
Αγροτικής Ανάπτυξης & Τροφίμων, Σεράφη 60 & Λιοσσιών, Αθήνα 104 45,
email:estav2@yahoo.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η κοστολόγηση του Αρδευτικού Νερού με την ένταξη τριών μελετών στο μέτρο 6.2. του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Αγροτική Ανάπτυξη - Ανασυγκρότηση της Υπαίθρου 2000- 2006» : α) στη Λεκάνη Απορροής του Ποταμού Στρυμόνα β) στη Λεκάνη Απορροής του Ποταμού Πηνειού και γ) στον Κάμπο – Χανίων του Ν. Χανίων, θα χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο στην αποτελεσματικότερη χρήση και την ελάχιστη ρύπανση των μη ανανεώσιμων εδαφοϋδατικών πόρων για την υλοποίηση της Οδηγίας και την εφαρμογή της ΚΑΠ στις συνθήκες κάθε περιοχής.

IRRIGATION WATER COST : A MEASURE OF DIRECTIVE 2000/60/EU (WFD) AND COMMON AGRICULTURE POLICY REALIZATION

E. Stavrinou

Direction of Land Reclamation Planning & Soil-Water Resources Exploitation, Ministry
of Rural Development & Food, 60 Serafi str. & Liossion, Athens 104 45, email:
estav2@yahoo.gr

SUMMARY

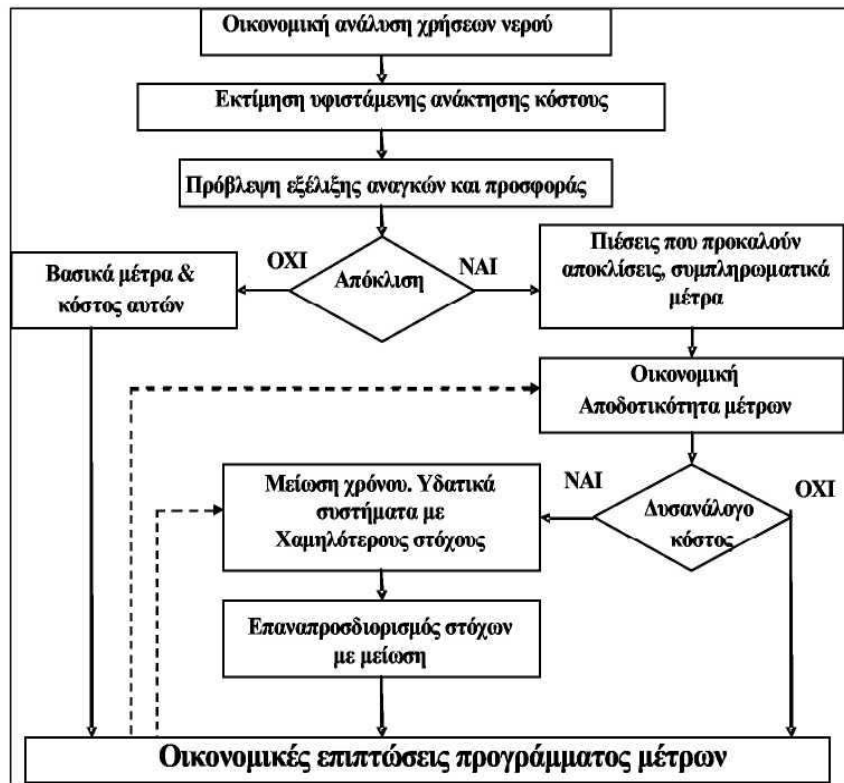
The cost accounting for irrigation water realization has been considered with three pilot projects a) in Strimona river basin b) in Pinios river basin and c) in ‘Kampos’ plain of Chania – Crete. This study conclusions are going to be used for the more effective and the minimal pollution of not renewable soil and water resources implementation of WFD and CAP in the conditions of each region.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η σημαντικότερη οικονομική αρχή που εισάγει η Οδηγία 2000/60/ΕΕ είναι η δημιουργία ενός κοινού πλαισίου για τη διαχείριση των υδατικών πόρων που βασίζεται στην ανάκτηση του κόστους των υπηρεσιών νερού στα πλαίσια της νέας Κ.Α.Π. Η ανάκτηση του κόστους συμπεριλαμβανομένων του περιβαλλοντικού κόστους και του κόστους των πόρων συνδέεται με κάθε βλάβη ή αρνητική επίπτωση στο εδαφικό και υδάτινο περιβάλλον λαμβάνοντας υπόψη την αρχή ‘‘ο ρυπαίνων πληρώνει’’. Οι χρήσεις του νερού, όπως η αγροτική, απαιτούν τη λεπτομερή μελέτη κατανομής των περιβαλλοντικών στόχων της Οδηγίας 2000/60/ΕΚ μέσω των αντίστοιχων μέτρων (άρθρο 11) [1]. Ακόμη, απαιτείται καλύτερη διάκριση των μορφών επικάλυψης με το υδατικό περιβάλλον (υδατικές χρήσεις / υπηρεσίες ύδατος) σύμφωνα με το άρθρο 9 [6]. Εφόσον οι διαφορετικές πληρωμές της ΚΑΠ επηρεάζουν τη γεωργική παραγωγή με διαφορετικούς τρόπους υπάρχει ανάγκη κατανόησης του συστήματος τιμολόγησης των προϊόντων και ειδικότερα των παραμέτρων που επηρεάζουν τον μηχανισμό τιμολόγησης του νερού. Ενώ οι μηχανισμοί της πολλαπλής συμμόρφωσης της νέας ΚΑΠ σε πολλές περιπτώσεις είναι περισσότερο δεσμευτικοί με τη χρήση του αρδευτικού νερού, ως εισροές, προϋποθέτουν τη μελέτη των στόχων της Οδηγίας με την τιμολόγηση του νερού [4]. Στη μελέτη των Gomez-Limon et al [2] διαπιστώνεται ότι η Κοινή Αγροτική Πολιτική της ΕΕ και οι αρχές της WFD έχουν πολλά σημεία στα οποία το γενικότερο πνεύμα τους είναι αντίθετο. Σε γενικές γραμμές ενώ η ΚΑΠ ενισχύει το ελεύθερο εμπόριο και τον ανταγωνισμό, οι αρχές της Οδηγίας επιβάλλουν πρόσθετο κόστος στην αρδευόμενη γεωργία, επηρεάζοντας αρνητικά την ανταγωνιστικότητά της.

Η ανάλυση των θεμάτων διαχείρισης υδατικών πόρων με βάση οικονομικά εργαλεία και πρακτικές, αποτελεί βασική προϋπόθεση για τον προσδιορισμό των περιβαλλοντικών στόχων που πρέπει να επιτευχθούν και των οικονομικών συνεπειών των κατάλληλων μέτρων όπως η τιμολόγηση υπηρεσιών (παροχής) νερού, προϋποθέτει την αξιολόγηση των ενδεχομένων επιπτώσεων σε κάθε παραγωγικό τομέα, και σε κάθε χρήση νερού. Η διαδικασία υλοποίησης της οικονομικής ανάλυσης που απαιτείται στα πλαίσια της Οδηγίας περιλαμβάνει δύο βήματα (Σχήμα 1).

Το πρώτο βήμα υλοποιείται με την εκτίμηση της υφιστάμενης ανάκτησης του συνολικού κόστους υπηρεσιών νερού, την οικονομική ανάλυση των χρήσεων νερού και την πρόβλεψη της εξέλιξης της ζήτησης και προσφοράς νερού στην περιοχή λεκάνης απορροής ποταμού. Στα πλαίσια του βήματος αυτού διαμορφώνεται το Σενάριο Αναφοράς για την εξέλιξη των βασικών παραμέτρων που επηρεάζουν τη ζήτηση και την προσφορά νερού και τις απαιτούμενες επενδύσεις. Στο δεύτερο βήμα, το Σενάριο Αναφοράς χρησιμοποιείται για την εκτίμηση των προβλεπόμενων επιπτώσεων στην ποιότητα των υδατικών συστημάτων. Το τελευταίο βήμα της οικονομικής ανάλυσης σχετίζεται με την εκτίμηση των οικονομικών επιπτώσεων από την εφαρμογή του προγράμματος των μέτρων. Σε περίπτωση που διαπιστωθούν αποκλίσεις από τους στόχους της Οδηγίας, απαιτείται ο προσδιορισμός των κατάλληλων συμπληρωματικών μέτρων [3].



Σχήμα 1. Διαδικασία υλοποίησης της οικονομικής ανάλυσης σύμφωνα με τις απαιτήσεις της Οδηγίας

Η εφαρμογή της αρχής «ο ρυπαίνων πληρώνει» σε περιπτώσεις σημαντικής διάχυτης ρύπανσης είναι ιδιαίτερα δύσκολη. Το επιπλέον κόστος για την παροχή υπηρεσιών, λόγω της διάχυτης ρύπανσης δεν μπορεί να κατανεμηθεί στους ρυπαντές αλλά στις περισσότερες περιπτώσεις κατανέμεται μεταξύ των χρηστών των υπηρεσιών.

Με το Νόμο 3199/2003 εναρμόνισης της ελληνικής νομοθεσίας με την Οδηγία Πλαίσιο, καθώς και με Προεδρικά Διάταγμα τα οποία πρόκειται να ακολουθήσουν καθορίζονται σαφώς οι αρμοδιότητες των επιμέρους φορέων σε επίπεδο Περιφέρειας, όσο και σε Εθνικό επίπεδο, τα ειδικά μέτρα κοστολόγησης του αρδευτικού νερού στα πλαίσια υλοποίησης των διαχειριστικών σχεδίων. Γενικά, ένα από τα χαρακτηριστικά του εθνικού νομικού πλαισίου είναι ότι πλέον, συγκροτούνται καινούργια όργανα, και γίνεται προσπάθεια αποφυγής των αλληλοεπικαλύψεων [3].

Ο γενικός σκοπός της κοστολόγησης του αρδευτικού νερού είναι η ανάπτυξη μεθοδολογικής προσέγγισης (εργαλείων), με βάση τις οικονομικές, κοινωνικές και περιβαλλοντικές συνθήκες της περιοχής εφαρμογής, στα πλαίσια εναρμόνισης της Εθνικής Νομοθεσίας με την Οδηγία Πλαίσιο για τα Νερά και της Κοινής Αγροτικής Πολιτικής, για τη διαμόρφωση της τιμολογιακής πολιτικής της χώρας βασισμένη στη βιώσιμη ανάπτυξη των καλλιεργειών και την αειφορική διαχείριση των υδατικών πόρων

Οι ειδικοί στόχοι της εργασίας κοστολόγησης του αρδευτικού νερού περιλαμβάνουν

- Τη δημιουργία Γεωγραφικής Βάσης Δεδομένων, στην οποία θα υπάρχει καταχωρημένη όλη η σχετική πληροφορία που θα συγκεντρωθεί για την περιοχή μελέτης.
- Η καταγραφή της κατανάλωσης αρδευτικού νερού και η ανάλυση της προσφοράς και ζήτησης με τη χρήση σύγχρονων τεχνικών.
- Η εκτίμηση των οικονομικών και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων στην ευρύτερη περιοχή μελέτης (λεκάνη απορροής ποταμού) και του περιβαλλοντικού κόστους και του κόστους πόρου από τη χρήση του νερού στις αρδευόμενες καλλιέργειες της περιοχής.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Στο μέτρο 6.2. του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Αγροτική Ανάπτυξη - Ανασυγκρότηση της Υπαίθρου 2000- 2006» του Υπουργείου Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων, έχουν ενταχθεί πιλοτικά οι μελέτες : α) Κοστολόγηση Αρδευτικού Νερού στη Λεκάνη Απορροής του Ποταμού Στρυμόνα (Πεδιάδας Σερρών), β) Κοστολόγηση Αρδευτικού Νερού στη Λεκάνη Απορροής του Ποταμού Πηνειού (Υπολεκάνης Τιρνάβου), και γ) Κοστολόγηση Αρδευτικού Νερού στον Κάμπο – Χανίων, του Ν. Χανίων. Αναλυτικότερα τα παρακάτω στάδια περιλαμβάνουν τις εργασίες και περιγράφουν τη μεθοδολογική προσέγγιση υπολογισμού του κόστους στα πλαίσια σύνδεσης της Οδηγίας και της ΚΑΠ με και τους ειδικούς σκοπούς της εργασίας :

Στάδιο Α: Το Στάδιο Α περιλαμβάνει την βιβλιογραφική ανασκόπηση και την καταγραφή της υπάρχουσας σχετικά με θέματα κοστολόγησης του αρδευτικού νερού σε χώρες ΟΟΣΑ, και Ε.Ε.

2.1. Πλήρη ανασκόπηση της σχετικής βιβλιογραφίας

- (α) Ανασκόπηση ελληνικής και ξενόγλωσσας βιβλιογραφίας σε θέματα θεωρητικής και εφαρμοσμένης μεθοδολογίας κοστολόγησης του αρδευτικού νερού (ΟΟΣΑ, Ε.Ε).
- (β) Καταγραφή του κοινοτικού και εθνικού θεσμικού πλαισίου.
- (γ) Διερεύνηση χρηματοοικονομικού, περιβαλλοντικού και κόστους πόρου με βάση τα πραγματικά γεωργοοικονομικά - γεωργοτεχνικά στοιχεία κοστολόγησης του αρδευτικού νερού.

2.2. Καταγραφή των γεωργικών δραστηριοτήτων που αφορούν τις καλλιέργειες

- (α) Περιγραφή των έργων αξιοποίησης των υδατικών πόρων που εξυπηρετούν τις παραπάνω δραστηριότητες και ανάλυση του τρόπου λειτουργίας τους με βάση υφιστάμενα δεδομένα. Συλλογή περιβαλλοντικών δεδομένων που σχετίζονται με την υποβάθμιση του περιβάλλοντος λόγω της γεωργικής χρήσης των υδατικών πόρων της περιοχής. Σχεδιασμός και υλοποίηση Γεωγραφικής Βάσης Δεδομένων.
- (β) Καταγραφή αρδευόμενων εκτάσεων. Ορισμός αρδευόμενων εκτάσεων, καταγραφή των αρδευόμενων εκτάσεων με τη χρήση δορυφορικής τηλεπισκόπησης.
- (γ) Γενική περιγραφή μεθόδων άρδευσης και προέλευσης αρδευτικού νερού (επιφανειακό – υπόγειο) στην περιοχή μελέτης.
- (δ) Καταγραφή όλων των υφιστάμενων αρδευτικών έργων με ανάλυση βασικών στοιχείων λειτουργίας τους (διωρύγων άρδευσης και αποστράγγισης, ικανότητα απόληξης και μεταφοράς, λειτουργία αντλιοστασίων, απόδοση αρδευτικών δικτύων κ.λπ.).
- (ε) Συλλογή και αρχειοθέτηση υφιστάμενων δεδομένων παροχών έργων άρδευσης και αποστράγγισης, συμπεριλαμβανομένων επιφανειακών και υπογείων νερών, όπου απαιτείται.

- (στ) Συλλογή και αρχειοθέτηση υφιστάμενων περιβαλλοντικών δεδομένων που σχετίζονται με την υποβάθμιση του περιβάλλοντος λόγω χρήσης των υδατικών πόρων της περιοχής.
- (ζ) Συλλογή και αρχειοθέτηση υφιστάμενων υδρολογικών, μετεωρολογικών δεδομένων.
- (η) Συλλογή στοιχείων που αφορούν τις γεωργικές χρήσεις γης, τα είδη καλλιεργειών, την καλλιεργητική περίοδο, τα στάδια ανάπτυξης των φυτών κ.λπ.
- (θ) Συλλογή οικονομικών στοιχείων Διοίκησης-Λειτουργίας-Συντήρησης συλλογικών και ατομικών αρδευτικών δικτύων (ΟΕΒ, ομάδες παραγωγών, κ.α.)
- (ι) Έλεγχο, αξιολόγηση και συμπλήρωση των παραπάνω δεδομένων.
- (κ) Σχεδιασμό και υλοποίηση Γεωγραφικής Βάσης Δεδομένων και εισαγωγή σ' αυτήν των παραπάνω δεδομένων μετά τον έλεγχο, επεξεργασία και συμπλήρωση.

Στάδιο Β: Το Στάδιο Β περιλαμβάνει την καταγραφή της κατανάλωσης του αρδευτικού νερού και την ανάλυση της προσφοράς και ζήτησης.

2.3. Καταγραφή των υδατικών παραμέτρων που σχετίζονται με την κατανάλωση νερού από τις αγροτικές καλλιέργειες με τη βοήθεια των παραπάνω εργασιών.

- (α) Εφαρμογή σύγχρονων τεχνικών τηλεπισκόπησης για την χωρική και χρονική καταγραφή της κατανάλωσης του νερού άρδευσης.
- (β) Ανάλυση των υφιστάμενων δεδομένων με χρήση κατάλληλης μεθοδολογίας για την εκτίμηση των ποσοτικών μεγεθών των υπόγειων νερών, και ενσωμάτωσή τους στο Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών.
- (γ) Εφαρμογή σύγχρονων τεχνικών τηλεπισκόπησης για την χωρική και χρονική καταγραφή της παραγωγής των καλλιεργούμενων εκτάσεων και της ανάπτυξης βιομάζας των εκτάσεων με φυσική βλάστηση.
- (δ) Εφαρμογή σύγχρονων τεχνικών δορυφορικής τηλεπισκόπησης διάκρισης των κύριων αγροτικών καλλιεργειών μέσω φασματικής ταξινόμησης δορυφορικών εικόνων SPOT-5. στις οποίες πετυχαίνει υψηλή χωρική ανάλυση σε ευρεία έκταση (οικονομία κλίμακας). Μαθηματικά ομοιώματα προσομοίωσης θα χρησιμοποιηθούν συμπληρωματικά, όπου απαιτείται.

2.4. Ανάλυση προσφοράς και ζήτησης νερού.

- (α) Υπολογισμός ισοζυγίου αρδευτικού νερού (μόνο για τις γεωργικές καλλιέργειες) χρησιμοποιώντας τα επίπεδα πληροφοριών που δημιουργήθηκαν.
- (β) Ανάλυση των δεδομένων και δημιουργία σειράς σχετικών πληροφοριών:
 - Τη χωρική κατανομή της κατανάλωσης νερού
 - Τη χωρική κατανομή της αγροτικής παραγωγής
 - Την προσφορά νερού στις διάφορες περιοχές
 - Την κατανομή του νερού στις διάφορες καλλιέργειες

Στάδιο Γ: Το Στάδιο Γ περιλαμβάνει την εκτίμηση του περιβαλλοντικού κόστους, τον καθορισμό και την οικονομική αξιολόγηση των σεναρίων.

2.5. Ανάλυση περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Περιλαμβάνει την εκτίμηση των εν δυνάμει περιβαλλοντικών επιπτώσεων, με έμφαση στους εδαφοϋδατικούς πόρους, ως αποτέλεσμα της χρήσης των επιφανειακών και υπογείων νερών στη γεωργία.

- (α) Θα εκτιμηθεί η ποιοτική επιβάρυνση και η ποσοτική μείωση των επιφανειακών και υπογείων υδάτων και των εξαρτημένων από αυτά οικοσυστημάτων στη περιοχή του έργου, ως περιβαλλοντικό κόστος, λαμβάνοντας υπόψη τις αλληλεπιδράσεις υπογείων και επιφανειακών υδάτων καθώς και μεταξύ υγροτόπων και άλλων επιφανειακών υδάτων στη λεκάνη απορροής του ποταμού.
- (β) Θα εκτιμηθεί η αξιολόγηση των λειτουργιών (εδαφικών και υγροτοπικών) στη περιοχή έργου, ώστε να εκτιμηθεί το κόστος αποκατάστασης αυτών που έχουν υποβαθμισθεί και να συνυπολογισθεί στο κόστος / όφελος κάθε χρήστη και υποδομής.
- (γ) Θα υπολογιστεί η επιβάρυνση του περιβάλλοντος από τη χρήση του νερού άρδευσης με την εφαρμογή κατάλληλης μεθοδολογίας

2.6. Αξιολόγηση σεναρίων ζήτησης και προσφοράς νερού άρδευσης (υψηλή – χαμηλή διαθεσιμότητα νερού).

- (α) Θα αξιολογηθούν δύο σενάρια: σε συνθήκες περίσσειας νερού και σε συνθήκες έλλειψης νερού.
- (β) Αναλυτικότερα, υπολογίζονται κατάλληλοι δείκτες που περιγράφουν τη χρήση του αρδευτικού νερού και εκτιμάται το όφελος-κόστος από το συγκεκριμένο σενάριο, αφού ληφθεί υπόψη η μείωσή της χρήσης σε περίπτωση ελλείμματος νερού. Αθροίζοντας όλα τα επί μέρους οφέλη-κόστη και λαμβάνοντας υπόψη το περιβαλλοντικό κόστος υπολογίζεται το συνολικό όφελος κόστος από τη χρήση νερού.

2.7. Πολυκριτηριακή ανάλυση και οικονομική αξιολόγηση κάθε χρήσης νερού.

Περιλαμβάνει την αξιολόγηση του κόστους χρήσης των υδατικών πόρων, της χρήσης και συντήρησης των υποδομών και την επιβάρυνση του περιβάλλοντος στα εξεταζόμενα σενάρια. Η οικονομική ανάλυση θα λάβει υπόψη την εφαρμογή της Οδηγίας 2000 / 60 καθώς και τα κείμενα εξειδίκευσης του παραρτήματος III που έχουν εκδοθεί ή θα εκδοθούν μέχρι την ολοκλήρωση του έργου καθώς και τα αντίστοιχα έγγραφα (Guidance Documents)

Επίσης περιλαμβάνονται:

- (α) Πολυκριτηριακή ανάλυση με βάση τα υφιστάμενα δεδομένα και τα κριτήρια που συνυπολογίζονται στη διαμόρφωση του τελικού κόστους.
- (β) Εκτίμηση οικονομικού οφέλους περιβαλλοντικού και κόστους πόρου για κάθε σενάριο σύμφωνα με τα μέτρα της Κοινής Αγροτικής Πολιτικής.
- (γ) Πρωτόκολλο Μεθοδολογίας υπολογισμού του κόστους του αρδευτικού νερού (Worksheets) – αντιστοίχιση περιοχών λεκανών απορροής με προσομοίωση των μαθηματικών ομοιωμάτων.
- (δ) Προτεινόμενες πολιτικές τιμολόγησης με βάση τις οικονομικές, κοινωνικές και περιβαλλοντικές συνθήκες.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Με τα παρακάτω παραδοτέα του έργου πραγματοποιείται η αντιστοίχιση των περιοχών λεκανών απορροής με την προσομοίωση μαθηματικών ομοιωμάτων όπου ενσωματώνονται τα αποτελέσματα και οι οικονομικές σταθερές - στοιχεία οικονομικού

κόστους της γεωργικής παραγωγής και των αρδευτικών δικτύων - για τον προσδιορισμό του κόστους του αρδευτικού νερού :

3.1. τεύχος για την υλοποίηση του σε γραπτή και ηλεκτρονική μορφή

3.2. G.I.S. για την υλοποίηση της ΓΒΔ

3.3. τεύχος για την υλοποίηση του ισοζυγίου αρδευτικού νερού όπου θα έχουν προσδιοριστεί κατάλληλες σταθερές και δείκτες για την κατανάλωση του αρδευτικού νερού και της προσφοράς και ζήτησης, που θα χρησιμοποιηθούν στο μαθηματικό ομοίωμα κοστολόγησης του αρδευτικού νερού για την εκτίμηση του κόστους του αρδευτικού νερού σε γραπτή και ηλεκτρονική μορφή

3.4. χάρτες με την χρήση τηλεπισκόπησης για την χωρική κατανομή της κατανάλωσης νερού, της αγροτικής παραγωγής, της προσφοράς του στις διάφορες περιοχές, της κατανομής του στις διάφορες καλλιέργειες για την υλοποίηση της ανάλυσης προσφοράς και ζήτησης του αρδευτικού νερού

3.5. τεύχος για την υλοποίηση προσδιορισμού των περιβαλλοντικών επιπτώσεων όπου θα έχουν προσδιοριστεί κατάλληλες περιβαλλοντικές σταθερές και δείκτες όπου θα χρησιμοποιηθούν στο μαθηματικό ομοίωμα κοστολόγησης του αρδευτικού νερού για την εκτίμηση του κόστους του αρδευτικού νερού σε γραπτή και ηλεκτρονική μορφή

3.6. τεύχος για την υλοποίηση της αξιολόγηση σεναρίων ζήτησης και προσφοράς νερού άρδευσης και προσδιορισμού των κατάλληλων σταθερών και δεικτών που θα χρησιμοποιηθούν στο μαθηματικό ομοίωμα κοστολόγησης του αρδευτικού νερού για την εκτίμηση του οικονομικού αποτελέσματος σε γραπτή και ηλεκτρονική μορφή,

3.7. μαθηματικό ομοίωμα κοστολόγησης του αρδευτικού νερού όπου θα ενσωματώνει τα αποτελέσματα των παραπάνω με οικονομικές σταθερές (στοιχεία οικονομικού κόστους) όπως π.χ. αξία της γεωργικής παραγωγής ανά μονάδα βάρους ή όγκου, στρεμματική απόδοση των διαφόρων καλλιεργειών, κόστος παραγωγής (ενέργεια, σπορά, εργατικά, λιπάσματα, φυτοφάρμακα, κλπ), απόσβεση έργων (αρδευτικά δίκτυα κλπ), συντήρηση και λειτουργία έργων για τον προσδιορισμό του κόστους του αρδευτικού νερού σύμφωνα με την πολυκριτηριακή ανάλυση και οικονομική αξιολόγηση κάθε χρήσης νερού.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με τον υπολογισμό του κόστους του αρδευτικού νερού διαπιστώνονται τα ακόλουθα:

4.1. Η επίδραση της τιμολόγησης του νερού στη ζήτησή του εξαρτάται από τη μορφή της καμπύλης ζήτησης. Στην καμπύλη αυτή υφίστανται δύο ξεχωριστές περιοχές, οι οποίες υποδηλώνουν ότι η διάθεση των αγροτών να πληρώσουν καθορίζεται από τα όργανα της Κοινής Αγροτικής Πολιτικής.

4.2. Λόγω του μικρού αριθμού των ανταγωνιστικών καλλιεργειών, το πρώτο τμήμα της καμπύλης ζήτησης υποδηλώνει ότι το αγροτικό εισόδημα θα μειωθεί σε ένα ποσοστό 15-20% πριν εμφανισθεί μείωση στην κατανάλωση του νερού. Εάν αυτό το γεγονός συνδυασθεί και με τις αρχές της ΚΑΠ, το ποσοστό μείωσης ίσως αγγίξει το 50% των τωρινών επιπέδων, εξέλιξη η οποία θα είναι καταστροφική τόσο κοινωνικά όσο και περιβαλλοντικά (ερήμωση απομονωμένων περιοχών)

4.3. Στην περίπτωση των περιοχών όπου η γεωργία είναι σε μεγάλο βαθμό μηχανοποιημένη με νέες τεχνολογίες, η άμεση μείωση της απασχόλησης στον κλάδο δεν θα είναι σημαντική εκτός εάν η τιμολόγηση του νερού υπερβεί κάποια όρια. Ωστόσο σε άλλες περιοχές η επίδραση θα είναι εντονότερη

4.4. Η στάση και των δύο πολιτικών είναι κοινή στην χρήση λιπασμάτων τα οποία βασίζονται σε αζωτούχες ενώσεις, οι οποίες επιδιώκεται να μειωθούν.

Με την κοστολόγηση του αρδευτικού νερού δεν είναι δυνατόν να επιλυθούν τα προβλήματα των δύο πολιτικών αλλά θα χρησιμοποιηθεί αυτό τοπικά ως εργαλείο για τη διαχείριση υδατικών και εδαφικών πόρων με την εφαρμογή των μέτρων της Κοινής Αγροτικής Πολιτικής. Έτσι, η τιμολόγηση θα χρησιμοποιηθεί περισσότερο στην πρόβλεψη της αποτελεσματικότερης χρήσης και της ελάχιστης ρύπανσης των μη ανανεώσιμων υδατικών πόρων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Οδηγία 2000/60/EK εκ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 23^{ης} Οκτωβρίου 2000 για τη θέσπιση πλαισίου κοινοτικής δράσης στον τομέα της πολιτικής των υδάτων. Επίσημη Εφημερίδα των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων 22.12.2000: L327/1-L327/72 Οδηγία 2000/60/ΕΕ(WFD) περί πολιτικής των υδάτων στην Ε.Ε.
2. Gomez-Limon et al., 2002. Multi-Criteria Analysis of Input Use in Agriculture, Journal of Agricultural Economics, Volume 55, Number 3, Nov. 2004, Pages 541-564.
3. Νόμος 3199/2003 «Προστασία και διαχείριση των υδάτων – Εναρμόνιση με την Οδηγία 2000/60/EK του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 23^{ης} Οκτωβρίου 2000» (ΦΕΚ 280/Α/9-12-2003)
4. «Προσανατολισμένη Έρευνα Πολιτικής», (SSPE-CT-2005-006618-CAP-WFD, Water Framework Directive meets Common Agricultural Policy – Opportunities for the future), από το Ecologic Institute for International and European Environmental Policy.
5. Stavrinos, E. 2003. Soil-Water Resources Pricing Policy in Agricultural Sectors Based on the Water Framework Directive 2000/60/EU. Bulgarian Journal of Agricultural Engineering (Sofia) 6:21-24.

(200)

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΑΡΔΕΥΣΗΣ, ΣΤΡΕΣ ΦΥΤΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΘΕΣΙΜΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΜΕΝΗΣ ΜΕ GIS ΣΤΗΝ ΑΠΟΔΟΣΗ ΑΡΑΒΟΣΙΤΟΥ

**Αγ. Φιλίντας^{1α}, Π. Ντιούδης¹, Θ. Λέλλης¹,
Αρ. Παπαδόπουλος² και Ι. Χατζόπουλος³**

¹ Ανώτατο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Λάρισας, Σχολή Τεχνολογίας Γεωπονίας,
Τμήμα Γεωργικών Μηχανών και Αρδεύσεων, 41110, Λάρισα, "filintas@teilar.gr

² ΕΘΙΑΓΕ/Ινστιτούτο Εδαφολογίας, 570 01 Θέρμη, Θεσσαλονίκη

³ Π. Αιγαίου, Σχ. Περιβ. Σπουδών, Τμ. Περιβ., Λόφος Πανεπιστημίου, 81100, Μυτιλήνη

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της εργασίας ήταν η μελέτη της επίδρασης του εύρους άρδευσης (9, 12 και 15 ημερών), του υδατικού στρες φυτού και της χαρτογράφησης της εξάντλησης της διαθέσιμης εδαφικής υγρασίας στην απόδοση του αραβοσίτου. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι, το εύρος άρδευσης των 12 και 15 ημερών επέδρασε αρνητικά στην απόδοση του αραβοσίτου, και προκάλεσε σημαντικά υψηλότερες τιμές εξάντλησης της διαθέσιμης υγρασίας (όπως λεπτομερώς έδειξε η GIS χαρτογράφηση), που οδήγησαν τα φυτά σε περιοδικά υδατικά στρες, κατά τους μήνες Ιούλιο-Αύγουστο, με αποτέλεσμα τη στατιστικά σημαντική μείωση της παραγωγής.

EFFECT OF IRRIGATION, PLANT STRESS AND GIS MAPPED DEPLETION OF AVAILABLE SOIL MOISTURE IN MAIZE YIELD

**Ag. Filintas¹, P. Dioudis¹, Th. Lellis¹,
Ar. Papadopoulos² and J. Hatzopoulos³**

¹ TEI of Larissa, Fac. of Agr., Dept. of Agr. Eng & Irrigation, 41110, Larissa, Greece.

² NAGREF/Soil Science Institute, 570 01 Themi, Thessaloniki, Greece

³ University of the Aegean, Faculty of Environmental Studies, Department of
Environment, University Hill, 81100, Mytilini, Greece

ABSTRACT

The aim of this project was to study the effect of irrigation interval (9, 12 and 15 days), plant water stressing and GIS mapping of the available soil moisture depletion, in maize yield. The results showed that, the irrigation interval affected negatively the yield of the 12 and 15 days irrigation interval and caused significantly higher values of available soil moisture depletion (as in detail showed GIS mapping), that led the plants to periodically water stresses, particularly at the months July-August, with result the statistically significant reduction of yield.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο αραβόσιτος (*Zea mays* L.) καλλιεργείται από 58^ο Βόρειο Γεωγραφικό πλάτος μέχρι 40^ο Νότιο Γεωγραφικό πλάτος και από το επίπεδο της θάλασσας μέχρι 3.800 μέτρα υψόμετρο. Αποτελεί μία κατεξοχήν αρδευόμενη καλλιέργεια ανά τον κόσμο [1] [2], με κύρια παραγωγό χώρα τις Η.Π.Α. [2]. Ο αραβόσιτος για να επιτύχει μέγιστες αποδόσεις έχει υψηλές εποχικές απαιτήσεις σε νερό [3] [2]. Οι υδατικές απαιτήσεις του αραβοσίτου κυμαίνονται από 500 έως 800 m³ νερού για την επίτευξη μέγιστης παραγωγής από μια ποικιλία μέσης ωριμότητας σπόρου [3]. Σε χονδρόκοκκα εδάφη παρατηρήθηκε αύξηση της παραγωγής αραβοσίτου από το συνδυασμό βαθιάς άρδευσης και ενσωμάτωσης υπολειμμάτων (άχυρο) με αύξηση του εύρους άρδευσης [4].

Διάφοροι άλλοι ερευνητές [5] [6] [2] [7] [8] [9], που ασχολήθηκαν εκτεταμένα με την άρδευση του αραβοσίτου συγκλίνουν στο ότι η άρδευση είναι σημαντική από την εμφάνιση των αρρένων ταξιανθιών μέχρι την γαλακτώδη ωρίμανση των κόκκων του σπάρδικα. Για τις συνθήκες της Ελλάδας η άρδευση του αραβοσίτου εφαρμόζεται από τον Ιούνιο μέχρι την ωρίμανση, η οποία συμπίπτει συνήθως μέσα έως τέλη Αυγούστου [6] [7] [8] [2], φτάνοντας όμως μερικές φορές έως το πρώτο δεκαπενθήμερο του Σεπτεμβρίου [6] [2]. Οι περισσότερες έρευνες στο συγκεκριμένο θέμα αναφέρονται στην επίδραση της άρδευσης, χρησιμοποιώντας ως συστήματα άρδευσης τον καταιονισμό ή τα αυλάκια. Αντιθέτως, ελάχιστες εργασίες έχουν γίνει με εφαρμογή στάγδην άρδευσης στον αραβόσιτο [6] [2] [7] [8] [9], οι οποίες έκαναν χρήση της μεθόδου του εξατμισιμέτρου για τον υπολογισμό της δόσης άρδευσης. Η μέθοδος αυτή το 2001 χρησιμοποιήθηκε στην Αγγλία ως μέθοδος προγραμματισμού άρδευσης σε ποσοστό 45% των αρδευόμενων εκτάσεων [13]. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα της στάγδην άρδευσης είναι ότι υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία από διαθέσιμα όργανα μέτρησης της εδαφικής υγρασίας [12] [13], ηλεκτρονικών προγραμματιστών και ηλεκτροϋδραυλικών στοιχείων που δίνουν τη δυνατότητα πλήρους αυτοματοποίησης των δικτύων άρδευσης [12] [14].

Συνολικά, στην Ελλάδα ο αραβόσιτος καλύπτει έκταση 2.667.000 στρεμμάτων [2] δηλαδή το 5 % του συνόλου των καλλιεργούμενων εκτάσεων. Το 2004 η μέση στρεμματική απόδοσή του στην Ελλάδα (στοιχεία Υπουργείου Γεωργίας), ήταν 1.010,88 Kg/στρ (Σχήμα 1). Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η διερεύνηση της επίδρασης του εύρους άρδευσης, του υδατικού στρες του φυτού λόγω μεγάλου εύρους άρδευσης και της εξάντλησης της διαθέσιμης εδαφικής υγρασίας μέσω χαρτογράφησης με GIS, στην απόδοση καλλιέργειας αραβοσίτου που αρδεύονταν με σύστημα στάγδην άρδευσης.



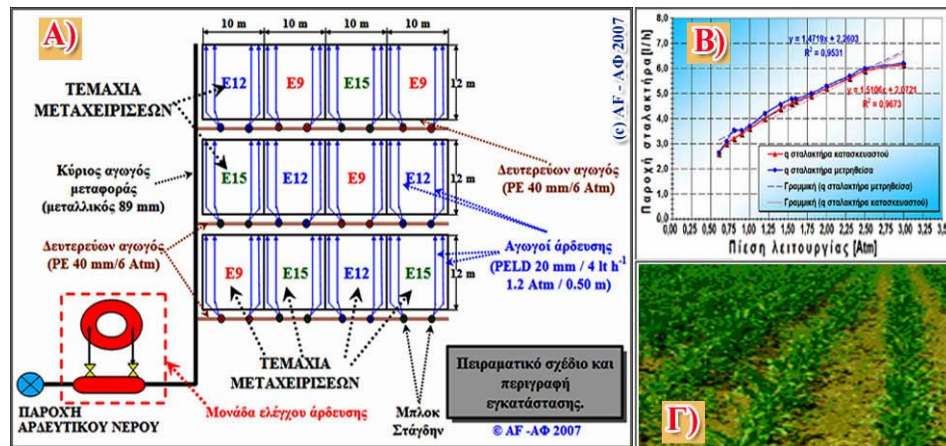
Σχήμα 1. Μέση παραγωγή αραβοσίτου σε Kg/στρ στην Ελλάδα από 2000-2004.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1. Περιγραφή εγκατάστασης

Η έρευνα έγινε κατά την καλλιεργητική περίοδο του έτους 2004 στο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Λάρισας, στην πεδιάδα της Θεσσαλίας (Σχήμα 2.Α). Σε αγροτεμάχιο του αγροκτήματος του ΤΕΙ/Λ έγινε εγκατάσταση συστήματος στάγδην άρδευσης, όπου μελετήθηκε και αξιολογήθηκε η επίδραση του εύρους άρδευσης (9, 12

και 15 ημερών) στην απόδοση του αραβοσίτου. Το σύστημα άρδευσης (Σχήμα 2.Α) αποτελείτο: α) από μονάδα ελέγχου, β) από τον κύριο αγωγό γ) από τους δευτερεύοντες αγωγούς και δ) από τους σταλακτηφόρους σωλήνες (PELD 20 mm/σταλάκτες μαιανδρικής διαδρομής 4 lt ανά h στις 1,2 Atm με ισαποχή σταλακτών 0.50 m) οι οποίοι τοποθετήθηκαν ενδιάμεσα στις γραμμές των φυτών σε ισαποχή (μεταξύ των γραμμών) 1,5 m. Επίσης έγινε εγκατάσταση αισθητήρων μέτρησης εδαφικής υγρασίας (ΕΥ) και μετρήθηκε και αξιολογήθηκε σε καθημερινή βάση η υγρασία του εδάφους.



Σχήμα 2. Α) Σχέδιο διάταξης πειραματικών τεμαχίων και δικτύου άρδευσης. Β) Διάγραμμα πίεσεως-παροχής σταλακτών από τις μετρήσεις κατασκευαστού και τις εργαστηριακές. Γ) Άποψη του πειραματικού αγρού αραβοσίτου στο Τ.Ε.Ι./ Λ.

2.2. Πειραματικό σχέδιο

Τα πειράματα έγιναν το έτος 2004, σε πειραματικό αγρό σε διάταξη πλήρως τυχαιοποιημένων ομάδων που αποτελείτο από τρεις επεμβάσεις με εύρος άρδευσης ανά εννέα (Ε9), ανά δώδεκα (Ε12) και ανά δεκαπέντε (Ε15) ημέρες (για διερεύνηση υδατικού στρες φυτού) επί τέσσερις επαναλήψεις (Σχήμα 2.Α). Η τυχαιοποίηση έγινε με τη μέθοδο των στατιστικών πινάκων. Κάθε πειραματικό τεμάχιο είχε πλάτος 10 m (κάθετα στις γραμμές σποράς) και μήκος 12 m (παράλληλα στις γραμμές σποράς).

2.3. Μεθοδολογία

Έγιναν εργαστηριακές μετρήσεις της παροχής/πίεσης των σταλακτών και σύγκριση με τις τιμές και τα οριζόμενα ως επιτρεπτά όρια από τον κατασκευαστή. Διαπιστώθηκε ότι οι διακυμάνσεις ήταν μέσα στα επιτρεπτά όρια (Σχήμα 2.Β). Επίσης λόγω της μικρής ισαποχής των σταλακτών και του μικρού μήκους γραμμής των σταλακτηφόρων σωλήνων επιτεύχθηκε υψηλή ομοιομορφία άρδευσης που πλησιάζει το 100%.

Για τον προσδιορισμό της Μηχανικής σύστασης του εδάφους χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Βουγιούκου, το pH μετρήθηκε με πεχάμετρο και η οργανική ουσία με τη μέθοδο Υγρής καύσης του δείγματος με θειικό οξύ.

Η σπορά του αραβοσίτου πραγματοποιήθηκε αρχές Απριλίου με σπαρτική μηχανή σιτηρών. Η ποικιλία που χρησιμοποιήθηκε ήταν η PIONEER-Konstantza (Zea mays L.), (Σχήμα 2.Γ) η οποία έχει 125 ημέρες φυσιολογικής ωρίμανσης. Η απόσταση μεταξύ των γραμμών των φυτών ήταν 0,75 m. Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις της κατ' όγκον ΕΥ καθημερινά σε όλη την αρδευτική περίοδο με χρήση της μεθόδου TDR (Time Domain Reflectometry) η οποία είναι μία αξιόπιστη, μη ραδιενεργός μέθοδος, γρήγορη και ανεξάρτητη από τον τύπο του εδάφους [15] [2] [7] [9]. Έγινε χρήση συσκευής TDR του

οίκου ESI, η οποία ελέγχθηκε και βαθμονομήθηκε με εργαστηριακές μετρήσεις στην αρχή της περιόδου. Ο έλεγχος της ΕΥ είναι μια πολύ σύνθετη διαδικασία και η τοποθέτηση ενός αισθητήρα εντός της ζώνης του ριζοστρώματος των φυτών δεν επαρκεί για να εξασφαλίσει τον ικανοποιητικό έλεγχο αυτής. Από αρκετούς ερευνητές [14] [12] [13], για τον αποτελεσματικότερο έλεγχο, προτείνεται η λύση της χρήσης δύο ή περισσότερων αισθητήρων σε διαφορετικά βάθη ώστε να καλύψουν μεγαλύτερο μέρος της ζώνης του ριζοστρώματος. Για το λόγο αυτό και με στόχο την εξασφάλιση της υψηλής ακρίβειας των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκαν καθετήρες προσδιορισμού (probe) της εδαφικής υγρασίας, που είχαν ενσωματωμένους 5 αισθητήρες (sensors), οι οποίοι μετρούσαν την ΕΥ σε βάθη: 0-15, 15-30, 30-45, 45-60 και 60-75 cm και βρίσκονταν μόνιμα εγκατεστημένοι στα πειραματικά τεμάχια και σε συνεχή επαφή με το έδαφος. Η μέθοδος TDR εξασφαλίζει υψηλή ακρίβεια μετρήσεων, όταν οι αισθητήρες προσδιορισμού της ΕΥ βρίσκονται σε συνεχή επαφή με το έδαφος [13] [7] [2] [9]. Από τις μετρήσεις των αισθητήρων TDR καταγράφηκε η ΕΥ για κάθε επέμβαση και υπολογίστηκε σε καθημερινή βάση η εξάντληση της διαθέσιμης υγρασίας (ΕΔΥ) κι από τα δεδομένα δημιουργήθηκαν και αξιολογήθηκαν με χρήση GIS και εργαλείων χωρικής ανάλυσης [12], GIS χάρτες ΕΔΥ που παρουσιάζουν την υπεδάφια κατανομή της, από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι βάθους 0,75 m για τις ημερομηνίες με τα υψηλότερα ποσοστά ΕΔΥ. Ακόμη, μελετήθηκαν τα μετεωρολογικά δεδομένα και υπολογίστηκε η ωφέλιμη βροχόπτωση Pe με την μέθοδο USDA.

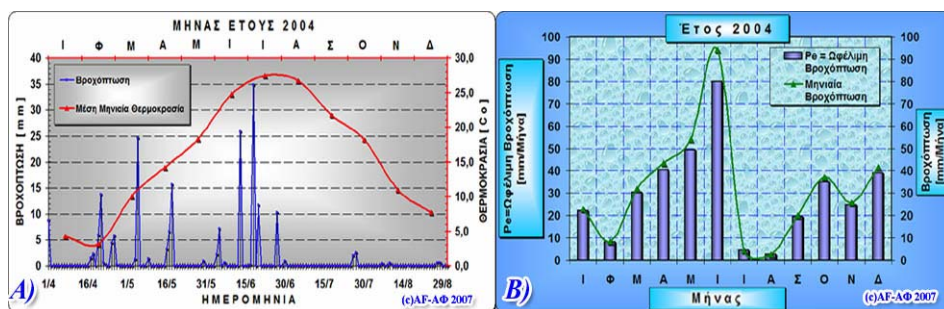
Η δόση άρδευσης για κάθε επέμβαση ήταν ίση με τη συνολική εξατμισοδιαπνοή μεταξύ δύο διαδοχικών αρδεύσεων (λαμβάνοντας υπόψη την ωφέλιμη βροχόπτωση), έτσι όπως μετρίονταν με τη βοήθεια εξατμισομέτρου τύπου Α διορθωμένη με τους αντίστοιχους συντελεστές Kp (του εξατμισομέτρου) και Kc (φυτικός συντελεστής) [16].

Στη γαλακτώδη ωρίμανση των κόκκων του σπάδικα, η εμφάνιση μαύρου στίγματος στο 50 % των κόκκων αποτελεί ένδειξη ότι η καλλιέργεια έχει ωριμάσει πλήρως [10] [6]. Το ανωτέρω κριτήριο χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα για τη διακοπή της άρδευσης. Όταν ωρίμασε πλήρως η καλλιέργεια πραγματοποιήθηκε ο θερισμός των φυτών. Στη συνέχεια έγινε διαχωρισμός του σπάδικα από το φυτό, αφαίρεση (εκκόκκιση) των σπόρων και ζύγισμά τους, για κάθε σειρά φυτών κάθε πειραματικού τεμαχίου. Με τον τρόπο αυτό προσδιορίστηκε επακριβώς η απόδοση του αραβοσίτου για κάθε επέμβαση.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Για τη μελέτη του κλίματος της περιοχής χρησιμοποιήθηκαν οι παρατηρήσεις του μετεωρολογικού σταθμού Λάρισας (Γεωγραφικό πλάτος 39° 39' N και μήκος 22° 27' E, υψόμετρο του Βαρομέτρου 73,6 m) της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας. Η ετήσια βροχόπτωση του 2004 ήταν 387,3 mm (Σχήμα 3). Η μεγαλύτερη μέση μηνιαία βροχόπτωση για το 2004 ήταν $r_v = 94,2$ mm, παρατηρήθηκε τον Ιούνιο και αποτέλεσε έκπληξη για τα κλιματικά δεδομένα της περιοχής. Η μικρότερη μέση μηνιαία βροχόπτωση ήταν $r_s = 2,6$ mm κατά το μήνα Αύγουστο (Σχήμα 3). Το κλίμα της περιοχής χαρακτηρίζεται σαν XERIC MOISTURE REGIME [17]. Η ωφέλιμη βροχόπτωση Pe παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.Β. Από τα Σχήματα 3.Α, και 3.Β φαίνεται ότι κατά τους καλοκαιρινούς η περιοχή μελέτης είχε έλλειμμα υγρασίας και ήταν αναγκαία η εφαρμογή άρδευσης.

Από την εδαφολογική ανάλυση (Πίνακας 1) διαπιστώθηκε ότι το έδαφος του πειραματικού αγρού ήταν αργιλώδες (CL). Η υδραυλική αγωγιμότητα κορεσμού μετρήθηκε με Guelph Permeameter και ήταν 3.0×10^{-5} cm/sec στα πρώτα 15 cm και 3.2×10^{-5} cm/sec σε βάθος 45 cm.



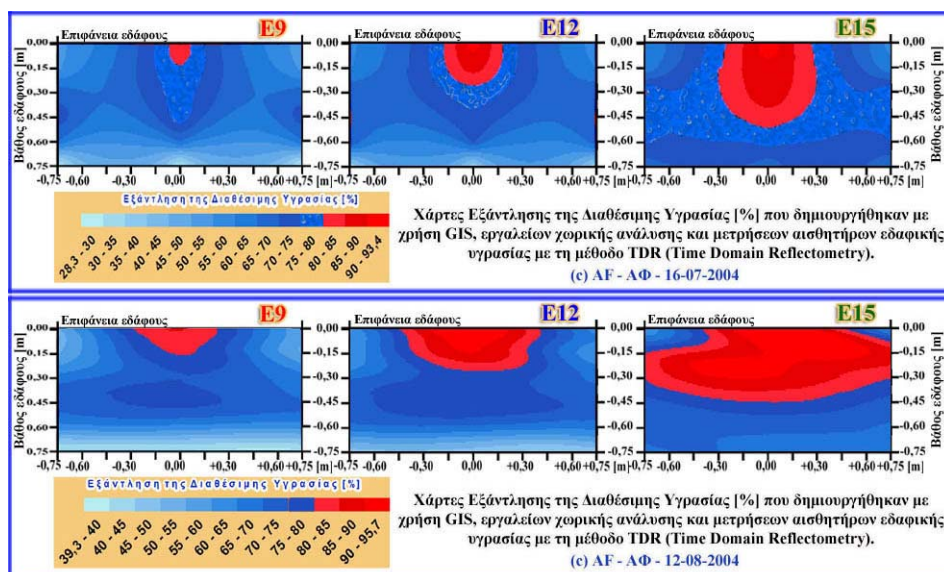
Σχήμα 3. Α) Διάγραμμα ημερήσιας βροχόπτωσης αρδευτικής περιόδου και μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας. Β) Διάγραμμα μηνιαίας ωφέλιμης βροχόπτωσης.

Πίνακας 1. Αποτελέσματα εδαφολογικής ανάλυσης του πειραματικού.

Βάθος [cm]	Μηχ. Σύστ α-ση	Άμμο [%]	Ιλύ [%]	Άργι- λος [%]	Υδατοϊ- κανότητα α [% ξ.β.ε.]	ΣΜΜ [% ξ.β.ε.]	ΦΕΒ [gr/cm ³]	pH	Οργ. ουσία %
0-30	CL	28,5	25,	46,0	31,21	17,1	1,42	7,	1,37
30-	CL	28,4	25,	46,0	31,21	17,1	1,42	7,	1,26
60-	CL	28,4	25,	45,9	31,21	17,1	1,42	7,	1,29

Από τις μετρήσεις (σε 5 βάθη και σε διάφορες θέσεις) των αισθητήρων TDR καταγράφηκε η ΕΥ για κάθε επέμβαση και υπολογίστηκε σε καθημερινή βάση η ΕΔΥ κι από τα δεδομένα δημιουργήθηκαν και αξιολογήθηκαν με χρήση GIS και εργαλείων χωρικής ανάλυσης [12], GIS χάρτες ΕΔΥ που παρουσιάζουν την υπεδάφια κατανομή της, από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι βάθους 0,75 m για τις ημερομηνίες με τα υψηλότερα ποσοστά ΕΔΥ. Αντιπροσωπευτικοί χάρτες ΕΔΥ για κάθε επέμβαση παρουσιάζονται στο Σχήμα 4. Παρατηρούμε στους χάρτες GIS της ΕΔΥ ότι αυξανόμενου του εύρους άρδευσης αυξάνεται στα ανώτερα εδαφικά στρώματα η χωρική επιφάνεια του εδάφους, στην οποία σημειώνονται οι υψηλότερες τιμές ΕΔΥ. Σε διάφορες ημερομηνίες (Ιουλίου-Αυγούστου), η επιφάνεια αυτή διαφοροποιείται και είναι ιδιαίτερα μεγάλη στην επέμβαση Ε15, στην οποία τα φυτά καταπονήθηκαν περισσότερο με αποτέλεσμα τη μείωση της παραγωγής τους (Πίνακας 2). Οι μ.ο. των τιμών της ΕΔΥ ξεπέρασαν τις ανώτατες επιτρεπόμενες για πλήρη κάλυψη των αναγκών του φυτού σε αρδευτικό νερό, χωρίς μείωση παραγωγής, δηλαδή το 65% και 80% αντίστοιχα για τα στάδια της καρποφορίας και της ωρίμανσης σύμφωνα με τους Doorenbos and Kassam (1986) [4]. Εδώ τονίζεται ότι οι απώλειες λόγω βαθιάς διήθησης θεωρούνται αμελητέες λόγω της χρήσης της στάγδην άρδευσης.

Στο Σχήμα 5.Α και 5.Β παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της παραγωγής του αραβοσίτου για το έτος 2004. Παρότι στο εύρος άρδευσης των 9 ημερών έχουμε μεγαλύτερες απώλειες λόγω εξάτμισης σε σχέση με το εύρος των 12 και 15 ημερών, η απόδοση των 9 ημερών ήταν μεγαλύτερη. Από τη στατιστική ανάλυση (στατιστικά test ANOVA και Dunnett T3), που διενεργήθηκε με χρήση του στατιστικού πακέτου SPSS, παρατηρείται (Πίνακας 2) ότι η διαφοροποίηση του εύρους άρδευσης (ανά 9, 12 και 15 ημέρες) επέδρασε στατιστικώς σημαντικά στην απόδοση του αραβοσίτου (επίπεδο σημαντικότητας $p < 0,05$).

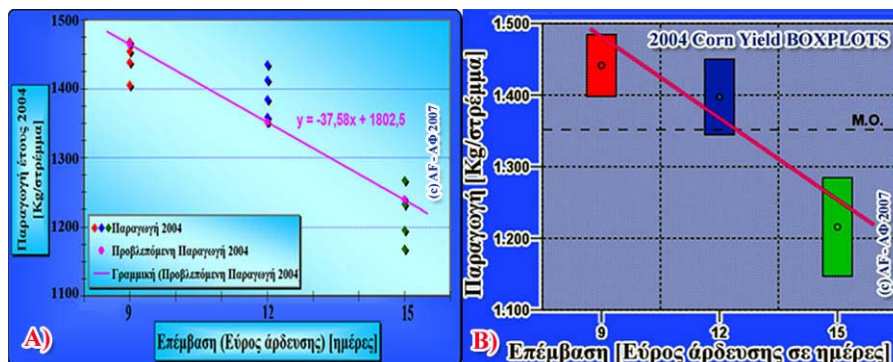


Σχήμα 4. GIS χάρτες με την υπεδάφια κατανομή της ΕΔΥ μέχρι βάθους 0,75 m.

Από τη στατιστική επεξεργασία προσδιορίστηκε η σχέση μεταξύ της παραγωγής σε καρπό του αραβοσίτου και του εύρους άρδευσης. Η σχέση αυτή δίνεται από την εξίσωση (1):

$$Y = -37,58X + 1.802,5 \quad (1)$$

με $R^2=0,9$, όπου Y είναι ο παραγόμενος καρπός σε Kg/στρέμμα και X είναι το εύρος άρδευσης της καλλιέργειας σε ημέρες. Ο υψηλός βαθμός συσχέτισης δείχνει τη σημαντική εξάρτηση της απόδοσης της καλλιέργειας από το εύρος άρδευσης.



Σχήμα 5. Α) Διάγραμμα αποδόσεων των 12 πειραματικών τεμαχίων.
Β) Διάγραμμα box plot της διακύμανσης της παραγωγικότητας του αραβοσίτου.

Διευκρινίζεται ότι οι αποδόσεις που φαίνονται στο Σχήμα 5 και στον Πίνακα 2, αντιστοιχούν σε υγρασία 14 % των κόκκων αραβοσίτου.

Πίνακας 2. Στατιστική ανάλυση παραγωγικότητας αραβοσίτου έτους 2004.

Επέμβαση	Εύρος άρδευσης [ημέρες]	Αριθμός παρατηρή- σεων	Τυπική απόκλιση	Μ.Ο. Παραγωγής [Kg/στρ]
E9	9	4	27,10849	1.441,350 ΣΣ*
E12	12	4	33,12111	1.397,378 ΣΣ*
E15	15	4	43,19004	1.215,872 ΣΣ*
Σύνολο Επεμβάσεων		12	106,76316	1.351,533
Επέμβαση	Στατιστικό test	Τιμή F-test	Σημαντικότητα F	
Όλες	ANOVA	46,368	0,000 *	
Μεταξύ τους	Dunnett T3	-	ΣΣ*=Στατιστικώς Σημαντικό	

(*Επίπεδο σημαντικότητας $p < 0,05$).

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε πείραμα που διενεργήθηκε το έτος 2004 στο αγρόκτημα του Τ.Ε.Ι./Λάρισας μελετήθηκε η επίδραση του εύρους άρδευσης (ανά 9, 12 και 15 ημέρες), της υδατικής καταπόνησης του φυτού και της εξάντλησης της διαθέσιμης υγρασίας (με χρήση μεθόδων και τεχνικών GIS και χωρικής ανάλυσης) στην απόδοση του αραβοσίτου.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η μεγαλύτερη παραγωγή αραβοσίτου παρατηρήθηκε στην επέμβαση με εύρος άρδευσης 9 ημερών. Ακολούθησε η παραγωγή της επέμβασης με εύρος άρδευσης 12 ημερών και τέλος μικρότερη ήταν η παραγωγή στην επέμβαση των 15 ημερών. Οι διαφορές αυτές ήταν στατιστικά σημαντικές (με $p < 0,05$). Επίσης προσδιορίστηκε η σχέση μεταξύ της παραγωγής σε καρπό του αραβοσίτου και του εύρους άρδευσης, η οποία δίνεται από την εξίσωση (1):

$$Y = -37,58X + 1.802,5 \quad (1)$$

με $R^2=0,9$, όπου Y είναι ο παραγόμενος καρπός σε Kg/στρέμμα και X είναι το εύρος άρδευσης της καλλιέργειας σε ημέρες. Το εύρος άρδευσης επέδρασε αρνητικά στην απόδοση των επεμβάσεων 12 και 15 ημερών παρά τις μικρότερες απώλειες λόγω εξάτμισης, και προκάλεσε σημαντικά υψηλότερες τιμές ΕΔΥ (όπως λεπτομερώς έδειξε η χαρτογράφηση GIS). Το γεγονός αυτό οδήγησε τα φυτά σε περιοδικές υδατικές καταπονήσεις (στρες), κατά τους μήνες Ιούλιο-Αύγουστο, με αποτέλεσμα την στατιστικά σημαντική μείωση της παραγωγής των επεμβάσεων E15 και E12.

Συμπερασματικά προκύπτει ότι η άρδευση για τις συγκεκριμένες εδαφοκλιματικές συνθήκες (αργιλώδες έδαφος και μεσογειακού τύπου Csa κλίμα κατά Köppen [12], ή XERIC MOISTURE REGIME [17]), θα πρέπει να γίνεται κάθε 9 ημέρες αντί για 12 ή 15 ημέρες (όπως συχνά συμβαίνει στην περιοχή).

Τα πειράματα συνεχίζονται με διαφορετικές τιμές εύρους άρδευσης και σε άλλους τύπους εδαφών, ώστε να προκύψουν περισσότερα και ασφαλέστερα συμπεράσματα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.

1. Musick, J.T., Pringle, F.B., Harman, W.L., and Stewart B.A., 1990. Long-term irrigation trends: Texas High Plains. *Appl. Eng. Agric.* 6: 717-724.
2. Φιλίντας, Θ.Αγ., 2003. *Καλλιέργεια Αραβοσίτου στην Ελλάδα: Αύξηση και ανάπτυξη, διαχείριση, απόδοση και περιβαλλοντικές επιπτώσεις*, Τμήμα Περιβάλλοντος, Σχολή Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Μυτιλήνη, Ελλάδα.
3. Doorenbos, J., Kassam A.H., 1986. *Yield Response to Water*, *FAO Irrigation and Drainage Paper* 33, FAO, Rome, Italy, pp.101-104.

4. Gill, K.S., Gajri, P.R., Chaudhary, M.R., Singh, B., 1996. Tillage, mulch and irrigation effects on corn (*Zea mays* L.) in relation to evaporative demand. *Soil & Tillage Research*, 39: 213-227.
5. Zarogiannis, V., 1979. Beregnung und Standraum bei Mais (*Zea mays* L.) für Bodenkultur. *In Wien*, 30(3): 281-303.
6. Danalatos, G.N., 1992. *Quantified analysis of selected land use systems in the Larissa region, Greece*, PhD Thesis, Agricultural University, Wageningen, pp.133, 175-207.
7. Ντιούδης, Π., Φιλίντας, Αγ., Λέλλης, Θ. και Σακελλαρίου, Μ., 2003. Παραγωγικότητα καλλιέργειας αραβοσίτου συναρτήσει του εύρους άρδευσης με σύστημα στάγδην, *Πρακ. 3^{ου} Παν. Συν. Γεωργικής Μηχανικής*, Θεσσαλονίκη, Ελλάδα- Μάιος 2003, σελ.69-76.
8. Filintas, Th.Ag., Dioudis, I.P., Pateras, T.D., Hatzopoulos, N.J. and Toullos, G.L., 2006. Drip Irrigation Effects in Movement, Concentration and allocation of Nitrates and Mapping of Nitrates with GIS in an Experimental Agricultural Field. *Proc. of Int. Conference on: Information Systems in Sustainable Agriculture, Agroenvironment and Food Technology(HAICTA)*, Volos, Greece- September 2006, pp.253-262.
9. Filintas, Th.Ag., Dioudis, P., Koutseris, E., Papadopoulos, A., 2007. Soils Nitrates GIS mapping, Irrigation water and applied N-fertilizer effects in soils nitrogen depletion in a drip irrigated experimental field in Thessaly basin. *Proc.of 3rd Int. Conference on: Energy, Environment, Ecosystems and Sustainable Development (EEESD'07)*, Agios Nikolaos, Crete Island, Greece- July 2007, pp.486-492.
10. Rench, W.E., Shaw, R.H., 1971. Black layer development in corn. *Agron. Journal*, 63: 303-305.
11. Weatherhead, E.K., Danert, K., 2002. *Survey of irrigation of outdoor crops in 2001 – England*, Cranfield University, Silsoe.
12. Φιλίντας, Θ.Αγ., 2005. *Συστήματα χρήσης γης με έμφαση στα γεωργικά μηχανήματα στις αρδεύσεις και στην νιτρορύπανση, με χρήση Δορυφορικής Τηλεπισκόπησης, Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών και Μοντέλων, σε επίπεδο λεκάνης απορροής στην Κεντρική Ελλάδα, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Τμήμα Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Μυτιλήνη, Ελλάδα.*
13. Cary, J.W. and Fisher, H.D., 1983. Irrigation decision simplified with electronics and soil water sensors. *Soil Science Society of American Journal*, Vol. 47, 1219-1223.
14. Charlesworth, P., 2000. *Soil Water Monitoring*, CSIRO Land and Water, Australia.
15. E.S.I.-Environmental Sensors, INC., 1997. *MP-917 Soil Moisture Instrument Operational Manual*. E.S.I., Canada.
16. Allen, R.G., Pereira, S.L., Raes, D. and Smith, M., 1998. *Crop Evapotranspiration Guidelines for computing crop water requirements*, *FAO Irrigation and Drainage Paper 56*, FAO, Rome, Italy.
17. Soil Survey Staff, 1975. *Soil Taxonomy: A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys*, USDA Natural Resources Conservation Service. USA.

(207)

ΝΕΟΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΤΗΣ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ

Β. Άμπας¹, Ε. Μπαλτάς² και Δ. Παπαμιχαήλ²

¹ Νομαρχιακή Αυτοδιοίκηση Φλώρινας, Πτολεμαίων 1, 53100 Φλώρινα,
ambasv@gmail.com

² Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Γεωπονική Σχολή, Τομέας Εγγείων
Βελτιώσεων, Γεωργ. Μηχ. & Εδαφ., Τ.Κ. 54124, Θεσ/νίκη

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι να δοθούν νέες σχέσεις για τον υπολογισμό του συντελεστή b της τροποποιημένης μεθόδου Blaney and Criddle για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας αναφοράς. Οι υφιστάμενες σχέσεις των Frevent et al. [6] και Allen and Pruitt [1] έδωσαν αποκλίσεις 15% και 12% αντίστοιχα σε σχέση με τις τιμές που δίνονται από τους αρχικούς πίνακες κατά την εφαρμογή τους σε πραγματικά δεδομένα. Με την χρήση συντελεστών βαρύτητας ανάλογων της συχνότητας εμφάνισης των μετεωρολογικών παραμέτρων που επηρεάζουν τον συντελεστή b δίνεται σχέση που επιτυγχάνει καλύτερη προσαρμογή του συντελεστή b .

NEW FACTORS FOR THE ESTIMATION OF THE EVAPOTRANSPIRATION PARAMETERS

V. Ampas¹, E. Mpaltas² D. Papamichail²

¹ Prefecture of Florina, Ptolemeon 1, 53100, Florina, ambasv@gmail.com

² Aristotle University of Thessaloniki, Sch. of Agriculture, Department of Hydraulics,
Soil Science and Agriculture Engineering, 54124, Thessaloniki,

ABSTRACT

Aim of this paper is to present new equations for the estimation of the factor b in the modified Blaney and Criddle for reference crop evapotranspiration. The existing relationships of Frevent et al. [6] and Allen and Pruitt [1] gave variation 15% and 12%, correspondence, to the initial values that are given in tables. The use of weighting factors gave new correlation coefficients for the estimation of b . The weighting factors were based on the frequency of each meteorological parameter, which influences b , measured in Florina's meteorological stations.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο υπολογισμός της εξατμισοδιαπνοής των καλλιεργειών είναι ένα αντικείμενο πολύ απαραίτητο στα διαχειριστικά σχέδια των υδατικών πόρων, στις μελέτες περιβαλλοντικών επιπτώσεων, στον προγραμματισμό των αρδεύσεων κ.α.

Ένας μεγάλος αριθμός μεθόδων έχει αναπτυχθεί από πάρα πολλούς επιστήμονες σε όλον τον κόσμο για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής με διαφορετικά κλιματικά δεδομένα. Η τροποποιημένη μέθοδος Blaney-Cridlle είναι μία από τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται ευρέως για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας αναφοράς. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί ως μετεωρολογικά δεδομένα την θερμοκρασία, σχετική υγρασία, ταχύτητα του ανέμου, σχετική ηλιοφάνεια και διάφορους συντελεστές οι οποίοι δίνονται από σχέσεις ή πίνακες. Ο συντελεστής b είχε δοθεί μόνο σε πίνακες. Οι Frevert et al (1983) εφαρμόζοντας γραμμική παλινδρόμηση υπολόγισαν τον συντελεστή b με μία σχέση με τις οποίες αντικατέστησαν αυτούς τους πίνακες, η σχέση αυτή είχε συντελεστή προσδιορισμού 0.989. Το 1991 οι Allen and Pruitt δίνοντας πιο σύνθετη σχέση πέτυχαν ακόμη μεγαλύτερες τιμές του συντελεστή προσδιορισμού που έφτασε το 0.998.

Η εφαρμογή των σχέσεων αυτών σε πραγματικά δεδομένα από τους αυτόματους μετεωρολογικούς σταθμούς του Νομού Φλώρινας έδινε ένα μεγαλύτερο σφάλμα από το αναμενόμενο. Η διερεύνηση του σφάλματος αυτού οδήγησε στο συμπέρασμα ότι οι σχέσεις αυτές δίνουν πολύ καλά αποτελέσματα στο σύνολο του πίνακα, δηλαδή δίνουν πολύ καλά αποτελέσματα ακόμη και σε ακραίες τιμές των μετεωρολογικών παραμέτρων, που δεν είναι συχνές, ενώ σε συχνές τιμές των μετεωρολογικών παραμέτρων δίνουν λιγότερο ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Τα αποτελέσματα μπορούν να βελτιωθούν με τη χρήση συντελεστών βαρύτητας. Έτσι δίνονται νέες σχέσεις για τον υπολογισμό του συντελεστή b ώστε τα αποτελέσματα να είναι πιο σωστά στις συνήθεις τιμές των μετεωρολογικών παραμέτρων.

2. Η ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΣ BLANEY – CRIDLLE ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ ΤΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ

Οι Doorenbos and Pruitt το 1977 τροποποιώντας ριζικά την αρχική σχέση των Blaney and Criddle έδωσαν μια νέα μορφή που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς από χορτοτάπητα. Η μέθοδος αυτή αναφέρεται σαν τροποποιημένη μέθοδος Blaney and Criddle κατά FAO-24 γιατί βασίζεται στη γραμμική σχέση που παρατηρήθηκε μεταξύ μετρημένων τιμών της εξατμισοδιαπνοής και του παράγοντα f των Blaney and Criddle σε διάφορες πειραματικές θέσεις σε πολλά μέρη του κόσμου. Η σχέση αυτή έχει τη μορφή:

$$ET_o = a + bf \quad (1)$$

Όπου :

$$f = (0,46T + 8,13)p \quad (2)$$

$$a = 0,0043RH_{min} - n/N - 1,41 \quad (3)$$

ET_o , η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς με βάση χορτοτάπητα σε mm/d,

T , η μέση ημερήσια θερμοκρασία της ατμόσφαιρας σε $^{\circ}C$,

p , το ημερήσιο ποσοστό ωρών ημέρας του έτους που δίνεται σε Πίνακες,

RH_{min} , η ελάχιστη σχετική υγρασία της ατμόσφαιρας σαν ποσοστό %, n/N , η σχετική ηλιοφάνεια (n είναι η πραγματική ημερήσια ηλιοφάνεια, N είναι η

μέγιστη ηλιοφάνεια που δίνεται από πίνακες ή σχέσεις),

U_2 , η ταχύτητα του ανέμου κατά τη διάρκεια της ημέρας σε ύψος 2m πάνω από το έδαφος σε m/s.

b, συντελεστής που δίνεται από πίνακα σαν συνάρτηση της ελάχιστης σχετικής υγρασίας, της σχετικής ηλιοφάνειας και της ταχύτητας του ανέμου.

Πίνακας 1. Τιμές του συντελεστή b της τροποποιημένης μεθόδου των Blaney and Criddle για $U_2=0$.

n/N	RH _{min}					
	0	20	40	60	80	100
0,0	0,84	0,80	0,74	0,64	0,52	0,38
0,2	1,03	0,95	0,87	0,76	0,63	0,48
0,4	1,22	1,10	1,01	0,88	0,74	0,57
0,6	1,38	1,24	1,13	0,99	0,85	0,66
0,8	1,54	1,37	1,25	1,09	0,94	0,75
1,0	1,68	1,50	1,36	1,18	1,04	0,84

Π

2.1. Σχέσεις υπολογισμού του συντελεστή b

Για τον ευκολότερο και αμεσότερο υπολογισμό του συντελεστή b οι Frevert et al. (1983) χρησιμοποιώντας τις τρεις μεταβλητές (RH_{min}, n/N, U_2) και δύο ψευδομεταβλητές έδωσαν τη σχέση:

$$b = 0.81917 - 0.0040922 \text{ RH}_{\min} + 1.0705n/N + 0.065649 U_2 - 0.0059684 \text{ RH}_{\min} n/N - 0.0005967 \text{ RH}_{\min} U_2 \quad (4)$$

Η σχέση αυτή είχε συντελεστή προσδιορισμού $r^2=0.989$ και μέσο τετραγωνικό άθροισμα τετραγώνων (RMSE) 0.0055. Η μέγιστη τιμή της ποσοστιαίας διαφοράς του σφάλματος ήταν 14.9%.

Στον παρακάτω πίνακα 2 φαίνεται η μέση τιμή του μέσου τετραγωνικού αθροίσματος τετραγώνων του σφάλματος (RMSE) για τη σχέση των Frevert et al, όταν διατηρούμε σταθερές κάθε μία από τις διακριτές τιμές των μετεωρολογικών μεταβλητών που υπάρχουν στον αρχικό πίνακα των Doorenbos and Pruitt. Από την εξέταση αυτού του πίνακα παρατηρούμε πως η σχέση των Frevert et al. δεν δίνει εξίσου καλά αποτελέσματα για όλες τις τιμές των μετεωρολογικών δεδομένων. Έτσι, εξετάζοντας τον πίνακα 2, διαπιστώνουμε πως όταν η ταχύτητα του ανέμου (U_2) είναι 0, ή όταν η ελάχιστη σχετική υγρασία (RH_{min}) είναι 0, ή όταν η σχετική ηλιοφάνεια (n/N) είναι 1 η σχέση δεν δίνει πολύ καλά αποτελέσματα.

Πίνακας 2. Μέσο τετραγωνικό άθροισμα τετραγώνων του σφάλματος (RMSE) για κάθε είδος μετεωρολογικών δεδομένων της σχέσης των Frevert et al

U_2	RMSE	RH _{min}	RMSE	n/N	RMSE
0 ≤ n/N ≤ 1, 0 ≤ RH _{min} ≤ 100		0 ≤ n/N ≤ 1, 0 ≤ U_2 ≤ 10		0 ≤ U_2 ≤ 10, 0 ≤ RH _{min} ≤ 100	
0	0,01227	0	0,0130	0,0	0,0097
2	0,00548	20	0,0094	0,2	0,0065
4	0,00492	40	0,0076	0,4	0,0050
6	0,00620	60	0,0066	0,6	0,0056
8	0,00654	80	0,0033	0,8	0,0081
10	0,01000	100	0,0042	1,0	0,0113

Μια άλλη σχέση για τον υπολογισμό του συντελεστή b δόθηκε αργότερα από τους Allen and Pruitt (1991) με την χρήση των δύο μεταβλητών και έξι ψευδομεταβλητών:

$$b = 0.908 - 0.00483 RH_{\min} + 0.7949n/N + 0.0768 [\ln(U_2+1)]^2 - 0.0038 RH_{\min} n/N - 0.000443 RH_{\min} U_2 + 0.281 [\ln(U_2+1)] [\ln(n/N+1)] - 0.00975 [\ln(U_2+1)] [\ln(RH_{\min}+1)] 2 [\ln(n/N+1)] \quad (5)$$

Η σχέση αυτή είχε συντελεστή προσδιορισμού $r^2=0.998$, και μέσο τετραγωνικό άθροισμα τετραγώνων του σφάλματος (RMSE) 0.0013. Η μέγιστη τιμή της ποσοστιαίας διαφοράς του σφάλματος ήταν 11.8%.

Στον παρακάτω πίνακα 3 φαίνεται η μέση τιμή του μέσου τετραγωνικού αθροίσματος τετραγώνων του σφάλματος (RMSE) για τη σχέση των Allen and Pruitt, όταν διατηρούμε σταθερές κάθε μία από τις διακριτές τιμές των μετεωρολογικών μεταβλητών που υπάρχουν στον αρχικό πίνακα των Doorenbos and Pruitt. Από την εξέταση αυτού του πίνακα παρατηρούμε πως η σχέση των Allen and Pruitt δεν δίνει εξίσου καλά αποτελέσματα για όλες τις τιμές των μετεωρολογικών δεδομένων. Έτσι όταν η ταχύτητα του ανέμου (U_2) είναι 0, ή όταν η ελάχιστη σχετική υγρασία ($RH_{\min}$) είναι 0, ή όταν η σχετική ηλιοφάνεια (n/N) είναι 0 η σχέση δεν δίνει, σχετικά, πολύ καλά αποτελέσματα.

Πίνακας 3. Μέσο τετραγωνικό άθροισμα τετραγώνων του σφάλματος (RMSE) για κάθε είδος μετεωρολογικών δεδομένων της σχέσης των Allen and Pruitt

U_2	RMSE	$RH_{\min}$	RMSE	n/N	RMSE
$0 \leq n/N \leq 1,$ $0 \leq RH_{\min} \leq 100$		$0 \leq n/N \leq 1,$ $0 \leq U_2 \leq 10$		$0 \leq U_2 \leq 10,$ $0 \leq RH_{\min} \leq 100$	
0	0,00417	0	0,0045	0,0	0,0041
2	0,00363	20	0,0024	0,2	0,0035
4	0,00278	40	0,0030	0,4	0,0033
6	0,00247	60	0,0032	0,6	0,0029
8	0,00238	80	0,0022	0,8	0,0027
10	0,00372	100	0,0038	1,0	0,0029

3. ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΣΧΕΣΕΩΝ ΣΤΙΣ ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ ΠΙΝΑΚΑ

Ο προσδιορισμός μαθηματικών σχέσεων από ορισμένα διακεκριμένα σημεία μιας συνάρτησης (που μπορούν π.χ. να προέρχονται από κάποια πειραματική διαδικασία), προκύπτει πολλές φορές κατά την μελέτη πρακτικών ή θεωρητικών προβλημάτων. Οι μαθηματικές αυτές σχέσεις είναι πολύ χρήσιμες για τον υπολογισμό αγνώστων τιμών της συνάρτησης ή για τον υπολογισμό των διαφόρων παραγώγων της. Στόχος του προσδιορισμού είναι η μαθηματική σχέση να περιγράφει όσο το δυνατόν πιο ικανοποιητικά τα διακριτά σημεία και όχι να υπολογίζει (περνά) ακριβώς όλα σημεία μιας και γίνεται δεκτό ότι όλα αυτά περιέχουν πάντοτε κάποιο τυχαίο σφάλμα.

Η γραμμική παλινδρόμηση είναι η πιο συνηθισμένη μέθοδος για τον προσδιορισμό της μαθηματικής σχέσης ανάμεσα σε δεδομένα. Η μέθοδος στηρίζεται στη ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης του αθροίσματος των τετραγώνων των διαφορών ανάμεσα στις δοσμένες και υπολογισμένες τιμές.

$$\min \sum (b_i - bc_i)^2 \quad (6)$$

Ανάλογα με τον αριθμό των μεταβλητών ή ψευδομεταβλητών (μετασχηματισμών) που επιλέγουμε να έχουμε, η ελαχιστοποίηση επιτυγχάνεται με την επίλυση ενός συστήματος εξισώσεων, που ονομάζονται κανονικές εξισώσεις. Η επίλυση του συστήματος των εξισώσεων μας δίνει τους συντελεστές των μεταβλητών.

Η γραμμική παλινδρόμηση εφαρμόστηκε και από τις δύο ομάδες επιστημόνων για την εξαγωγή των σχέσεων (4) και (5).

Μία σημαντική παραδοχή που γίνεται κατά την εφαρμογή των ελαχίστων τετραγώνων είναι η ομοσκεδαστικότητα, σύμφωνα με την οποία η διακύμανση του υπολειμματικού σφάλματος είναι σταθερό για όλες τις τιμές των μεταβλητών. Αν οι μεταβλητές έχουν διαφορετική διακύμανση σφάλματος σε διάφορα εύρη τιμών τότε οι εκτιμημένοι συντελεστές παλινδρόμησης θα δίνουν υπερβολικά μεγάλο σφάλμα σε κάποια εύρη τιμών και υπερβολικά μικρό σφάλμα σε άλλα εύρη.

Η παραπάνω παραδοχή μπορεί να αντισταθμισθεί με τη χρήση συντελεστών βαρύτητας. Η μέθοδος τότε ονομάζεται σταθμισμένα τετράγωνα και η αντικειμενική συνάρτηση που πρέπει να ελαχιστοποιηθεί είναι:

$$\min \sum w_i (b_i - bc_i)^2 \quad (7)$$

Λαμβάνοντας υπ' όψη ότι:

- η διακύμανση της διαφοράς ανάμεσα σε υπολογισμένες τιμές και στις τιμές από τον πίνακα δεν είναι σταθερή, όπως φαίνεται από τους πίνακες 2 και 3.
- μας ενδιαφέρει οι σχέσεις να έχουν καλύτερη προσαρμογή στις τιμές οι οποίες παρατηρούνται πιο συχνά κατά την εφαρμογή τους σε πραγματικά δεδομένα

συμπεραίνουμε ότι πρέπει να χρησιμοποιήσουμε σταθμισμένα ελάχιστα τετράγωνα. Επιλέγοντας κατάλληλους συντελεστές βαρύτητας, οι οποίοι σχετίζονται με τη συχνότητα εμφάνισης των μετεωρολογικών παραμέτρων που επηρεάζουν το συντελεστή b , θα επιτευχθεί καλύτερη προσαρμογή της σχέσης στα εύρη τιμών που έχουν μεγαλύτερη συχνότητα, δηλαδή οι υπολογισμένες τιμές θα δίνουν μικρότερη διαφορά στις πιο συχνές τιμές και μεγαλύτερη διαφορά στις πιο σπάνιες τιμές. Έτσι μεγαλύτερος αριθμός πραγματικών δεδομένων θα υπολογισθεί με μικρότερο σφάλμα, συνεπώς το μέσο τετραγωνικό σφάλμα θα μειωθεί.

4. ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στον νομό της Φλώρινας λειτουργούν 9 αυτόματοι μετεωρολογικοί σταθμοί. Από τους τέσσερις πεδινούς μετεωρολογικούς σταθμούς, που έχουν τα μετεωρολογικά δεδομένα που χρειάζονται, υπάρχει ένα σύνολο 5056 ημερήσιων μετεωρολογικών δεδομένων με ταυτόχρονες παρατηρήσεις σχετικής υγρασίας, ταχύτητας ανέμου και διάρκειας ηλιοφάνειας.

Αν υπολογίσουμε για τις 5056 μετεωρολογικές μετρήσεις τις τιμές του συντελεστή b από τον πίνακα και τις συγκρίνουμε με τις τιμές που υπολογίζονται από τις δύο σχέσεις το μέσο τετραγωνικό άθροισμα τετραγώνων του σφάλματος (RMSE) θα πάρει την τιμή 0.00065 για την σχέση των Frevert et al. και 0.00030 για την σχέση των Allen and Pruitt.

Σχήμα 1. Νομός Φλώρινας



Για την εφαρμογή των σταθμισμένων ελαχίστων τετραγώνων χρησιμοποιούνται συντελεστές βαρύτητας οι οποίοι υπολογίζονται από την σχέση:

$$w_i = f(RH_{\min}) * g(U_2) * h(n/N), \quad (8)$$

όπου $f(RH_{\min})$, $g(U_2)$, $h(n/N)$ είναι οι μερικοί συντελεστές βαρύτητας για κάθε μία από τις μετεωρολογικές παραμέτρους που επηρεάζουν το συντελεστή b . Κάθε ένας από τους μερικούς συντελεστές βαρύτητας ισούται με την σχετική συχνότητα εμφάνισης που αντιστοιχεί στο εύρος της διακριτής τιμής i .

Έτσι τα δεδομένα αυτά χωρίστηκαν σύμφωνα με τις κλάσεις του πίνακα που δίνει τον συντελεστή b και παίρνουμε τις συχνότητες εμφάνισης των τιμών σε κάθε μια κλάση.

Πίνακας 4. Εκατοστιαίο ποσοστό εμφάνισης μετεωρολογικών δεδομένων

n/N		U ₂		RH _{min}	
0,0-0,2	15,50%	0-2	75,19%	0-20	2,45%
0,2-0,4	9,03%	2-4	19,55%	20-40	30,68%
0,4-0,6	11,53%	4-6	4,55%	40-60	33,29%
0,6-0,8	22,23%	6-8	0,63%	60-80	23,43%
0,8-1,0	41,72%	8-10	0,08%	80-100	10,16%

Αναλύοντας την συχνότητα εμφάνισης των μετεωρολογικών δεδομένων στα όρια των κλάσεων παίρνουμε τους συντελεστές βαρύτητας για τις διακριτές τιμές του πίνακα:

Πίνακας 5. Συντελεστές βαρύτητας για το Ν. Φλώρινας

n/N		U ₂		RH _{min}	
0	8	0	37,5	0	1
0,2	12	2	47	20	16,5
0,4	10	4	13	40	32
0,6	17	6	2,5	60	28,5
0,8	32	8	0	80	17
1,0	21	10	0	100	5

Εδώ θα πρέπει να συγκρίνουμε τους πίνακες 2 και 3 που δίνουν το σφάλμα (RMSE) με τον παραπάνω πίνακα 5. Παρατηρούμε πως εκεί που έχουμε την μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης μετεωρολογικών δεδομένων έχουμε και μεγάλο, σχετικά, σφάλμα.

Χρησιμοποιώντας τους όρους της σχέσης των Frevert et al. Η ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης μας δίνει την σχέση:

$$b = 0,88165 + 0,857596 \, n/N - 0,00454 \, RH_{\min} + 0,093803 \, U_2 - 0,00405 \, RH_{\min} \, n/N - 0,00087 \, RH_{\min} \, U_2 \quad (9)$$

Για τις 5056 μετεωρολογικές μετρήσεις που καταγράφηκαν στον Νομό της Φλώρινας το μέσο τετραγωνικό άθροισμα τετραγώνων του σφάλματος (RMSE) που δίνει η παραπάνω σχέση είναι 0.00023 μικρότερο από αυτό που δίνουν και οι δύο άλλες σχέσεις.

Για το σύνολο του Ελλαδικού γεωργικού χώρου και θεωρώντας ότι επικρατεί υψηλή ηλιοφάνεια, ασθενείς και μέτριοι άνεμοι και μέση σχετική υγρασία έχουμε τους συντελεστές βαρύτητας του παρακάτω πίνακα 6.

Πίνακας 6. Συντελεστές βαρύτητας					
n/N		U ₂		RH _{min}	
0	0	0	20	0	5
0,2	0	2	30	20	20
0,4	10	4	30	40	40
0,6	30	6	15	60	30
0,8	40	8	5	80	5
1,0	20	10	0	100	0

Τότε η σχέση υπολογισμού του συντελεστή b δίνεται από την σχέση:

$$b = 0,78652 + 1,00859 \, n/N - 0,0026183 \, RH_{\min} + 0,0915796 \, U_2 - 0,0065518 \, RH_{\min} \, n/N - 0,0009565 \, RH_{\min} \, U_2 \quad (10)$$

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία εξετάστηκαν οι σχέσεις των Frevert et al (1983), και Allen and Pruitt (1991) που έχουν δοθεί για τον υπολογισμό του συντελεστή b της τροποποιημένης μεθόδου Blaney and Criddle υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής.

Οι σχέσεις που έχουν δοθεί ελαχιστοποιούν το άθροισμα των τετραγώνων των διαφορών, χρησιμοποιώντας όλο το φάσμα των παραμέτρων του πίνακα εξίσου. Από την σύγκριση των τιμών των σχέσεων και των πινάκων παρατηρήθηκε πως για κάποιες τιμές των μετεωρολογικών παραμέτρων υπάρχει μεγαλύτερη απόκλιση.

Από τα ημερήσια δεδομένα των αυτόματων μετεωρολογικών σταθμών εντοπίστηκαν οι τιμές των RH_{min}, n/N, U₂, που έχουν τη μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης.

Οι τιμές με ταχύτητα U₂=0 εμφανίσθηκε η μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης μετεωρολογικών παρατηρήσεων αλλά και η μεγαλύτερη απόκλιση των τιμών που δίνουν οι σχέσεις των Frevert et al., και Allen and Pruitt με τις τιμές του πίνακα.

Με σκοπό την καλύτερη προσαρμογή των σχέσεων στις συχνότερες τιμές εμφάνισης των μετεωρολογικών δεδομένων, και όχι στις ακραίες τιμές, εξετάσθηκε η χρησιμοποίηση συντελεστών βαρύτητας στην ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης. Οι συντελεστές βαρύτητας υπολογίσθηκαν από τις σχετικές τιμές εμφάνισης των μετεωρολογικών δεδομένων.

Με την χρήση των συντελεστών βαρύτητας, δόθηκε νέα σχέση υπολογισμού του συντελεστή b χρησιμοποιώντας τους όρους της σχέσης των Frevert et al, που είναι πιο

απλοί από του όρους της σχέσης των Allen and Pruitt.

Εφαρμογή της νέας σχέσης (11) στα μετεωρολογικά δεδομένα από τους μετεωρολογικούς σταθμούς της Φλώρινας έδωσε μέσο τετραγωνικό άθροισμα τετραγώνων των διαφορών ανάμεσα στις τιμές που υπολογίζονται από τον πίνακα και τη σχέση 0.00023. Οι αντίστοιχες τιμές για την σχέση Frevert et al και Allen and Pruitt είναι 0.00065 και 0.00030 αντίστοιχα.

Πρέπει να χρησιμοποιηθούν συντελεστές βαρύτητας για την εκτίμηση του συντελεστή b ώστε να προσαρμόζεται καλύτερα σε παρατηρούμενες τιμές των μετεωρολογικών παραμέτρων. Έτσι στις συνήθεις τιμές μετεωρολογικών δεδομένων θα υπάρχει σωστότερος υπολογισμός της εξατμισοδιαπνοής.

Συμπερασματικά, σε κάθε νέα σχέση θα πρέπει να εξετάζεται η ομοιομορφία προσαρμογής της σε δεδομένα. Θα πρέπει να χρησιμοποιούνται συντελεστές βαρύτητας ώστε τα αποτελέσματα να προσαρμόζονται στις καλύτερα σε επιλεγμένες τιμές.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Allen, R.G. and W. O. Pruitt, 1991. FAO-24 reference evapotranspiration factors. J. Irrigation and Drainage Engng., ASCE117(IR5): 758-773.
2. Άμπας Β., 1996. Αυτόματη βαθμονόμηση μαθηματικών μοντέλων ανοιχτών αγωγών, Διπλωματική Μεταπτυχιακή διατριβή, Α.Π.Θ.
3. Blaney H.F. and Criddle W.D., 1950. Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data. U.S.D.A. Soil Conservation Service SCS – TP96.
4. Blaney H.F. and Criddle W.D., 1962. Determining consumptive use and irrigation water requirements. U.S.D.A. Technical Bull
5. Doorenbos J. and W. O. Pruitt, 1977. Guidelines for prediction crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper 24, FAO, Rome, 179
6. Frevert, D.K., R.W. Hill and B.C. Braaten, 1983. Estimation of FAO evapotranspiration coefficients. J. Irrigation and Drainage Engng., ASCE109(IR2): 265-270
7. Μπαμπατζιμόπουλος Χρ., 1991. Αριθμητική Ανάλυση. Α.Π.Θ.
8. Παπαζαφειρίου Ζ., 1999. Οι ανάγκες σε νερό των καλλιεργειών. ΖΗΤΗ. p162-165.
9. Παπαμιχαήλ Δ., 1993. Προχωρημένη μηχανική αρδεύσεων. Α.Π.Θ.
10. Wiens G. E., Egwald Mathematics: Linear Algebra Systems of Linear Equations
11. Garson G. D., 2006, 2007 Weighted Least Squares (WLS) Regression

(212)

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΥΠΟΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΚΑΙ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΣΤΑΓΔΗΝ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΣΕ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΚΑΛΑΜΠΟΚΙΟΥ

Δ. Καλφούντζος¹, Ι. Αλεξίου¹, Σ. Κωτσόπουλος¹

¹ΕΘΙΑΓΕ-Ινστιτούτο Χαρτογράφησης και Ταξινόμησης Εδαφών Λάρισα
Θεοφράστου 1, Λάρισα 413 35, E-mail: kalfountzos@nagref.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η υποεπιφανειακή μέθοδος στάγδην άρδευσης (ΥΣΑ) και η επιφανειακή (ΕΣΑ) εφαρμόστηκαν κατά την διάρκεια των ετών 2004, 2005 και 2006 σε πειραματικό αγρό του ΕΘ.Ι.ΑΓ.Ε. Λάρισας με σκοπό την επίδραση της χρήσης του νερού στην καλλιέργεια του καλαμποκιού. Η τοποθέτηση των υπόγειων σταλακτηφόρων σωλήνων έγινε από το έτος 2001 σε βάθος 45 cm από την επιφάνεια του εδάφους. Κατά την διάρκεια των ετών 2001-2003 το σύστημα λειτούργησε κανονικά χωρίς κανένα πρόβλημα για άρδευση σε καλλιέργεια βαμβακιού. Στην παρούσα εργασία έγινε αξιολόγηση της ΥΣΑ και ΕΣΑ σε καλλιέργεια καλαμποκιού με εφαρμογή διαφόρων επιπέδων άρδευσης.

COMPARISON OF A SUBSURFACE AND SURFACE DRIP IRRIGATION SYSTEM ON A MAIZE PLANTATION

D. Kalfountzos¹, I. Alexiou¹, S. Kotsopoulos¹

¹National Agricultural Research Foundation, Institute for Soil Mapping and
Classification, 1, Theophrastos Str., Larissa 413 35, E-mail: kalfountzos@nagref.gr

ABSTRACT

A subsurface drip irrigation (SSDI) method and a surface (SDI) one were applied during the years 2004, 2005 and 2006 in an experimental field that belongs to the Institutes of the National Agricultural Research Foundation in order to study the effects of water use on maize plantations. The SSDI system was installed during the year 2001 before the crop seeding at a depth 45cm below soil surface. During of the years 2001-2003 the system operated normally for the irrigation of cotton plantation. The present work evaluates the effects of SSDI and SDI systems on a maize plantation under various levels of irrigation water.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Υπάρχουν πολλοί εξωτερικοί παράγοντες που αναγκάζουν τη γεωργική παραγωγή να στραφεί στην προηγμένη τεχνολογία με σκοπό να επιζήσει σε ένα ιδιαίτερα ανταγωνιστικό περιβάλλον. Η Υποεπιφανειακή Στάγδην Άρδευση (ΥΣΑ) είναι η νεότερη και η πιο αποδοτική μέθοδος άρδευσης γεωργικών καλλιεργειών και χλοοταπήτων. Όπως αναφέρουν αρκετοί ερευνητές η ΥΣΑ επιτυγχάνει τις μεγαλύτερες παραγωγές και την υψηλότερη αποδοτικότητα της χρήσης του νερού από οποιαδήποτε άλλη μέθοδο άρδευσης που βρίσκεται σε χρήση ανά τον κόσμο [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]. Από πειράματα που έγιναν στην Ελλάδα και σε άλλες χώρες, η ΥΣΑ βρίσκει μεγάλη εφαρμογή στην άρδευση γεωργικών και αστικών εκτάσεων με επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων υγρών αστικών αποβλήτων. Η εφαρμογή αυτή έχει σημαντικά οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη [9, 10].

Στα μειονεκτήματα κατά την εφαρμογή της ΥΣΑ συμπεριλαμβάνονται: το αρχικό κόστος εγκατάστασης το οποίο είναι μεγάλο, υπάρχει πιθανότητα ζημιάς από τα τρωκτικά, το σύστημα είναι δύσκολο να συντηρηθεί και να επιδιορθωθεί, υπάρχει κίνδυνος συσσώρευσης αλάτων μεταξύ των σταλακτηφόρων, η κίνηση του νερού προς τα πάνω μπορεί να είναι οριακή σε χονδρόκοκκα εδάφη. Επίσης η έμφραξη των σταλακτήρων από τις ρίζες και άλλα φερτά υλικά μπορεί να οδηγήσει σε κακή λειτουργία του συστήματος [11]. Τα αποτελέσματα εφαρμογής της ΥΣΑ σε καλλιέργεια καλαμποκιού κατά το έτος 2004 ήταν ενθαρρυντικά [12] και για τον λόγο αυτό κρίθηκε αναγκαία η συνέχεια του πειράματος τα επόμενα δύο έτη.

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η σύγκριση της υποεπιφανειακής και Επιφανειακής Στάγδην Άρδευσης (ΕΣΑ) σε καλλιέργεια καλαμποκιού, με εφαρμογή διαφορετικών επιπέδων άρδευσης.

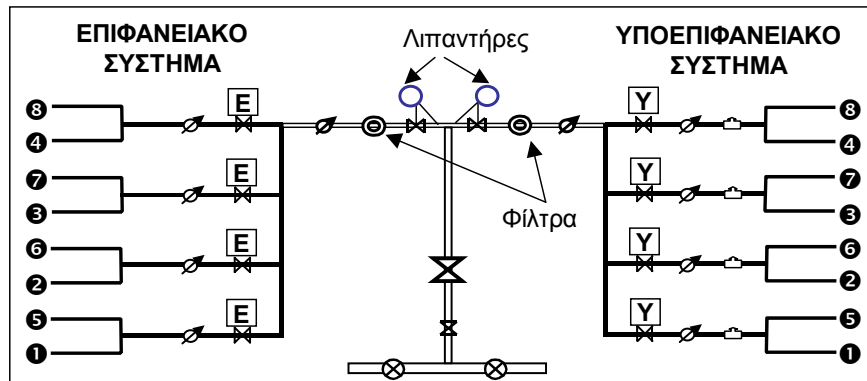
2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1. Περιγραφή εγκατάστασης της ΥΣΑ

Η εγκατάσταση του δικτύου της ΥΣΑ έγινε από το έτος 2001 για την άρδευση πειραματικού αγρού καλλιέργειας βαμβακιού. Το αρδευτικό δίκτυο αποτελούνταν από τον κύριο αγωγό μεταφοράς από PE Φ90/6 Atm και από δευτερεύοντες αγωγούς PE Φ32/6 Atm. Οι σταλακτηφόροι σωλήνες της υποεπιφανειακής και επιφανειακής άρδευσης είχαν ισαποχή 1m και 1,5m αντίστοιχα με μήκος 30 m και ήταν τύπου PC²/Φ16 της Eurodrip με ενσωματωμένους σταλακτήρες. Οι σταλακτήρες ήταν αυτορυθμιζόμενοι και αυτοκαθαριζόμενοι ισαποχής 1 m, παροχής 3,8 l/h σε πίεση λειτουργίας από 0,5 έως 4,5 atm, με διπλό μηχανισμό αυτοκαθαρισμού, με δύο εισόδους νερού από δύο διαδρομές του λαβύρινθου στην περιοχή αυτορρύθμισης και δύο κανάλια εξόδου ώστε να αποφεύγεται η έμφραξη. Στη κεφαλή του δικτύου (Σχήμα 1) υπήρχαν 2 υδρολιπαντήρες χωρητικότητας 60 lit και 2 φίλτρα σήτας 2 ιντσών.

Μεταξύ της κύριας γραμμής και των γραμμών άρδευσης παρεμβάλλονταν μία ηλεκτροβάνα για τον έλεγχο της ροής στο σύστημα και ένας υδρομετρητής για κάθε σύστημα με σκοπό να ελέγχεται η ακρίβεια των 4 υδρομετρητών της κάθε μεταχείρισης. Μετά το φίλτρο σήτας παρεμβάλλονταν δύο συλλέκτες ένας για το υποεπιφανειακό σύστημα άρδευσης και ένας για το επιφανειακό. Ο κάθε συλλέκτης περιλαμβάνει 4 ηλεκτροβάνες και 4 υδρομετρητές. Κάθε ηλεκτροβάνα με τον υδρομετρητή της συνδέεται με δύο γραμμές άρδευσης που τροφοδοτούν δύο πειραματικά τεμάχια. Κάθε πειραματικό τεμάχιο ΕΣΑ έχει 5 σταλακτηφόρους σωλήνες ενώ κάθε πειραματικό τεμάχιο ΥΣΑ 8 όμοιους σωλήνες. Στην κύρια γραμμή του συστήματος υπήρχε ρυθμιστής πίεσης, κι έτσι το σύστημα λειτουργούσε με σταθερή πίεση 2,5 atm. Από τις

ενδείξεις των υδρομετρητών και την έκταση του κάθε πειραματικού τεμαχίου υπολογίζονταν το ύψος του εφαρμοζόμενου νερού.



Σχήμα 1. Διάταξη κεφαλής αρδευτικού δικτύου

2.2. Περιγραφή του πειράματος

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε στο αγρόκτημα του ΕΘΙΑΓΕ στη Λάρισα (γ.π. 39,63^ο, γ.μ. 22,37^ο). Από τις αναλύσεις εδάφους και την ταξινόμησή του που έγιναν από το Ινστιτούτο Χαρτογράφησης και Ταξινόμησης Εδαφών Λάρισας, φαίνεται ότι είναι αργιλώδες (Πίνακας 1) και ανήκει στην υποομάδα των Calcic Chromoxererts των Vertisols. Η κατεργασία του πειραματικού αγρού έγινε με τις συνήθειες για την περιοχή καλλιεργητικές πρακτικές (όργωμα με άροτρο και προετοιμασία σποράς με ελαφρού τύπου καλλιεργητή). Η λιπαντική αγωγή καθορίστηκε από τις αναλύσεις εδάφους και πραγματοποιήθηκε με υδρολίπανση σε τέσσερις δόσεις με τις ίδιες ποσότητες και στις δύο μεταχειρίσεις.

Η υδραυλική αγωγιμότητα του εδάφους στην κατάσταση κορεσμού, μετρήθηκε με τη συσκευή GUELPH PERMEAMETER MODEL 2800 σε βάθη 15 και 45 cm από την επιφάνεια του εδάφους και βρέθηκε 5,22 και 7,55 mm/h αντίστοιχα.

Πίνακας 1. Φυσικές ιδιότητες του εδάφους

Βάθος (cm)	Άμμος %	Μηχανική σύσταση		ΦΕΒ	ΥΙ	ΣΜ
		Ιλύς %	Αργίλλος%	Χαρ/μό gr/cm ³	% κ.β	% κ.β
0-30	30	20	50	C	1,11	32,69
30-65	30	18	52	C	1,12	34,13
65-100	26	18	56	C	1,22	35,74
100+	28	16	56	C	1,22	35,15

Στις 13 Μαρτίου 2005 έγινε σπορά καλαμποκιού ποικιλίας 32F10-X013/PIONEER και στις 7 Απριλίου 2006 αντίστοιχα.

Ο πειραματικός αγρός διαστάσεων 80 x 65 = 5200 m², χωρίστηκε σε δύο μέρη. Στο μισό αγρό εγκαταστάθηκε η επιφανειακή άρδευση και στο άλλο μισό η υποεπιφανειακή. Και στις δύο περιπτώσεις εφαρμόστηκαν τέσσερα επίπεδα άρδευσης ίσα με το 120% (Α), το 100% (Β), το 80% (Γ) και το 60% (Δ) της υδατοκατανάλωσης, σε τέσσερις επαναλήψεις. Κάθε πειραματικό τεμάχιο είχε πλάτος 8 m (κάθετα στις γραμμές σποράς) και μήκος 15 m περίπου (παράλληλα στις γραμμές σποράς). Οι υπόγειοι σταλακτηφόροι σωλήνες ήταν ήδη τοποθετημένοι από προηγούμενο πείραμα ανά 1 μέτρο μεταξύ των με τη βοήθεια ειδικής κατασκευής (υπεδαφοθέτη) και σε βάθος 45 cm.

Από κάθε επανάληψη του πειράματος συλλέχθηκε και ζυγίστηκε χωριστά για κάθε γραμμή η παραγωγή από τμήμα της έκτασης εμβαδού 2,5 m² (3 γραμμές με ισαποχή 0,75 m και μήκος 3 μέτρα). Η συλλογή έγινε με το χέρι στις 28 Σεπτεμβρίου 2005 και στις 10 Οκτωβρίου 2006.

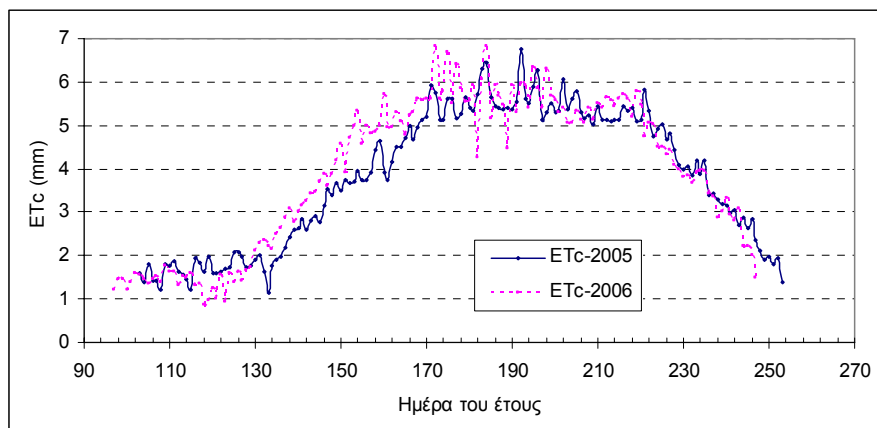
2.3. Υδατοκατανάλωση

Η εφαρμοζόμενη ποσότητα νερού σε κάθε άρδευση υπολογίζονταν από τα μετεωρολογικά στοιχεία που λαμβάνονταν από τον αυτόματο μετεωρολογικό σταθμό που ήταν εγκατεστημένος εντός του πειραματικού αγρού. Η εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς έγινε με τη χρήση της αναθεωρημένης μεθόδου Penman-Monteith κατά FAO-56 [13].

Η δυναμική εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας, (Σχήμα 2) υπολογίζονταν από την ET_r και τον απλό φυτικό συντελεστή [13] με τη σχέση:

$$ET_c = K_c \cdot ET_r \quad (2.1)$$

όπου K_c , ο φυτικός συντελεστής ο οποίος για το στάδιο (1), διάρκειας 30 ημερών είχε την τιμή 0,45, κατά το στάδιο (2) διάρκειας 40 ημερών, αυξάνονταν γραμμικά από 0,45 έως 1,20, για το στάδιο (3) διάρκειας 50 ημέρες ήταν 1,20 και τέλος κατά το στάδιο (4) διάρκειας 30 ημερών μειώνονταν γραμμικά από 1,20 έως 0,60.



Σχήμα 2. Ημερήσια τιμές δυναμικής εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας, ET_c

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Μετά τη σπορά του καλαμποκιού στις 13 Απριλίου 2005 έγινε άρδευση για το φύτευμα της καλλιέργειας, με αυτοπροωθούμενο εκτοξευτήρα και δόση άρδευσης 20 mm. Το έτος 2006 το φύτευμα έγινε χωρίς άρδευση με την υγρασία του εδάφους. Η συνολική βροχόπτωση κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου ανήλθε σε 124,4 mm κατά το έτος 2005 και 110,4 mm κατά το έτος 2006. Στον Πίνακα 2, δίνονται τα ύψη άρδευσης καθώς και το συνολικό νερό (άρδευση+βροχή+άρδευση φυτρώματος) για κάθε περίπτωση του πειράματος.

Πίνακας 2. Συνολικά ύψη άρδευσης για κάθε μεταχείριση

Επίπεδο άρδευσης	ΥΣΑ (2005)			ΕΣΑ (2005)		
	Άρδευση mm	% του B	Συνολικό νερό (mm)	Άρδευση mm	% του B	Συνολικό νερό (mm)
A	453,1	113	577,6	444,8	110	569,5
B	402,0	100	526,5	405,5	100	529,8
Γ	359,8	89	484,2	351,6	87	476,0
Δ	290,5	72	414,9	285,7	71	410,1

Επίπεδο άρδευσης	ΥΣΑ (2006)			ΕΣΑ(2006)		
	Άρδευση mm	% του B	Συνολικό νερό (mm)	Άρδευση Mm	% του B	Συνολικό νερό (mm)
A	422,3	106	532,7	427,4	106	537,8
B	404,0	100	514,4	405,5	100	515,9
Γ	323,8	80	434,2	323,0	80	433,5
Δ	247,7	61	358,1	253,3	62	363,7

Από τον Πίνακα 2 προκύπτει ότι τα προκαθορισμένα επίπεδα άρδευσης παρουσιάζουν αποκλίσεις από εκείνα που τελικά επιτεύχθηκαν κατά την λειτουργία του συστήματος. Στους Πίνακες 3 και 4 δίνεται η παραγωγή του καλαμποκιού σε kg/στρμ. για κάθε σύστημα, μεταχείριση και επανάληψη, καθώς επίσης η τυπική απόκλιση (STD) και ο συντελεστής παραλλακτικότητας (CV) μεταξύ των επαναλήψεων για κάθε καλλιεργητικό έτος χωριστά.

Πίνακας 3. Παραγωγή καλαμποκιού (kg/στρμ.), 2005

Επιφανειακή στάγδην άρδευση (ΕΣΑ)							
Επίπεδο	Παραγωγή κατά επανάληψη				M.O	STD	CV
Άρδευσης	Kg/στρμ.				kg/στρμ.	kg/στρμ.	
A	1553	1651	1509	1669	1596 ^b	119	0,07
B	1596	1377	1545	1585	1489 ^{cde}	120	0,08
Γ	1480	1329	1507	1563	1455 ^{bcd}	132	0,9
Δ	1393	1236	1303	1279	1281 ^a	51	0,10
Υποεπιφανειακή στάγδην άρδευση (ΥΣΑ)							
Επίπεδο	Παραγωγή κατά επανάληψη				M.O	STD	CV
άρδευσης	Kg/στρμ.				kg/στρμ.	kg/στρμ.	
A	1588	1475	1654	1487	1551 ^{bc}	158	0,10
B	1307	1461	1463	1485	1429 ^{bc}	137	0,10
Γ	1363	1379	1359	1456	1389 ^{abc}	82	0,06
Δ	1281	1377	1387	1359	1351 ^{ab}	82	0,06

^{abc} μέσοι όροι που συνοδεύονται από το ίδιο γράμμα δεν διαφέρουν στατιστικά σημαντικά

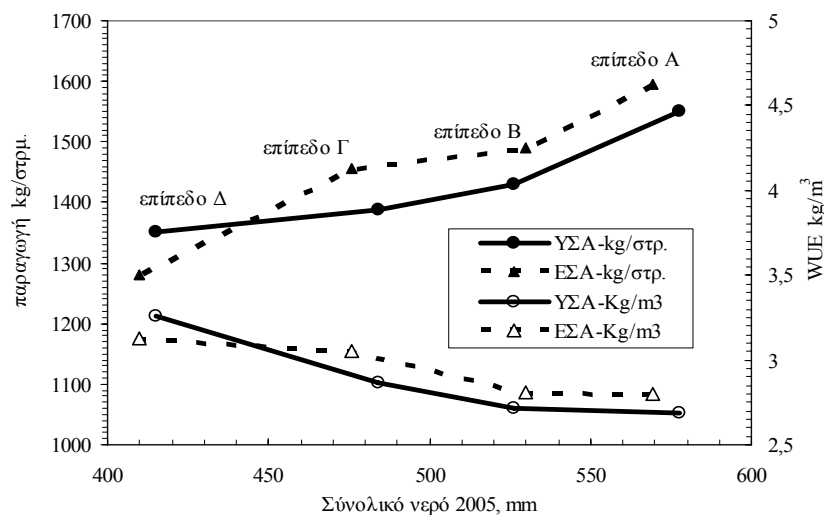
Στη στήλη M.O. των Πινάκων 3 και 4 οι μέσοι όροι που συνοδεύονται από το ίδιο γράμμα δεν διαφέρουν στατιστικώς σημαντικά μεταξύ τους σε επίπεδο σημαντικότητας 0,05, όπως προέκυψε από την εφαρμογή της δοκιμής της Ελάχιστης Σημαντικής Διαφοράς για την σύγκριση των μέσων όρων. Οι μέσοι όροι των επιπέδων άρδευσης A,

B, Γ και Δ των δύο συστημάτων δεν διαφέρουν στατιστικώς σημαντικά μεταξύ των και για τα δύο έτη πειραματισμού.

Πίνακας 4. Παραγωγή καλαμποκιού (kg/στρμ), 2006

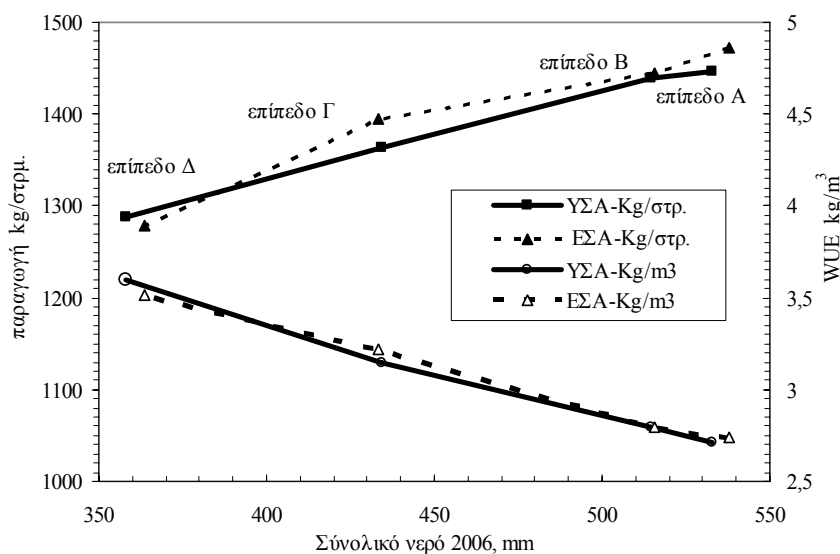
Επιφανειακή στάγδην άρδευση (ΕΣΑ)							
Επίπεδο Άρδευσης	Παραγωγή κατά επανάληψη				M.O	STD	CV
	Kg/στρμ.				kg/στρμ.	kg/στρμ.	
A	1491	1533	1454	1409	1472 ^c	120	0,08
B	1361	1449	1439	1525	1444 ^{bc}	109	0,08
Γ	1464	1360	1396	1356	1394 ^{bc}	126	0,09
Δ	1329	1257	1239	1239	1279 ^a	76	0,06
Υποεπιφανειακή στάγδην άρδευση (ΥΣΑ)							
Επίπεδο άρδευσης	Παραγωγή κατά επανάληψη				M.O	STD	CV
	Kg/στρμ.				kg/στρμ.	kg/στρμ.	
A	1481	1411	1499	1397	1447 ^b	71	0,05
B	1353	1541	1521	1344	1439 ^b	153	0,11
Γ	1292	1391	1309	1463	1363 ^a	116	0,08
Δ	1215	1333	1259	1347	1288 ^a	93	0,07

Κατά το έτος 2005 η ΥΣΑ δείχνει μια μικρή υστέρηση της παραγωγής στα επίπεδα A, B και Γ ενώ δείχνει μια μικρή αύξηση στο επίπεδο άρδευσης Δ. Τούτο φαίνεται χαρακτηριστικά και στην αποδοτικότητα του νερού άρδευσης όπως δείχνει το Σχήμα 3. Η αύξηση της παραγωγής από το επίπεδο B στο A ενδεχομένως να οφείλεται στην υποεκτίμηση της δυναμικής εξατμισοδιαπνοής με βάση τη μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε. Κατά το έτος 2006 (Σχήμα 4,) υπήρξε μια μικρή αύξηση της παραγωγής της ΥΣΑ στο επίπεδο άρδευσης Δ.



Σχήμα 3. Παραγωγή και αποδοτικότητα του νερού άρδευσης το έτος 2005 σε σχέση με το συνολικό νερό για κάθε επίπεδο και σύστημα άρδευσης.

Οι υπολογισμοί της παροχής των σταλακτών από τις μετρήσεις της διάρκειας των αρδεύσεων και του όγκου του νερού δεν έδειξαν διαφοροποίηση από την ονομαστική τους παροχή. Αυτό σημαίνει ότι δεν υπήρξε απόφραξη σταλακτών στο υπόγειο σύστημα, το οποίο υπόκειται σε τέτοιο κίνδυνο. Κάθε χρόνο με το πέρας της αρδευτικής περιόδου γινόταν χρήση μικρής ποσότητας τριφλοραρίνης με σκοπό την αποφυγή έμφραξης των σταλακτών από τις ρίζες των φυτών. Αν και στην περιοχή υπήρχαν πολλά τρωκτικά δεν παρατηρήθηκαν βλάβες στο σύστημα και διαρροές νερού κατά τα έξι χρόνια λειτουργίας του συστήματος. Αυτό οφείλεται στο ότι το βάθος εγκατάστασης του σταλακτηφόρου σωλήνα (45 cm) βρίσκεται εκτός της ζώνης δραστηριότητας των.



Σχήμα 4. Παραγωγή και αποδοτικότητα του νερού άρδευσης, το έτος 2006 σε σχέση με το συνολικό νερό για κάθε επίπεδο και σύστημα άρδευσης.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την ανάλυση των δεδομένων του πειράματος σύγκρισης της υποεπιφανειακής και της επιφανειακής στάγδην άρδευσης σε καλλιέργεια καλαμποκιού προκύπτει ότι:

- η εφαρμογή της υποεπιφανειακής στάγδην άρδευσης βάθους 45 cm μπορεί να εφαρμοστεί σε καλλιέργεια καλαμποκιού η οποία έχει επιφανειακό ριζικό σύστημα χωρίς να υστερήσει σε αποδοτικότητα του νερού σε σύγκριση με την αντίστοιχη επιφανειακή μέθοδο.
- παρατηρήθηκε σαφής μείωση ανάπτυξης ζιζανίων στα πειραματικά τεμάχια που εφαρμόστηκε η ΥΣΑ σε σχέση με αυτά της ΕΣΑ και στα τρία έτη πειραματισμού.
- η υποεπιφανειακή μέθοδος στάγδην άρδευσης μπορεί να εφαρμοσθεί χωρίς να υπάρχει ο φόβος καταστροφής από τρωκτικά και φράξιμο των σταλακτών από τις ρίζες των φυτών, αφού λειτούργησε χωρίς πρόβλημα επί έξι συνεχή έτη.
- το νέο για τη χώρα μας αυτό σύστημα μπορεί να εφαρμοσθεί και να λειτουργήσει σε διάφορες καλλιέργειες (βαμβάκι, καλαμπόκι, ζαχαρότευτλα, μηδική κ.α.), αρκεί ο σχεδιασμός και η διαχείρισή του να στηρίζονται στην επιστημονική γνώση.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Alam, Bb., Trooien, T. and Rogers, D., 2000. Subsurface drip irrigation for alfalfa in western Kansas. *6th international Micro-irrigation Congress*, South Africa.
2. Lamm, F. and Trooien, T., 2000. SDI for corn production: A ten year summary of research. *6th international Micro-irrigation Congress*. South Africa.
3. Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη Μ., Καλφούντζος Δ. και Παπανίκος Ν., (2000). Αξιολόγηση της επιφανειακής και υπόγειας στάγδην άρδευσης σε καλλιέργεια ζαχαροτεύτλων. *Πρακτικά, 2^ο Εθνικό Συνέδριο Γεωργικής Μηχανικής*, Βόλος, σελ. 157-164.
4. Ayars, J. E., Schoneman, R.A., Dale, F., Meso, B. and Shouse, P., 2001. Managing subsurface drip irrigation in the presence of shallow ground water. *Agric. Water Manage.*, 47:243-264.
5. Sakellariou-Makrantonaki M., Kalfountzos D., Vyrlas P., 2002. Water saving and yield increase of sugar beet with subsurface drip irrigation. *Global Nest The Int J.* Vol 4, No 2-3, pp 85-91.
6. Αλεξίου Ι., Καλφούντζος Δ., Κωτσόπουλος Σ., Βύρλας Π., Καμπέλη Σ. 2003. Σύγκριση της υποεπιφανειακής και της επιφανειακής στάγδην άρδευσης σε καλλιέργεια βαμβακιού. *Πρακτικά, 9^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης*, Θεσσαλονίκη, σελ. 199-206
7. Kalfountzos D., Alexiou I., Kotsopoulos S., Vyrlas P. and Kambeli S., 2004. Evaluation of subsurface and surface drip irrigation applied on cotton. *Proc. Int. Symposium of EWRA on Water Resources Management: Risk and Challenges for the 21st Century*, 2-4 September 2004, Ismir, Turkey, 1: 417-427.
8. Kotsopoulos S., Kalfountzos D. and Alexiou I., 2004. Water depths and cotton yield under sprinkler, surface trickle and subsurface trickle irrigation. *e-Proceedings of Int. Conf. "Protection and Restoration of the Environment VII"*, June 28-July 1, 2004, Mykonos, Greece.
9. Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη Μ., Τέντας Ι., Κολιού Α., Καλφούντζος Δ. και Παπανίκος Ν., (2000). Άρδευση πρασίνου με επεξεργασμένα υγρά αστικά απόβλητα. *Πρακτικά, 3^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωργικής Μηχανικής*, Θεσσαλονίκη, σελ. 265-272.
10. Kalfountzos D., Alexiou I., Kotsopoulos S., Zavacos G., Vyrlas P. 2006. Effect of subsurface drip irrigation on cotton plantation. *Water Resour Manag.* DOI 10.1007/s11269-006-9085-4
11. Βύρλας Π., Καλφούντζος Δ., Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη Μ., 2003. Επίδραση του εδαφικού τύπου στην έμφραξη λόγω εισρόφησης σε υποεπιφανειακά συστήματα στάγδην άρδευσης. *Πρακτικά, 9ο Πανελλήνιο Συνέδριο, Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης*, Θεσσαλονίκη, Πρακτικά τεύχος Α σελ. 225-232
12. Kotsopoulos S., Kalfountzos D., Alexiou I., 2006. Comparison of a subsurface and a surface drip irrigation system applied on a maize field. *e-Proceedings of 2nd International Conference Water and Technology Integrated Management of Water Resources*. Athens, Hellas.
13. 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.

(215)

ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΣΤΟΝ ΧΕΙΜΑΡΡΟ ΛΥΚΟΡΡΕΜΑ ΤΟΥ ΟΡΟΥΣ ΠΕΝΤΕΛΗΣ

Κ. Σούλης^{1α}, Ν. Δέρκας^{1β}, Ι. Δ. Βαλιάντζας^{1γ}

¹ Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και
Γεωργικής Μηχανικής, Τομέας Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, Ιερά Οδός 75, Τ.Κ.
11855 Αθήνα, email: ^asoco@aua.gr, ^bndercas1@aua.gr, ^γlhyd2vay@aua.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται η πειραματική λεκάνη απορροής στον χείμαρρο Λυκόρρεμα, στην Ανατολική πλευρά του όρους Πεντέλη, την οποία εξόπλισε και μελετά συστηματικά ο Τομέας Διαχείρισης Υδατικών Πόρων του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών. Ο εγκατεστημένος εξοπλισμός της πειραματικής λεκάνης απορροής η οποία έχει έκταση 7,8Km², περιλαμβάνει δύο υδρομετρικούς σταθμούς, πέντε βροχογράφους, έναν αυτόματο μετεωρολογικό σταθμό εγκατεστημένο στο κέντρο βάρους της λεκάνης και τέσσερις θερμουγρογράφους κατανεμημένους στην υπόλοιπη περιοχή της λεκάνης.

PRESENTATION OF THE EXPERIMENTAL WATERSHED IN THE STREAM LYKORREMA OF PENTELI MOUNTAIN

K. Soulis^{1a}, N. Dercas^{1b} and J. D. Valiantzas^{1c}

¹ Agricultural University of Athens, Dept. of Natural Resources Management and
Agricultural Engineering, Sector of Water Resources Management, 75, Iera Odos str.,
GR11855, Athens.

^asoco@aua.gr, ^bndercas1@aua.gr, ^clhyd2vay@aua.gr

ABSTRACT

In this paper the experimental Watershed in the stream Lykorrema in the East side of Penteli Mountain, Attica, Greece, is presented, which was equipped and is being systematically studied by the Sector of Water Resources Management of the Agricultural University of Athens. The installed equipment in the experimental watershed, which has an area of 7.8km², consists of two hydrometric stations, five rain gauges, an automatic weather station located at the metacenter of the basin and four temperature-relative humidity recorders, distributed in the rest of the basin's area.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η έρευνα στα αντικείμενα της Διαχείρισης Υδατικών Πόρων και της Υδρολογίας έχει προσφέρει πλήθος μεθοδολογιών και τεχνικών υπολογισμού και προσομοίωσης των διαφόρων παραμέτρων του υδρολογικού κύκλου. Ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια, η εξέλιξη της πληροφορικής έχει καταστήσει δυνατή την ανάπτυξη και εφαρμογή εξαιρετικά λεπτομερών μοντέλων προσομοίωσης. Αυτές οι μεθοδολογίες όμως για να παρέχουν αξιόπιστα αποτελέσματα πρέπει να προσαρμόζονται κατάλληλα στην εκάστοτε περιοχή και τις εκεί επικρατούσες συνθήκες. Για το σκοπό αυτό είναι απαραίτητες πολλές πληροφορίες τόσο υδρο-μετεωρολογικές όσο και γεωμορφολογικές. Τέτοιου είδους πληροφορίες είναι πολύ δύσκολο να βρεθούν στον Ελληνικό χώρο και ειδικά όταν αφορούν σε συγκροτημένα πακέτα αξιόπιστων και λεπτομερών πληροφοριών, τα οποία να διαθέτουν την απαραίτητη ακρίβεια για ερευνητικές εφαρμογές. Για τους παραπάνω λόγους, ο Τομέας Διαχείρισης Υδατικών Πόρων του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών, προχώρησε στον εξοπλισμό και στη συστηματική μελέτη μίας πειραματικής λεκάνης απορροής, στον χείμαρρο Λυκόρρεμα, στην Ανατολική πλευρά του όρους Πεντέλη το οποίο βρίσκεται στο νομό Αττικής. Η πειραματική λεκάνη διοικητικά ανήκει στις κοινότητες Πικερμίου και Παλαιάς Πεντέλης.

2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ

2.1 Γεωμορφολογία

Η πειραματική λεκάνη απορροής έχει έκταση 7,8Km² και περίμετρο 12,2Km. Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της γεωμορφολογίας της λεκάνης είναι το έντονο ανάγλυφο και οι μεγάλες κλίσεις. Το μέσο υψόμετρο της λεκάνης είναι 560m, ενώ το ελάχιστο και το μέγιστο υψόμετρό της είναι 280m και 950m αντίστοιχα. Η κλίση του εδάφους της λεκάνης κυμαίνεται μεταξύ 0,5% και 127% ενώ η μέση κλίση είναι 36%. Το υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης είναι πυκνό και περιλαμβάνει κλάδους έως και πέμπτης τάξεως σύμφωνα με τη μέθοδο Strahler [10]. Απεικόνιση της γεωμορφολογίας της λεκάνης φαίνεται στο σχήμα 1, ενώ η υψογραφική καμπύλη και η μηκοτομή του υδρογραφικού δικτύου της λεκάνης φαίνονται στο σχήμα 2. Η περιγραφή της λεκάνης βασίζεται στο τοπογραφικό υπόβαθρο κλίμακας 1/5000 της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού το οποίο χρησιμοποιήθηκε στην δημιουργία της γεωγραφικής βάσης δεδομένων για την πειραματική λεκάνη.

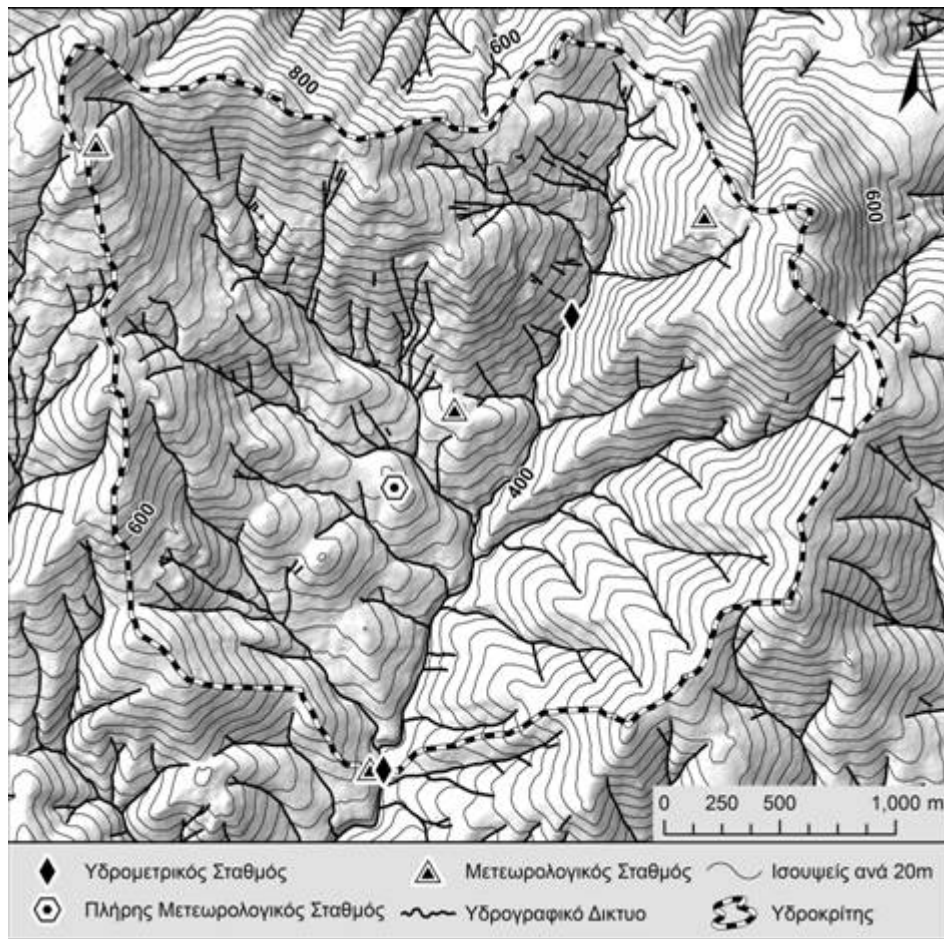
Αναλυτικότερα τα χαρακτηριστικά της πειραματικής λεκάνης απορροής παρουσιάζονται στον πίνακα 1.

Πίνακας 6: Γεωμορφολογικοί δείκτες της πειραματικής λεκάνης

Γεωμετρία		Ανάγλυφο		Υδρογραφικό Δίκτυο	
Δείκτης κυκλικότητας (Ec)	0.66	Ελάχ. Υψόμ. (m)	280	D _A (m ⁻¹)	0,0046
Δείκτης συμπαγούς (Ec')	1.23	Μέγ. Υψόμ. (m)	950	X _A (m)	107.8
Δείκτης επιμήκυνσης (E _L)	0.58	Μέσο Υψόμ. (m)	560	L _w (m)	4839
Περίμετρος λεκάνης (Km)	12,2	Μέση κλίση (%)	36	R _L	0,56
Εμβαδό λεκάνης (km ²)	7,84	Μέγ. κλίση (%)	127	R _B	0,57
		Ελάχ. κλίση (%)	0,5		

Για την περιγραφή της γεωμετρίας της λεκάνης χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω αδιάστατοι δείκτες: δείκτης κυκλικότητας E_c, δείκτης συμπαγούς E_c' και δείκτης

επιμήκυνσης E_L [12]. Για την περιγραφή του υδρογραφικού δικτύου χρησιμοποιήθηκαν δύο εμπειρικοί νόμοι που αφορούν στην ταξινόμησή του, ο νόμος του Horton R_B για τον αριθμό N_i των υδατορευμάτων, και ο νόμος του Horton R_L για το μήκος L_i των υδατορευμάτων [6]. Για την περιγραφή της πυκνότητας του υδρογραφικού δικτύου χρησιμοποιήθηκε ο δείκτης πυκνότητας D_A , και η μέση απόσταση X_A από τον υδροκρίτη μέχρι το υδατόρευμα. Η πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου D_A είναι ένας δείκτης της ικανότητας του υδρογραφικού δικτύου να αποστραγγίζει μια περιοχή [5].

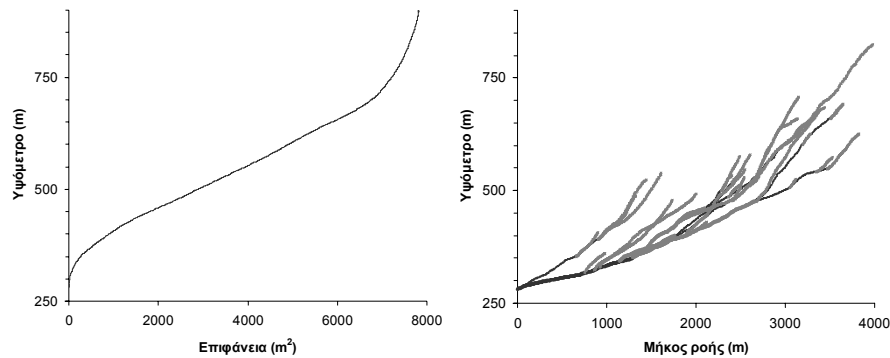


Σχήμα 1. Τοπογραφία της πειραματικής λεκάνης και θέσεις μετεωρολογικών και υδρομετρικών σταθμών.

2.2 Κλίμα

Το κλίμα στην ευρύτερη περιοχή της Αττικής όπως και γενικά της ανατολικής Ελλάδας, είναι τυπικά ξηρό μεσογειακό, με ήπιους και υγρούς χειμώνες, σχετικά θερμά και ξηρά καλοκαίρια και, γενικά, μακρές περιόδους ηλιοφάνειας κατά την μεγαλύτερη διάρκεια του έτους. Η μέση υπερετήσια τιμή της βροχόπτωσης στην Αττική σύμφωνα με μετρήσεις της ΕΜΥ [11] για τους σταθμούς Φιλαδέλφεια, Ελληνικό και Ελευσίνα είναι 414,1mm, 364,8mm και 372,9mm αντίστοιχα. Παρόλα αυτά, τα ύψη βροχής που μετρήθηκαν στην περιοχή της πειραματικής λεκάνης τα τρία τελευταία έτη, είναι σημαντικά μεγαλύτερα με τη μέση τιμή να είναι ίση με 765mm ενώ ακόμα και για το

φαινομενικά ξηρό υδρολογικό έτος 2006-2007 η τιμή της βροχόπτωσης μέχρι και το μήνα Ιούνιο έφτασε τα 702mm.



Σχήμα 2. Υψογραφική καμπύλη της λεκάνης και μηκοτομή του υδρογραφικού δικτύου.

Η κατανομή των βροχοπτώσεων ακολουθεί τα χαρακτηριστικά των ξηρών περιοχών τις Ελλάδας με το μεγαλύτερο μέρος των βροχοπτώσεων να παρατηρούνται την υγρή περίοδο υπό τη μορφή ισχυρών καταιγίδων. Έντονες καταιγίδες παρατηρούνται ακόμα και την περίοδο του καλοκαιριού και χαρακτηρίζονται από μικρή διάρκεια, μεγάλες εντάσεις και πολύ μεγάλη χωρική ανομοιομορφία.

Σε ότι αφορά στις θερμοκρασίες, σύμφωνα πάλι με τις μετρήσεις της ΕΜΥ από το σταθμό Φιλαδέλφεια, ο οποίος είναι ο πλησιέστερος στην περιοχή της λεκάνης η μέση ελάχιστη θερμοκρασία είναι 5,2°C και παρουσιάζεται τον Ιανουάριο, ενώ η μέση μέγιστη θερμοκρασία είναι 33,5 °C και παρουσιάζεται τον Ιούλιο. Από τις μέχρι τώρα μετρήσεις στην περιοχή της πειραματικής λεκάνης τόσο οι μέγιστες όσο και ελάχιστες θερμοκρασίες είναι μικρότερες κατά περίπου 3 °C.

2.3 Γεωλογία - Εδάφη

Στην περιοχή της λεκάνης επικρατούν σχιστολιθικοί σχηματισμοί αποτελούμενοι από μαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους με ενστρώσεις μαρμάρων. Στο βορειοανατολικό τμήμα της λεκάνης σε μικρές περιοχές γύρω από τις κορυφές Μικρά και Μεγάλα Μαυρηνόρα εμφανίζεται το ανώτερο μάρμαρο (4,1% της έκτασης της λεκάνης) ενώ πολύ μικρές περιοχές στην έξοδο της λεκάνης καλύπτονται από ποταμοχειμάρειες αποθέσεις [9].

Οι σχιστολιθικοί σχηματισμοί στην περιοχή της λεκάνης έχουν υποστεί έντονη τεκτονική καταπόνηση και ρωγμάτωση με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν αυξημένη υδατοπερατότητα και να εμφανίζεται στον αποσαθρωμένο μανδύα των σχιστόλιθων μικρής δυναμικότητας υδροφορία. Μια δεύτερη υδροφορία υπάρχει στις ενστρώσεις μαρμάρων. Το ενδιάμεσο μάρμαρο είναι τεκτονικά καταπονημένο και καρστικοποιημένο και πιθανότατα τροφοδοτείται από την επιφάνεια μέσω ζωνών διάρρηξης των σχιστόλιθων. Οι υδροφορίες αυτές συμβάλουν στη βασική απορροή του χειμάρρου η οποία είναι έντονη από τον Φεβρουάριο μέχρι και τον Απρίλιο.

Τα εδάφη, όπως προέκυψε από αναλυτική χαρτογράφηση, στο μεγαλύτερο μέρος της λεκάνης είναι χονδρόκοκκα (αμμοπηλώδη) και παρουσιάζουν πολύ μεγάλη τιμή τελικής διηθητικότητας ενώ σε μικρά τμήματα της λεκάνης, κυρίως κοντά στην έξοδο και στις περιοχές που το μητρικό υλικό είναι το ανώτερο μάρμαρο υπάρχουν εδάφη μέσης

σύστασης (αμμοαργιλλοπηλώδη) τα οποία όμως παρουσιάζουν επίσης υψηλές τιμές τελικής διηθητικότητας.

Το βάθος του εδάφους, λόγω του έντονου ανάγλυφου στην περιοχή της πειραματικής λεκάνης, παρουσιάζει μεγάλη ανομοιομορφία. Στις περιοχές που καταλαμβάνει το ανώτερο μάρμαρο εμφανίζεται γυμνός βράχος με ελάχιστο έδαφος στις κοιλότητες ανάμεσα στους βράχους, στην περιοχή κοντά στην έξοδο της λεκάνης το έδαφος είναι βαθύ με αρκετές πέτρες, στις υπόλοιπες περιοχές κυμαίνεται από ρηχό έως βαθύ ανάλογα με το ανάγλυφο της κάθε περιοχής ενώ σε όλες τις περιπτώσεις περιέχει πολλές πέτρες και εναλλάσσεται με βράχους.

2.4 Κάλυψη Γης

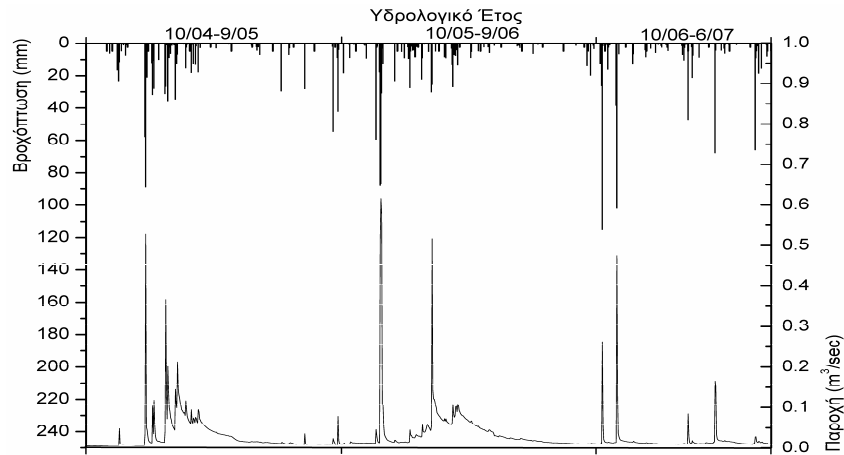
Το μεγαλύτερο μέρος τις λεκάνης παλαιότερα καλυπτόταν από πυκνό πευκοδάσος το οποίο καταστράφηκε ολοσχερώς από την μεγάλη πυρκαγιά, η οποία το 1995 έκαψε όλη την ανατολική πλευρά της Πεντέλης. Μετά την πυρκαγιά πραγματοποιήθηκαν επεμβάσεις για την προστασία της περιοχής από την διάβρωση όπως η τοποθέτηση των κορμών των καμένων δέντρων κατά μήκος των ισοϋψών. Σήμερα το μεγαλύτερο μέρος της λεκάνης καλύπτεται από θάμνους ενώ σε μεγάλο τμήμα της περιοχής αναγεννιέται, με φυσικό τρόπο ή κατόπιν αναδάσωσης, το παλαιό δάσος. Το γεγονός αυτό επιτρέπει την μελέτη της μεταβολής της υδρολογικής συμπεριφοράς της λεκάνης με την ανάπτυξη του δάσους.

Ένα πολύ μικρό τμήμα της λεκάνης (μικρότερο από 1% της συνολικής έκτασης) καλύπτεται από γεωργικές καλλιέργειες, ενώ ένα επίσης μικρό μέρος της λεκάνης που περιλαμβάνει κυρίως τις κοίτες των χειμάρρων καλύπτεται από φυλλοβόλα δέντρα που επιβίωσαν από την πυρκαγιά.

Σημαντική επίδραση στην υδρολογική συμπεριφορά της λεκάνης έχουν το εκτεταμένο δίκτυο δασικών δρόμων (συνολική έκταση 490 στρέμματα ή 6,2% της συνολικής επιφάνειας) και η παράνομη βόσκηση της περιοχής από αιγοπρόβατα.

2.5 Υδρολογική Συμπεριφορά

Από τη μέχρι τώρα μελέτη της λεκάνης διαπιστώνεται ότι ο κύριος όγκος της βροχοπτώσης εκδηλώνεται με τη μορφή σύντομων και ισχυρών καταιγίδων, ότι η ανταπόκριση της υδρολογικής λεκάνης στις καταιγίδες αυτές είναι άμεση και ότι η βασική απορροή είναι σημαντική από τον Φεβρουάριο μέχρι το Μάρτιο. Διαφορετική συμπεριφορά παρουσιάστηκε το τρέχον έτος, καθώς ενώ η συνολική βροχοπτώση δεν ήταν πολύ μικρότερη από το μέσο όρο, ήταν συγκεντρωμένη στην αρχή του φθινοπώρου και στο τέλος της άνοιξης με αποτέλεσμα η βασική απορροή να είναι πολύ περιορισμένη (Σχήμα 3).



Σχήμα 3. Ημερήσιες τιμές βροχόπτωσης και απορροής για την περίοδο 2004 – 2007.

3. ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ

Ο εγκατεστημένος εξοπλισμός στην πειραματική λεκάνη απορροής αποτελείται από δύο υδρομετρικούς σταθμούς, στην έξοδο και στο κέντρο βάρους της λεκάνης, από βροχομετρικό δίκτυο που περιλαμβάνει πέντε βροχογράφους, από έναν αυτόματο μετεωρολογικό σταθμό εγκατεστημένο στο κέντρο βάρους της λεκάνης και από τέσσερις θερμοϋγρογράφους καταναμεμένους στην υπόλοιπη περιοχή της λεκάνης (Σχήμα 1).

Ο υδρομετρικός σταθμός στην έξοδο της λεκάνης αποτελείται από έναν αιχμηρής στέφνης, μερικό υπερχειλιστή ορθογωνικής διατομής, ο οποίος σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε ειδικά για την πειραματική λεκάνη (Σχήμα 3), από ένα σταθμήμετρο και από έναν ψηφιακό σταθμηγράφο πιεζομετρικού τύπου. Ο υπερχειλιστής τοποθετήθηκε σε διατομή του υδατορεύματος πλάτους 500cm και έχει μήκος στέφνης 300cm. Για τον υπολογισμό της παροχής χρησιμοποιείται η εξίσωση των Kindsvater and Carter [8], η οποία έχει μεν πολύπλοκη μορφή, αλλά δίνει τα πιο αξιόπιστα αποτελέσματα σε σχέση με τις υπόλοιπες κατάλληλες εξισώσεις [2,7].

Για τον έλεγχο της ακρίβειας της εξίσωσης του υπερχειλιστή, και προκειμένου να βαθμονομηθεί η σχέση στάθμης-παροχής για τις πολύ μικρές τιμές της στάθμης, που δεν ανήκουν στο εύρος τιμών για το οποίο ισχύουν οι τύποι, πραγματοποιούνται υδρομετρήσεις με δυο διαφορετικές μεθόδους: με ογκομέτρηση, και με τη χημική μέθοδο. Δοκιμάστηκε επίσης η εφαρμογή της μεθόδου ταχύτητας εμβადού, η οποία τελικά κρίθηκε ακατάλληλη για την περιοχή λόγω των μεγάλων σφαλμάτων στην μέτρηση της ταχύτητας ροής, τα οποία οφείλονταν στο χειμαρρώδες καθεστώς ροής που επικρατεί στο υδατόρευμα.

Η ογκομέτρηση αποδείχθηκε η καταλληλότερη μέθοδος για την ακριβή μέτρηση της παροχής στις μικρές στάθμες, όπου ήταν εφικτή η εφαρμογή της. Για την εφαρμογή της μεθόδου ογκομετρούταν η παροχή που διερχόταν από ένα μικρό τμήμα της στέφνης του υπερχειλιστή και κατόπιν η μέτρηση αναγόταν σε όλο το πλάτος του υπερχειλιστή. Μεγαλύτερη ακρίβεια επιτεύχθηκε με την επανάληψη της μέτρησης σε διάφορα σημεία της στέφνης του υπερχειλιστή. Η ακρίβεια της μεθόδου ελέγχθηκε στο εργαστήριο με επιτυχία ενώ τα αποτελέσματά της συγκρίθηκαν με αυτά της χημικής μεθόδου, η οποία είναι η μόνη που μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα σε μεγαλύτερες στάθμες, αλλά η εφαρμογή της είναι αρκετά δύσκολη.



Σχήμα 4. Υπερχειλιστής εγκατεστημένος στην έξοδο της πειραματικής λεκάνης, βροχογράφος, βροχόμετρο και μετεωρολογικός σταθμός.

Ο υδρομετρικός σταθμός στο κέντρο της λεκάνης αποτελείται από ψηφιακό σταθμηγράφο εγκατεστημένο στο άκρο καταβαθμού ο οποίος σχηματίζεται στο τέλος κυκλικού αγωγού. Για την εκτίμηση της παροχής χρησιμοποιούνται ανάλογα με το καθεστώς της ροής εξισώσεις που προτείνονται από τους Dey και Ahmad [1,3,4] ενώ για τον έλεγχο της ακρίβειας της μεθόδου πραγματοποιούνται επίσης απευθείας υδρομετρήσεις.

Σε ότι αφορά στις μετεωρολογικές παρατηρήσεις, το δίκτυο των σταθμών σχεδιάστηκε έτσι ώστε να εξασφαλίζει την όσο το δυνατόν καλύτερη παρακολούθηση της χωρικής κατανομής των μετεωρολογικών παραμέτρων, καθώς και την αδιάλειπτη λειτουργία του. Για το σκοπό αυτό εγκαταστάθηκε ένας πλήρης μετεωρολογικός σταθμός κοντά στο κέντρο βάρους και περίπου στο μέσο υψόμετρο της λεκάνης, ενώ σε μικρή σχετικά απόσταση και κοντά επίσης στο κέντρο βάρους της λεκάνης εγκαταστάθηκε ένας σταθμός που περιλαμβάνει βροχογράφο και θερμοϋγρογράφο. Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζεται η συμπλήρωση των στοιχείων του ενός σταθμού από τον άλλον, όταν παρουσιαστεί πρόβλημα, και ελέγχεται η αξιοπιστία τους με τη σύγκριση των μετρήσεών τους.

Επίσης, με στόχο την παρακολούθηση της χωρικής κατανομής των μετεωρολογικών παραμέτρων εγκαταστάθηκαν τρεις επιπλέον σταθμοί, αποτελούμενοι από βροχογράφο και θερμοβαρογράφο διαμοιρασμένοι σε όλη την έκταση της λεκάνης και σε διάφορα υψόμετρα από το ελάχιστο έως το μέγιστο. (Σχήμα 4)

Η ακρίβεια των μετρήσεων των βροχογράφων, η οποία έχει εξαιρετική σημασία ελέγχεται επιπλέον με την τοποθέτηση ενός βροχόμετρου κοντά σε κάθε βροχογράφο.

Επίσης η ύπαρξη στην ευρύτερη περιοχή μετεωρολογικών σταθμών διαφόρων φορέων (Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο) παρέχει τη δυνατότητα συστηματικότερης εκτίμησης της συσχέτισης των μετεωρολογικών παρατηρήσεων με τη θέση και το υψόμετρο.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο εξοπλισμός η παρακολούθηση και η συστηματική μελέτη της πειραματικής λεκάνης απορροής του Τομέα Διαχείρισης Υδατικών Πόρων του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών απαιτεί μεγάλη και συστηματική προσπάθεια, έχει όμως σαν αποτέλεσμα την δημιουργία ενός συνεχούς, πλήρους και αξιόπιστου συνόλου δεδομένων το οποίο εμπλουτίζεται συνεχώς και συμβάλει σημαντικά στην ανάπτυξη του ερευνητικού και εκπαιδευτικού έργου του Τομέα στα θέματα της Υδρολογίας, της Διαχείρισης Υδατικών Πόρων και της Μικρο-μετεωρολογίας.

Ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στην αδιάλειπτη παρακολούθηση της λεκάνης και στον περεταίρω εξοπλισμό της, ενώ όλα τα δεδομένα χωρικά, μετεωρολογικά και υδρομετρικά επεξεργάζονται και αποθηκεύονται σε Γεωγραφική Βάση Δεδομένων η οποία έχει σχεδιαστεί και αναπτυχθεί ειδικά για τον παραπάνω σκοπό.

Ήδη με βάση τα πρώτα δεδομένα της πειραματικής λεκάνης πραγματοποιείται έρευνα του ΓΠΑ πάνω στην υδρολογική συμπεριφορά και στις πλημμυρικές απορροές των χειμάρρων, στα υδατικά ισοζύγια μικρών λεκανών απορροής, στην υδρομετρία και στη μικρο-μετεωρολογία.

Επόμενοι στόχοι είναι η ενδελεχής ανάλυση των δεδομένων που έχουν συγκεντρωθεί ενώ η διερεύνηση των μεταβολών στην υδρολογική συμπεριφορά της λεκάνης κατά την εξέλιξη της διαδικασίας αναδάσωσης της θα παράσχει πολύτιμες πληροφορίες στον κρίσιμο τομέα της διαχείρισης καμένων δασικών εκτάσεων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Ahmad Z., End-depth-discharge relationship for circular free overfall, Journal of Institution of Engineers (India) 83 (June) (2002) 21–24.
2. ASTM (1993): American Society for Testing and Materials, ASTM D5242, Standard method for open – channel flow measurement of water with thin – plate weirs, 1993.
3. Dey S., End depth in circular channels, Journal of Hydraulic Engineering ASCE 124 (8) (1998) 856–863.
4. Dey S., Free overfall in open channels: state-of-the-art review, Flow Measurement and Instrumentation 13 (2002) 247–264
5. Dingman S. L., (2002). Physical Hydrology (second edition). pp. 600.
6. Horton, R.E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins: Hydrophysical approach to quantitative morphology. Geological Society of America Bulletin. 56: 275-370.
7. ISO (1980), International Organization of Standards. ISO 1438/1-1980 (E), Water flow measurement in open channels using weirs and venture flumes – Part 1Q Thin plate weirs, 1980.
8. Kindsvater, C. E. and R. W. Carter, 1959. Discharge characteristics of rectangular thin – plate weirs. Transactions, American Society of Civil Engineers. V. 24. Paper no. 3001.
9. Lepsius R. (1893): Geologie von Attika, Berlin
10. Strahler, R.E. (1952), Hypsometric (area- altitude) analysis of erosional topography. Geological Society of America Bulletin. 63: 1117-1142.
11. ΕΜΥ – Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία, www.hnms.gr
12. Κουτσογιάννης, Δ., 1999, Τεχνική Υδρολογία, pp.417.

(216)

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ ΤΟΥ Τ.Ο.Ε.Β. ΠΗΝΕΙΟΥ ΣΤΗΝ ΚΑΛΥΨΗ ΑΡΔΕΥΤΙΚΩΝ ΑΝΑΓΚΩΝ

**Σ. Κωτσόπουλος^{1α}, Ι. Αλεξίου^{1β}, Φ. Λόκκας^{2α}, Γ. Γραβάνης^{2β} και Σ.
Μαγαλιός³**

¹ΕΘΙΑΓΕ/ΙΧΤΕΛ, Θεοφράστου 1, 41335 Λάρισα, ^akotsopoulos@nagref.gr,
^balexiou@nagref.gr

²ΤΕΙ Λάρισας, ΣΤΕΦ, Τμήμα ΠΕΥ 41110 Λάρισα, ^ap.lokkas@teilar.gr,
^bgravansg@teilar.gr

³Κοραή 13, 41223 Λάρισα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην περιοχή της τέως λίμνης Κάρλας λειτουργούν αρκετοί ταμιευτήρες για να εξασφαλίσουν τις αναγκαίες ποσότητες νερού για την άρδευση των παρακείμενων καλλιεργειών κυρίως την περίοδο Ιουνίου – Αυγούστου οπότε η ζήτηση είναι αυξημένη ενώ οι διαθέσιμοι υδατικοί πόροι από άλλες πηγές μηδενικοί. Στην παρούσα εργασία αξιοποιούνται μηνιαία κλιματικά στοιχεία από το μετεωρολογικό σταθμό της ΕΜΥ στη Λάρισα για την εκτίμηση της εξάτμισης από τους ταμιευτήρες και της υδατοκατανάλωσης των καλλιεργειών με στόχο την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των ταμιευτήρων στην κάλυψη των αρδευτικών αναγκών ανάλογα με τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους και το μέγεθος των αρδευόμενων εκτάσεων.

RELIABILITY OF THE RESERVOIRS IN THE AREA OF PINIOS L.O.L.R. IN MEETING CROP WATER REQUIREMENTS

**S. Kotsopoulos^{1a}, I. Alexiou^{1b}, P. Lokkas^{2a}, G. Gravanis^{2b} and S.
Magalios³**

¹NAGREF/ISCM, 1, Theophrastos Str., Larissa, ^akotsopoulos@nagref.gr,
^balexiou@nagref.gr

²TEI Larissa, STA, Dept CIW, 41110 Larissa, ^ap.lokkas@teilar.gr, ^bgravansg@teilar.gr

³ 13, Korai Str., 41223 Larissa

ABSTRACT

A number of surface reservoirs operate in the area of the former lake Karla and supply the sufficient water quantities for irrigation of nearby cultivated areas mainly during the period June – August when the irrigation water requirements are high while the available water from other resources is negligible. In the present study, monthly climatic data from the meteorological station of N.M.S. in Larissa are utilised for the estimation of reservoir evaporation and the crop water requirements in order to evaluate the efficiency of reservoirs in meeting crop water requirements with reference to their technical characteristics and the size of the irrigated areas.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η άρδευση των καλλιεργειών στην περιοχή της τέως λίμνης Κάρλας γίνεται σε μεγάλο ποσοστό από το νερό που αποθηκεύεται σε παρακείμενους ταμιευτήρες που έχουν κατασκευαστεί για το σκοπό αυτό. Στα πλαίσια του ερευνητικού έργου «Χωροθέτηση και εκτίμηση της υδρολογικής διακινδύνευσης με έμφαση στην ξηρασία και τις πλημμύρες σε αστικές και μη αστικές περιοχές της Θεσσαλίας και αξιολόγηση των περιβαλλοντικών τους επιπτώσεων» του προγράμματος ΑΡΧΙΜΗΔΗΣ (ΕΕΟΤ) του ΤΕΙ Λάρισας εξετάζεται η αξιοπιστία των έργων αυτών στην κάλυψη των υδατικών αναγκών των καλλιεργειών. Έντεκα συνολικά ταμιευτήρες βρίσκονται στην περιοχή αυτή [1, 2] που εξυπηρετούν συγκεκριμένες εκτάσεις-υποπεριοχές (Σχήμα 1) σύμφωνα με τα στοιχεία του Τ.Ο.Ε.Β. Πηνειού που τους διαχειρίζεται. Διακρίνονται οχτώ τέτοιες υποπεριοχές λόγω του γεγονότος ότι ορισμένες από αυτές εξυπηρετούνται από δύο ταμιευτήρες (π.χ. περιοχή Καλαμακίου από τους ταμιευτήρες Καλαμακίου Ι και ΙΙ). Οι ταμιευτήρες αυτοί γεμίζουν με άντληση νωρίς την άνοιξη από τα νερά του Πηνειού ποταμού μέσω του συλλεκτήρα του Ασμακίου και το νερό τους χρησιμοποιείται για την άρδευση των καλλιεργειών τους μήνες έλλειψης νερού (κυρίως Ιούνιο & Ιούλιο).

Στην περιοχή μελέτης οι αρδευόμενες καλλιέργειες, με καταιονισμό και σταγόνες, αποτελούν το ~ 70% και οι ξηρικές, κυρίως σιτηρά, το υπόλοιπο. Από τις αρδευόμενες, το βαμβάκι καταλαμβάνει το ~85% ενώ το υπόλοιπο καλλιεργείται κυρίως από καλαμπόκι, μηδική και βιομηχανική ντομάτα.

Με δεδομένο το μέγεθος των ταμιευτήρων, την αρδευόμενη από αυτούς έκταση και την κατανομή των καλλιεργειών κρίνεται αναγκαίο να αξιολογηθεί η αξιοπιστία τους στην κάλυψη των υδατικών αναγκών των καλλιεργειών λαμβάνοντας υπόψη τη διαφοροποίηση των κλιματικών συνθηκών από έτος σε έτος.

Μεθοδολογίες για την αξιολόγηση αρδευτικών δικτύων έχουν προταθεί στο παρελθόν για συγκεκριμένες καλλιέργειες [3, 4]. Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας είναι αναγκαία η εκτίμηση της εξάτμισης από τους ταμιευτήρες και η εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής (υδατοκατανάλωσης) των καλλιεργειών σε μηνιαία βάση. Οι εκτιμήσεις αυτές θα αξιοποιηθούν για τον υπολογισμό του υδατικού ισοζυγίου - ελλείμματος νερού - κάθε υποπεριοχής για μια ικανοποιητική σειρά ετών.

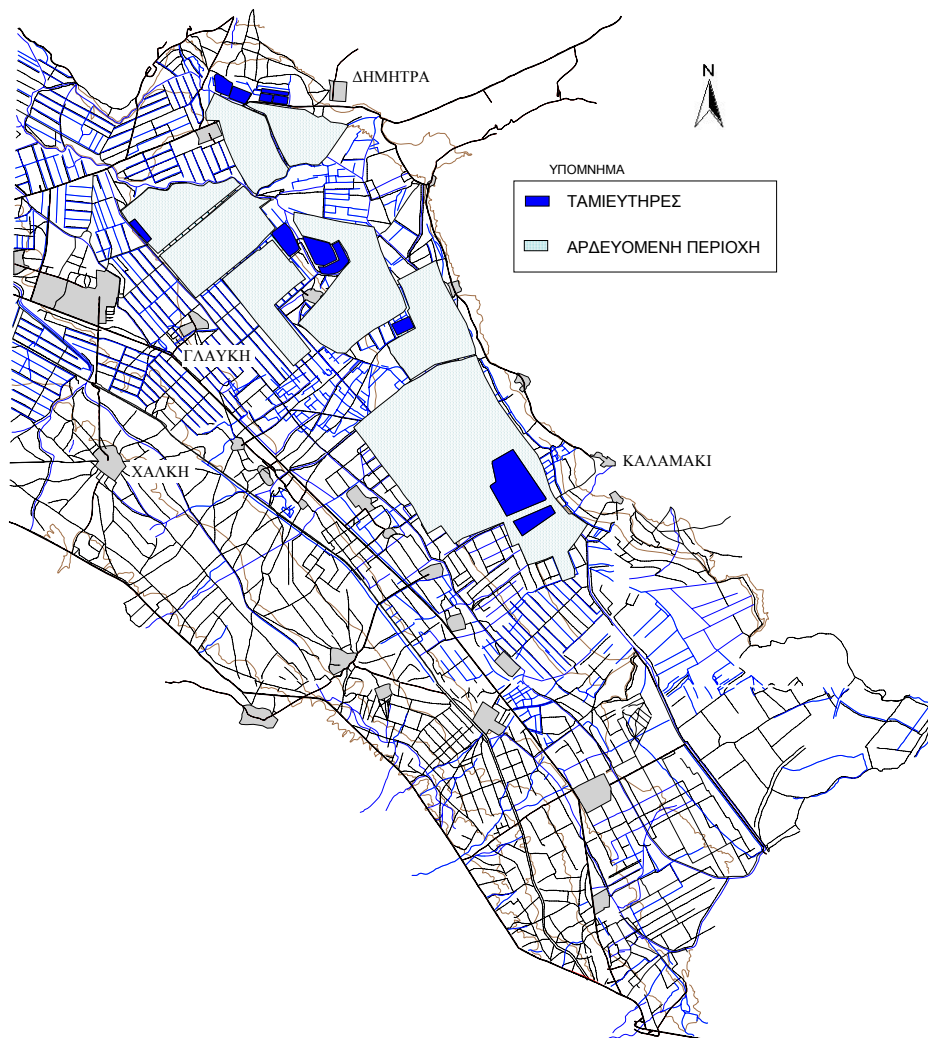
Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται μηνιαία κλιματικά στοιχεία από το μετεωρολογικό σταθμό της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας (Ε.Μ.Υ.) στη Λάρισα, εδαφολογικά στοιχεία [5] και στοιχεία καλλιεργειών της περιοχής μελέτης, με στόχο την εκτίμηση της υδατικού ισοζυγίου κάθε υποπεριοχής που αρδεύεται από συγκεκριμένο ταμιευτήρα. Οι εκτιμήσεις αυτές αξιοποιούνται για την αξιολόγηση της αξιοπιστίας των ταμιευτήρων της περιοχής μελέτης στην κάλυψη των υδατικών αναγκών των καλλιεργειών.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Για την εκτίμηση της διακινδύνευσης σε κάθε περιοχή απαιτείται ο υπολογισμός του ελλείμματος νερού για κάθε έτος λαμβάνοντας υπόψη την εξάτμιση νερού από τους ταμιευτήρες, την έκταση και υδατοκατανάλωση των καλλιεργειών, τις βροχοπτώσεις και την μείωση της αποθηκευμένης στο έδαφος υγρασίας.

Η περιοχή μελέτης βρίσκεται πολύ κοντά στην πόλη της Λάρισας όπου λειτουργεί ο μετεωρολογικός σταθμός της ΕΜΥ. Η ευρύτερη περιοχή της Λάρισας χαρακτηρίζεται από θερμό και ξηρό καλοκαίρι, περίοδο ιδιαίτερα σημαντική για την ανάπτυξη των καλλιεργειών, που όμως απαιτούν αυξημένες ποσότητες νερού. Στο πεδινό τμήμα του νομού και ιδιαίτερα στην περιοχή της τέως λίμνης Κάρλας τόσο οι επικρατούσες θερμοκρασίες όσο και οι άλλες κλιματικές παράμετροι που καθορίζουν το ύψος της

εξάτμισης και εξατμισοδιαπνοής των καλλιεργειών (ηλιακή ακτινοβολία, ηλιοφάνεια, σχετική υγρασία, ταχύτητα ανέμου) μπορούν να θεωρηθούν πρακτικά ίδιες με αυτές που καταγράφονται στο σταθμό της ΕΜΥ στη Λάρισα.



Σχήμα 1. Ταμιευτήρες και αρδευόμενες από αυτούς εκτάσεις στην περιοχή Κάρλας, κλίμακα 1:290000

2.1. Υπολογισμός της εξάτμισης και της εξατμισοδιαπνοής

Σήμερα, ιδιαίτερη εφαρμογή για την αξιοπιστία της στον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής και εξάτμισης παρουσιάζει η τροποποιημένη μέθοδος Penman-Monteith όπως περιγράφεται από τον FAO-56 [6, 7, 8]. Για την εφαρμογή της, που γίνεται σε δύο στάδια, απαιτείται η εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας αναφοράς και του φυτικού συντελεστή όπως περιγράφεται από την παρακάτω σχέση:

$$ET_c = K_c \cdot ET_o \quad (2.1)$$

όπου ET_c η ημερήσια εξατμισοδιαπνοή (mm/d), K_c φυτικός συντελεστής που εξαρτάται από το στάδιο ανάπτυξης της καλλιέργειας [6], και ET_o η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας αναφοράς (mm/d).

Αναφορικά με την εξάτμιση, αυτή μπορεί να υπολογιστεί με ανάλογη με την εξ. (2.1) σχέση [9]:

$$E = K_c \cdot ET_o \quad (2.2)$$

όπου E η ημερήσια εξάτμιση (mm/d), K_c συντελεστής επιφάνειας που για αβαθείς επιφάνειες καλυμμένες με νερό λαμβάνει την τιμή 1.05 [6].

Για τον προσδιορισμό της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας αναφοράς χρησιμοποιείται η τροποποιημένη μέθοδος Penman-Monteith όπως περιγράφεται από τον FAO-56 [6, 8] και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$ET_o = \frac{0.408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T + 273} \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0.34 \cdot u_2)} \quad (2.3)$$

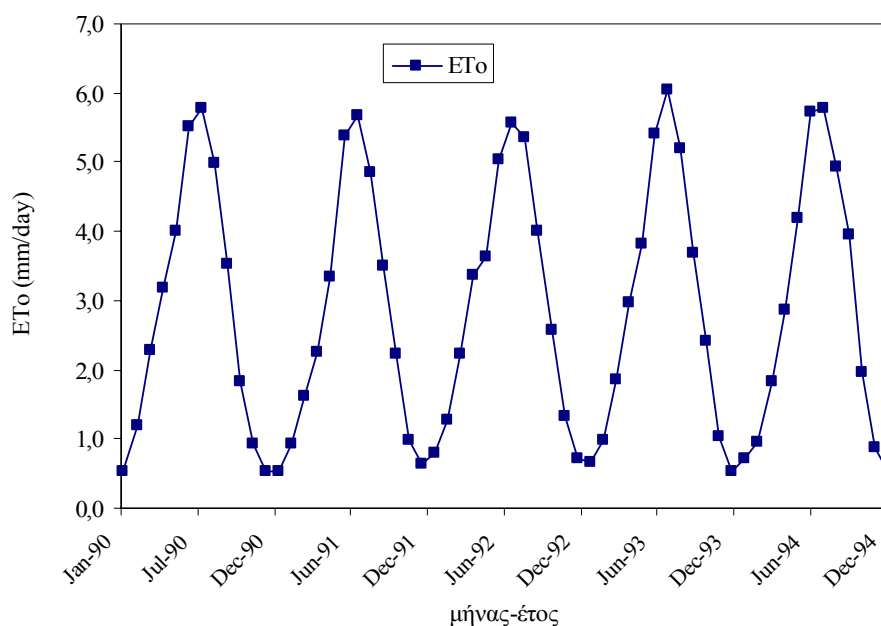
όπου ET_o η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας αναφοράς (mm/d), R_n η καθαρή ηλιακή ακτινοβολία ($\text{MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$), G η ροή θερμότητας στο έδαφος ($\text{MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$) που μπορεί να θεωρηθεί $G \approx 0$, T η μέση ημερήσια θερμοκρασία του αέρα σε ύψος 2m ($^{\circ}\text{C}$), u_2 η μέση ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 2m (ms^{-1}), e_s πίεση κορεσμένων υδρατμών (kPa), e_a πραγματική πίεση υδρατμών (kPa), Δ κλίση της καμπύλης των κορεσμένων υδρατμών στη θερμοκρασία T ($\text{kPa}^{\circ}\text{C}^{-1}$) και γ ψυχρομετρική σταθερά ($\text{kPa}^{\circ}\text{C}^{-1}$).

Για τον υπολογισμό του R_n απαιτείται η εκτίμηση ημερήσιων τιμών της ακτινοβολίας στο άνω όριο της ατμόσφαιρας (R_a) και της θεωρητικής ηλιοφάνειας (N) η οποία γίνεται με περιοδικές συναρτήσεις [10].

Από τις εξ. (2.1) και (2.3) και τις μηνιαίες τιμές κλιματικών παραμέτρων (θερμοκρασίας, ηλιοφάνειας, σχετικής υγρασίας και ταχύτητας ανέμου) των ετών 1955-1997 από το σταθμό της ΕΜΥ στη Λάρισα υπολογίζονται οι μηνιαίες τιμές εξατμισοδιαπνοής για περίοδο 43 ετών και παρουσιάζονται ενδεικτικά για τα έτη 1990-94 στο Σχήμα 2.

2.2. Υπολογισμός του υδατικού ισοζυγίου της περιοχής

Για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των ταμιευτήρων της περιοχής μελέτης απαιτείται ο υπολογισμός του υδατικού ισοζυγίου κάθε υποπεριοχής που αρδεύεται από διαφορετικό σύστημα ταμιευτήρων. Το ισοζύγιο γίνεται ανά έτος και λαμβάνει υπόψη τα τεχνικά χαρακτηριστικά των ταμιευτήρων (χωρητικότητα, έκταση) και την εξάτμιση νερού από αυτούς [9], την έκταση και υδατοκατανάλωση των καλλιεργειών (καθαρές ανάγκες για αποτελεσματικότητα των δικτύων διανομής και εφαρμογής 80%), τις βροχοπτώσεις (πραγματικές τιμές) και την μείωση της αποθηκευμένης στο έδαφος υγρασίας. Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για τους υπολογισμούς παρουσιάζονται στον Πίνακα 1 και αναφέρονται στα τεχνικά χαρακτηριστικά των ταμιευτήρων [2] καθώς και τις εξυπηρετούμενες από αυτούς περιοχές (στοιχεία Τ.Ο.Ε.Β. Πηνειού).



Σχήμα 2. Υπολογισμένες τιμές εξατμισοδιαπνοής αναφοράς (mm/d) στη Λάρισα κατά τα έτη 1990–94.

Πίνακας 1. Τεχνικά χαρακτηριστικά ταμιευτήρων και περιοχές που εξυπηρετούν

Τεχνικά χαρακτηριστικά ταμιευτήρων			Εξυπηρετούμενη περιοχή				
Ταμιευτήρας	Χωρητικότητα 10^6 m^3	Έκταση στρ.	Αρδευόμενη έκταση στρ.	Βαμβάκι %	Καλαμπόκι %	Μηδική %	Βιομηχανική ντομάτα %
1 Ελευθερίου Ι, ΙΙ	1,70	600	4000	85		15	
2 Δήμητρας	1,00	400	2600	85		15	
3 Πλατυκάμπου Ι	0,50	250	1500	85	10	5	
4 Πλατυκάμπου ΙΙ	1,45	500	4560	85	10	5	
5 Γλαύκης	2,10	550	5415	85	10	5	
6 Ναμάτων Ι, ΙΙ	2,90	983	10000	80	10	5	5
7 Καστρίου	1,10	350	4900	85		15	
8 Καλαμακίου Ι, ΙΙ	8,00	2750	20000	85		15	

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών παρουσιάζονται στον Πίνακα 2. Αυτά αναφέρονται στη μέση αποτελεσματικότητα των ταμιευτήρων, R_m , την τυπική της απόκλιση, SD_R και το συντελεστή μεταβλητότητας, CV_R , που προέρχονται από περίοδο προσομοίωσης 43 ετών. Η αποτελεσματικότητα ορίζεται από το λόγο της ωφέλιμης

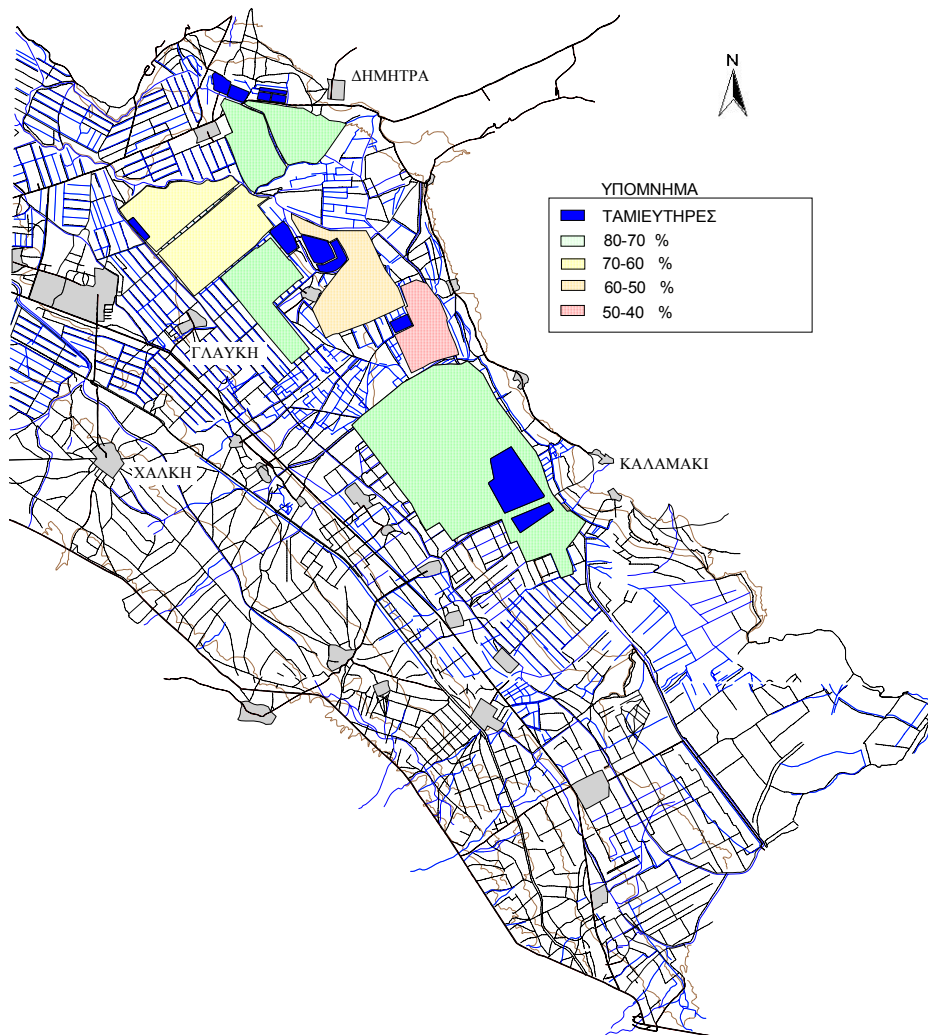
χωρητικότητας ενός ταμιευτήρα προς τις συνολικές καθαρές ανάγκες της περιοχής που εξυπηρετείται από αυτόν. Η τιμή 1 της αποτελεσματικότητας (μέγιστη τιμή) αντιπροσωπεύει πλήρη ικανοποίηση των υδατικών απαιτήσεων των καλλιεργειών κάθε υποπεριοχής.

Πίνακας 2. Χαρακτηριστικά αποτελεσματικότητας ταμιευτήρων περιοχής μελέτης

Ταμιευτήρας	Μέση τιμή, R_m	Τυπική απόκλιση, SD_R	Συντελεστής μεταβλητότητας, CV_R , %
1 Ελευθερίου Ι, ΙΙ	0,8321	0,1130	13,58
2 Δήμητρας	0,7579	0,1157	15,27
3 Πλατυκάμπου Ι	0,6600	0,1086	16,46
4 Πλατυκάμπου ΙΙ	0,6673	0,1054	15,80
5 Γλαύκης	0,8160	0,1148	14,07
6 Ναμάτων Ι, ΙΙ	0,6104	0,0994	16,28
7 Καστρίου	0,4827	0,0823	17,04
8 Καλαμακίου Ι, ΙΙ	0,7995	0,1108	13,85

Με βάση τις τιμές των παραπάνω παραμέτρων που αναφέρονται και εκφράζουν τη μεταβλητότητα της αποτελεσματικότητας των ταμιευτήρων και τις υποθέσεις (α) της ανεξαρτησίας αποτελεσματικότητας αυτής από έτος σε έτος και (β) της κανονικότητας μεταξύ των αποτελεσμάτων της ίδιας υποπεριοχής [11, 12, 13, 14], μπορεί να γίνει η συνολική αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των ταμιευτήρων της περιοχής μελέτης.

Ενδεικτικά, η αξιολόγηση γίνεται ως προς τη μέση αποτελεσματικότητα (αξιοπιστία) των ταμιευτήρων για περίοδο 10 ετών και για πιθανότητα μη υπέρβασης 10%. Ως πλέον αξιόπιστοι εκτιμώνται οι ταμιευτήρες Ελευθερίου Ι & ΙΙ (78,7%) και ακολουθούν οι: Γλαύκης (76,9%), Καλαμακίου Ι & ΙΙ (75,5%), Δήμητρας (71,1%), Πλατυκάμπου ΙΙ (62,5%), Πλατυκάμπου Ι (61,6%), Ναμάτων (57,0%) και τέλος του Καστρίου (44,9%). Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζονται γραφικά στο Σχήμα 3.



Σχήμα 3. Μέση αξιοπιστία ταμιευτήρων στην περιοχή Κάρλας για περίοδο 10 ετών και πιθανότητα 10%, κλίμακα 1:290000

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τις υπολογισμένες τιμές ελλείμματος στο υδατικό ισοζύγιο για κάθε υποπεριοχή της περιοχής μελέτης της τέως λίμνης Κάρλας, με βάση τη διαφοροποίηση των κλιματικών συνθηκών για περίοδο 43 ετών, το μέγεθος των ταμιευτήρων και το είδος και έκταση των καλλιεργειών προκύπτει:

- α) υπάρχει διαφοροποίηση στην αξιοπιστία των διαφόρων ταμιευτήρων της περιοχής μελέτης. Συνήθως, οι ταμιευτήρες δεν καλύπτουν τις αρδευτικές ανάγκες των καλλιεργειών. Κατά μέσο όρο, καλύπτεται ~ το 48 - 83% αυτών ανάλογα με την υποπεριοχή που κάθε ταμιευτήρας εξυπηρετεί. Οι πλέον αξιόπιστοι ταμιευτήρες, με βάση τις συνθήκες λειτουργίας που αναλύθηκαν, είναι του Ελευθερίου Ι & ΙΙ, της Γλαύκης, και Καλαμακίου Ι & ΙΙ και ο λιγότερο αξιόπιστος αυτός του Καστρίου.

β) υπάρχει διαφοροποίηση στην ικανοποίηση των αρδευτικών αναγκών των καλλιεργειών που αρδεύονται από τον ίδιο ταμιευτήρα από έτος σε έτος λόγω της μεταβλητότητας των κλιματικών συνθηκών. Η διαφοροποίηση αυτή όπως εκφράζεται μέσω του συντελεστή μεταβλητότητας κυμαίνεται από ~13,5 - 17%.

Με βάση την ανάλυση αξιοπιστίας των παραπάνω υποδομών ταμίευσης νερού μπορεί να γίνει αξιολόγησή τους και προγραμματισμός νέων έτσι ώστε να ανταποκρίνονται με τον καλύτερο δυνατό τρόπο στις αρδευτικές ανάγκες των καλλιεργειών κάθε υποπεριοχής.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Διεύθυνση Εγγείων Βελτιώσεων, 2005. *Εγχειοβελτιωτικά Έργα – Δραστηριότητες – Στόχοι της Δ.Ε.Β.*, Νομαρχιακή Αυτοδιοίκηση Λάρισας, Φεβρουάριος 2005.
2. Γκούμας, Κ. 2006. Οι αρδεύσεις στη Θεσσαλική πεδιάδα: επιπτώσεις στα υπόγεια και επιφανειακά νερά. *Πρακτικά Ημερίδας ΕΥΕ: Υδατικοί Πόροι και Γεωργία*, Θεσσαλονίκη, 2 Φεβρουαρίου 2006: 39-53.
3. Kotsopoulos, S. I., 1989. *On the evaluation of risk of failure in irrigation water delivery*, Ph.D. Thesis, Southampton University, UK.
4. Kotsopoulos, S. and Svehlik, Z., 1995. Risk of failure in irrigation systems: Its estimation, *Proc. of the EWRA 95 Symposium on Water Resources under Drought or Water Shortage Conditions*, Nicosia, Cyprus, 14-18 March 1995: 243-250.
5. Καλφούντζος, Δ., Αλεξίου, Ι., Μαγαλιός, Σ., Βύρλας, Π. και Τσιτσιπά, Γ., 1999. Έμπειρο σύστημα ολοκληρωμένης διαχείρισης αρδευτικού νερού: Εδίκη εφαρμογή στον ΤΟΕΒ Πηνειού, *Πρακτικά 4ου Εθνικού Συνεδρίου ΕΕΔΥΠ: Διαχείριση Υδατικών Πόρων στις Ευαίσθητες Περιοχές του Ελλαδικού Χώρου*, Βόλος, 17-19 Ιουνίου 1999: 20-27.
6. 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.
7. Kotsopoulos, S., Kalfountzos, D., Alexiou, I., Zerva, G., Karamaligas, C. and Vyrlas, P., 2003. Actual evapotranspiration and soil moisture studies in irrigated cotton fields, *European Water* (e-bulletin of EWRA), Issue 3 / 4: 22-28.
8. Κωτσόπουλος, Σ. 2006. *Υδρολογία*, Εκδόσεις Ίων, Αθήνα.
9. Κωτσόπουλος, Σ., Αλεξίου, Ι., Λόκκας, Φ., Γραβάνης, Γ. και Μαγαλιός, Σ., 2006. Υπολογισμός των απωλειών εξάτμισης από τους ταμιευτήρες του Ν. Λάρισας, *Πρακτικά 10^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου ΕΥΕ*, Ξάνθη, 13-16 Δεκεμβρίου 2006: 103-110.
10. Kotsopoulos, S. and Babajimopoulos, C., 1997. Analytical estimation of modified Penman equation parameters”, *J. Irrig. and Drain. Engng.*, ASCE Vol. 123 (4), pp. 253 - 256.
11. Haan, C. T., 1977. *Statistical Methods in Hydrology*, the Iowa State University Press, Ames, Iowa.
12. Kite, G. W., 1985. *Frequency and Risk Analyses in Hydrology*, Water Resources Publications, Colorado.
13. Yevjevich, V., 1982. *Probability and Statistics in Hydrology*, Water Resources Publications, Colorado.
14. Chatfield, C., 1983. *Statistics for Technology*, Chapman and Hall, London.

(217)

ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΟΥ ΑΡΔΕΥΤΙΚΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΤΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΤΗΣ ΟΔΗΓΙΑΣ 2000/60

Ν. Δέρκας¹, Π. Λόντρα¹ και Α. Καραμάνος²

Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμ. Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων & Γ. Μηχανικής¹,
Τμ. Φυτικής Παραγωγής², Ιερά Οδός 75, 11855 Αθήνα, ndercas1@aua.gr.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται η υφιστάμενη κατάσταση στην Ελλάδα όσον αφορά στις αρδεύσεις και στα κύρια προβλήματα διαχείρισης του αρδευτικού νερού που οδηγούν στην αλόγιστη χρήση των υδατικών πόρων. Η Οδηγία 2000/60 δημιουργεί μια νέα κατάσταση εισάγοντας την ολοκληρωμένη διαχείριση σε επίπεδο υδρολογικής λεκάνης και λαμβάνοντας υπόψη το περιβαλλοντικό κόστος. Εξετάζονται επίσης διάφορες χρονίζουσες καταστάσεις στη χρήση του αρδευτικού νερού που δεν συνάδουν με την Οδηγία και προτείνονται βελτιώσεις στην οργάνωση της διαχείρισης των υδατικών πόρων με τη δημιουργία οργανισμών κοινής ωφέλειας για τη διαχείριση του συνόλου των υδατικών πόρων σε επίπεδο λεκάνης απορροής, τη δημιουργία γραφείων αρδεύσεων όπως και τη χρήση νέας τεχνολογίας υδροληψιών.

PROPOSALS FOR IMPROVED IRRIGATION WATER MANAGEMENT ACCORDING TO WFD 2000/60

N. Dercas¹, P. Londra¹ and A. Karamanos²

Agricultural University of Athens, Dep. of Natural Resources Management and
Agricultural Engineering¹, Dep. of Crop Production², Iera Odos 75, 11855 Athens,
ndercas1@aua.gr.

ABSTRACT

This paper presents the current situation in Greece with regard to irrigations, as well as to the main problems of irrigation water management, which lead to an irrational use of water resources. The EC Directive 2000/60 introduces the principle of integrated management at the level of watershed and takes into consideration the environmental cost. Several issues of water use contrary to the Directive are examined and certain improvements are suggested regarding water resources management such as the creation of public utility companies responsible for the total water resources at watershed level, as well as the creation of irrigation agencies and the use of new technology hydrants.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η γεωργία είναι στην Ελλάδα ο μεγαλύτερος καταναλωτής και ρυπαντής του νερού. Τα προβλήματα που παρουσιάζονται στη διαχείριση του αρδευτικού νερού είναι πολλά και μεγάλα: χαμηλή συντήρηση των έργων, μεγάλες καταναλώσεις και απώλειες νερού, υπεράντληση και υφαλμύριση υπόγειων υδροφορέων. Στα πλαίσια της εναρμόνισης της εθνικής νομοθεσίας με τη νέα κοινοτική Οδηγία 2000/60 [10] ψηφίστηκε ο Νόμος 3199/2003 [9]. Σύμφωνα με το νόμο αυτό εισάγεται μία νέα οργανωτική δομή για την ολοκληρωμένη διαχείριση των υδατικών πόρων που θα γίνεται σε επίπεδο υδρολογικής λεκάνης. Επίσης, η Οδηγία 2000/60 επιτάσσει την ανάκτηση κόστους των υπηρεσιών ύδατος συμπεριλαμβανομένου του κόστους για το περιβάλλον και τους φυσικούς πόρους σύμφωνα με την αρχή «ο ρυπαίνων πληρώνει». Στη συνέχεια θα εξεταστούν τα κακώς κείμενα που αποτελούν συνήθειες και πρακτικές πολλών δεκαετιών και θα γίνουν προτάσεις για την αντιμετώπισή τους στα πλαίσια μιας αποτελεσματικότερης διαχείρισης.

2. ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

Στην Ελλάδα η γεωργία αποτελεί το μεγαλύτερο χρήστη-καταναλωτή του νερού. Συγκεκριμένα, το 85% των καταναλισκόμενων υδατικών πόρων χρησιμοποιείται για αρδευτικούς σκοπούς. Η καλλιεργούμενη γη ανέρχεται σε 34,7 εκατ. στρέμματα, από τα οποία τα 14,3 εκατ. στρέμματα αρδεύονται. Από αυτά το 65% αφορά σε αροτραίες καλλιέργειες, το 24% σε δενδρώδεις καλλιέργειες, το 8% σε κηπευτικές καλλιέργειες και το 3% σε αμπέλια [6].

Τα συλλογικά αρδευτικά έργα αντιστοιχούν στο 44% της αρδευόμενης έκτασης και τα ιδιωτικά έργα στο 56%. Οι πηγές τροφοδοσίας των δημοσίων έργων είναι οι ποταμοί και οι πηγές (42%), οι τεχνητές λίμνες (25%), οι γεωτρήσεις και τα φρέατα (24%), οι φυσικές λίμνες (5%) και οι στραγγιστικές τάφροι (4%) με συνεχή τάση αύξησης των τεχνητών υδατοσυλλογών. Οι πηγές τροφοδοσίας των ιδιωτικών έργων είναι οι γεωτρήσεις (82%), οι ποταμοί και οι πηγές (13%), οι τεχνητές λίμνες (2%) και οι στραγγιστικές τάφροι (3%) [7].

Η εφαρμογή του νερού στον αγρό στα συλλογικά έργα γίνεται κατά 37% με επιφανειακή άρδευση, 53% με τεχνητή βροχή και 10% με στάγδην άρδευση, με τάση μείωσης της επιφανειακής άρδευσης, ενώ στα ιδιωτικά έργα γίνεται κατά 7% με επιφανειακή άρδευση, 49% με τεχνητή βροχή και 44% με στάγδην άρδευση.

Οι μέγιστες ανάγκες των καλλιεργειών της χώρας μας σε νερό έχουν υπολογιστεί σε 4.069 Mm³/έτος [14].

Αξίζει να σημειωθεί ότι στη χώρα μας υπάρχουν περίπου 200.000 γεωτρήσεις και φρέατα για αρδευτικούς σκοπούς, 40 ποταμοί ή μεγάλοι χείμαρροι, από τους οποίους οι 13 παρουσιάζουν θερινή παροχή μεγαλύτερη των 3 m³/sec, 21 μεγάλες φυσικές λίμνες, 52 μεγάλες καρστικές πηγές και πάνω από 70 τεχνητές λίμνες με ολικό διαθέσιμο όγκο μεγαλύτερο από 9,5x10⁹ m³ [16]. Το συνολικό ετήσιο υδατικό δυναμικό της χώρας εκτιμάται σε 70x10⁹ m³, συμπεριλαμβανομένου και αυτού που εισρέει από τις γειτονικές χώρες (14x10⁹ m³). Από αυτό καταναλώνονται ετησίως 5,5x10⁹ m³ (εξ αυτών 4,7x10⁹ m³ για τη γεωργία) και εκτιμάται μία αύξηση της κατανάλωσης ετησίως μεγαλύτερη του 3% [15].

Από την επαναχρησιμοποίηση υγρών αποβλήτων των υπαρχουσών Δημοτικών Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων, για σκοπούς άρδευσης, εκτιμάται ότι θα προέκυπτε μία εξοικονόμηση νερού της τάξης των 3,2% σε καθαρό νερό [13]. Στη συνέχεια δίνονται ορισμένα παραδείγματα χρήσης επεξεργασμένων αποβλήτων για αρδευτικούς σκοπούς:

- Λιβαδειά: 3.500 m³/d για άρδευση βαμβακιού.
- Άμφισσα: 400 m³/d για άρδευση ελαιοδέντρων.
- Παλαιόκαστρο (Κρήτη): 280 m³/d για άρδευση ελαιοδέντρων.
- Ζάκρος (Κρήτη): 210 m³/d για άρδευση ελαιοδέντρων
- Αρχάνες (Κρήτη): 40 m³/h για άρδευση 14 ha ελαιοδέντρων και αμπελιών.

Η διαχείριση των υδατικών πόρων στα συλλογικά εγγειοβελτιωτικά έργα πραγματοποιείται από 452 φορείς, οι οποίοι είναι όργανα διοίκησης, λειτουργίας και συντήρησης αυτών. Από αυτούς τους φορείς 10 είναι Γενικοί ΟΕΒ, 412 Τοπικοί ΟΕΒ, 2 Ειδικοί Οργανισμοί (Αυτόνομος Οργανισμός Στυμφαλίας Ασωπού Κορινθίας και Οργανισμός Κωπαΐδας), 22 Προσωρινές Διοικούσες Επιτροπές και 6 Τοπικές Επιτροπές Άρδευσης [16].

Οι καταναλώσεις νερού και ενέργειας είναι αυξημένες στα δημόσια δίκτυα, όπου καταναλώσεις της τάξης των 1.000 m³/στρέμμα είναι συνηθισμένες και οι απώλειες φτάνουν και ξεπερνούν το 50%. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι σε έρευνα που έγινε στα 16 αντλιοστάσια του δικτύου Πηνειού Ηλείας [1] κατεγράφησαν καταναλώσεις που κυμαίνονταν από 500 έως 1700 m³/στρέμμα. Αιτίες είναι η παλαιότητα των δικτύων, η κακή συντήρηση, η έλλειψη πόρων και μέσων, η κακή τιμολόγηση των υπηρεσιών καθώς και η τεχνική ανεπάρκεια των χρηστών. Επακόλουθο της μεγάλης σπατάλης νερού είναι και η μεγάλη κατανάλωση και σπατάλη ενέργειας. Η υπερκατανάλωση ενέργειας προκαλεί αύξηση του κόστους λειτουργίας του δικτύου με συνέπεια την αδυναμία ή απροθυμία εξόφλησης των τελών από τους χρήστες και την επακόλουθη διακοπή ηλεκτροδότησης. Αντίθετα, στα ιδιωτικά έργα, όπου το κόστος άρδευσης είναι σημαντικό και βαρύνει εξ ολοκλήρου τον παραγωγό, υπάρχει κίνητρο για εξοικονόμηση νερού. Έτσι, σε συνδυασμό με τα μικρά μήκη μεταφοράς και τα σύγχρονα μέσα εφαρμογής, οι απώλειες είναι περιορισμένες και οι καταναλώσεις συγκρατούνται στα επίπεδα των 500 m³/στρέμμα.

Η κοστολόγηση των υπηρεσιών παροχής αρδευτικού νερού και η τιμολογιακή πολιτική της χρήσης του είναι προβληματικές διαδικασίες στη σημερινή ελληνική πραγματικότητα. Η χρέωση γίνεται συνήθως σύμφωνα με την αρδευόμενη έκταση και όχι τον καταναλισκόμενο όγκο. Η τιμολόγηση σύμφωνα με τον καταναλισκόμενο όγκο, ενώ θα οδηγούσε σε ορθολογικότερες καταναλώσεις, συνήθως δεν εφαρμόζεται επειδή πολλοί παραγωγοί χρησιμοποιούν το ίδιο υδροστόμιο αλλά και επειδή οι υδρομετρητές είναι συνήθως εκτός λειτουργίας. Η εκτίμηση του κόστους στα συλλογικά αρδευτικά δίκτυα γίνεται από κάθε φορέα διοίκησης ξεχωριστά, με βάση τα έξοδα λειτουργίας (οι δαπάνες για την άντληση είναι ιδιαίτερα υψηλές δεδομένων των υψηλών καταναλώσεων σε πολλά δίκτυα), τις πληρωμές του προσωπικού διοίκησης και το κόστος συντήρησης που όμως είναι ιδιαίτερα χαμηλό, με αποτέλεσμα την κακή λειτουργική κατάσταση πολλών συλλογικών έργων. Διευκρινίζεται ότι η συντήρηση έχει επισκευαστικό χαρακτήρα και όχι προληπτικό. Επίσης, δεν προβλέπεται κόστος απόσβεσης των έργων. Το κόστος αυτό το αναλαμβάνει ο κρατικός προϋπολογισμός. Το λειτουργικό κόστος του έργου κατανέμεται ανά στρέμμα αρδευόμενης έκτασης. Στον Πίνακα 1 που ακολουθεί δίνονται μερικά παραδείγματα τιμολόγησης νερού άρδευσης σε συλλογικά έργα.

Στις ιδιωτικές γεωτρήσεις ο χρήστης επιβαρύνεται με το οικονομικό κόστος (κόστος άντλησης, συντήρησης και απόσβεσης εγκατάστασης, άλλα κόστη) όχι όμως με περιβαλλοντικό κόστος και το κόστος φυσικών πόρων.

Πίνακας 1. Τιμολογήσεις αρδευτικού νερού σε συλλογικά έργα

Περιοχή	Φορέας διοίκησης	Τιμολόγιο €/στρέμ/έτος	Παρατηρήσεις
Πεδιάδα Σερρών*	ΤΟΕΒ Ν. Σκοπού	17,91	
	ΤΟΕΒ Μεγαλοχωρίου- Χρυσοχωρίου	5,00	
Τύρναβος Λάρισας*	ΤΟΕΒ Μάτι Τυρνάβου	25	ανεξαρτήτως καλλιέργειας, με επιφανειακό δίκτυο
		31-44	ανάλογα με την καλλιέργεια για αγροτεμάχια εντός δικαιοδοσίας Οργανισμού
Κωπαϊδικό πεδίο [12]	Οργανισμός Κωπαΐδας	8,80	για αγροτεμάχια εκτός δικαιοδοσίας Οργανισμού
		14,67	δικαιοδοσίας Οργανισμού
Πηνειός Ηλείας [1]	ΤΟΕΒ Σαβαλίων	12	στάγδην άρδευση
		15	άλλες μέθοδοι άρδευσης
	ΤΟΕΒ Λεχαινών	8-25,5	ανάλογα με τον τρόπο άρδευσης και την καλλιέργεια
€/m ³			
Δυτική Κρήτη [11]	ΟΑΔΥΚ	0,026	άρδευση με φυσική ροή χρήστες εντός ΤΟΕΒ
		0,050-0,082	άρδευση με άντληση χρήστες εντός ΤΟΕΒ
		0,067-0,132	άρδευση με άντληση από χρήστες εκτός ΤΟΕΒ

* Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης (προσωπική επαφή)

Όσον αφορά στην ποιότητα των υδατικών πόρων της χώρας μας θα πρέπει να σημειωθεί ότι η υφαλμύριση είναι η πρώτη ρύπανση των υπόγειων υδάτων που έχει διαγνωστεί εδώ και πολλά χρόνια και αποτελεί το μεγαλύτερο ποιοτικό πρόβλημα. Υπάρχει η φυσική υφαλμύριση που οφείλεται στις υδρογεωλογικές συνθήκες και η υφαλμύριση που σχετίζεται με την υπερεκμετάλλευση των υπόγειων νερών και τη σημαντική ταπείνωση της ελεύθερης επιφάνειας του υπόγειου υδροφορέα σε υδρολογικές λεκάνες ανοικτές στη θάλασσα. Στην πρώτη περίπτωση, αυτή της φυσικής υφαλμύρισης, μπορούν να αναφερθούν οι παρακάτω περιπτώσεις ποιοτικής υποβάθμισης: η μεγάλη καρστική πηγή Αλμυρού Ηρακλείου, οι πηγές Κιβερίου, η πηγή Αλμυρού Λασιθίου, οι πηγές του καρστικού συστήματος Όσσας στα όρια των νομών Λάρισας-Μαγνησίας, οι πηγές Κάτω Σουλίου Μαραθώνα, οι πηγές Κίρας και Μύλων Ν. Φωκίδας, η καρστική περιοχή Ανατ. Κορινθίας, οι μεγάλες καρστικές πηγές Μεσσηνιακής και Λακωνικής Μάνης, κ.α. Στη δεύτερη περίπτωση, της υφαλμύρισης λόγω υπερεκμετάλλευσης των υπόγειων νερών, μπορούν να αναφερθούν οι παρακάτω περιπτώσεις ποιοτικής υποβάθμισης: Αργολικό πεδίο, πεδιάδα Κομοτηνής-Ξάνθης, Βόρεια Ρόδος, κάμπος Μαραθώνα, κάμπος Ασωπού-Μολάων Λακωνίας, Αλμυρός Μαγνησίας, δέλτα Έβρου, Ανθεμούντα Χαλκιδικής, Ίρια και Ερμιονίδα Ν. Αργολίδας, κάμπος Ιεράπετρας, περιοχή Τυμπακίου Ν. Ηρακλείου, κάμπος Ρεθύμνου, κ.α. καθώς και οι περισσότεροι υδροφορείς σε κοκκώδεις σχηματισμούς των νησιών του Αιγαίου [17].

Επίσης, προβλήματα ποιότητας υπόγειων υδάτων σχετίζονται με το φαινόμενο της νιτρορύπανσης. Η νιτρορύπανση φαίνεται να έχει τοπικό έως σημειακό χαρακτήρα και επικεντρώνεται στα υπόγεια νερά σε ζώνες όπου ασκείται εντατική γεωργία με αζωτολιπάνσεις, και σε οικιστικές ζώνες όπου λειτουργούν απορροφητικοί βόθροι. Αναφέρεται ότι οι πεδιάδες Σερρών, η Θεσσαλία, το Κωπαϊδικό και Αργολικό πεδίο, η λεκάνη Πηνειού Ηλείας, οι πεδιάδες Κιλκίς και Θεσσαλονίκης και οι πεδιάδες Άρτας και Ιωαννίνων ανήκουν στις ζώνες προτεραιότητας με τάσεις να καταστούν προβληματικές από άποψη νιτρορύπανσης [16].

Προβλήματα ποιότητας επιφανειακών υδάτων εντοπίζονται κυρίως στους ποταμούς Πηνειό Λάρισας, Αξιό, Στρυμόνα και Έβρο, ενώ αξίζει να σημειωθεί η πολύ καλή ποιοτική κατάσταση του Νέστου στην είσοδό του στη χώρα [15].

3. ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΠΟΥ ΑΝΤΙΚΕΙΝΤΑΙ ΠΡΟΣ ΤΗ ΝΕΑ ΟΔΗΓΙΑ

Είναι αντιληπτό ότι οι υπερκαταναλώσεις νερού που πραγματοποιούνται στον αγροτικό τομέα με αποτέλεσμα τη σπατάλη του σημαντικού αυτού φυσικού πόρου, όπως επίσης και την υποβάθμιση των υπόγειων υδροφορέων μέσω της υπαλμύρινσης, δεν συνάδουν με το περιβαλλοντικό πνεύμα της Οδηγίας. Επίσης, η ταυτόχρονη αξιοποίηση υδατικών πόρων από κρατικούς ή άλλους φορείς (ΔΕΗ, ΔΕΒ, Δασαρχία, Διευθύνσεις Γεωργίας, ΤΥΔΚ-Κοινότητες κ) και ιδιώτες, χωρίς να γνωρίζει ο ένας τομέας αν στην ίδια υδρολογική λεκάνη προγραμματίζεται έργο από κάποιον άλλον, είναι κατάσταση που αντίκειται προς την λογική της ολοκληρωμένης διαχείρισης σε επίπεδο υδρολογικής λεκάνης [4]. Δεν υπάρχει, τουλάχιστον μέχρι στιγμής, ο απαραίτητος ενιαίος προγραμματισμός, συνεννόηση και συντονισμός για τα έργα αξιοποίησης υδατικών πόρων από διάφορους χρήστες (μεμονωμένοι ιδιώτες και συλλογικοί φορείς) ή κρατικούς φορείς στην ίδια υδρολογική λεκάνη.

Ένα άλλο σημαντικό πρόβλημα που υπάρχει με τη διαχείριση των υδατικών πόρων στον αγροτικό χώρο είναι η ελλιπής και αποσπασματική γνώση των διαθεσίμων ποσοτήτων και των καταναλώσεων. Το πρόβλημα αυτό εμφανίζεται κάθε φορά που πραγματοποιείται μια έρευνα ή μελέτη και χρειάζονται στοιχεία παροχών σε υδατορρέυματα και καταναλώσεων μέσα σε δίκτυα. Οι μετρήσεις παροχών είναι περιορισμένες σε αριθμό και συγχρόνως είναι συχνά αμφίβολης ποιότητας. Όσον αφορά στις καταναλώσεις, βασίζονται κυρίως στις καταναλώσεις ενέργειας για άντληση και όχι σε μέτρηση παροχών. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην κακή συντήρηση των παροχομέτρων και είναι λυπηρό διότι στερεί τους υπεύθυνους φορείς από την δυνατότητα να γνωρίζουν την πραγματική κατάσταση λειτουργίας των δικτύων και να προβούν σε ανάλυση λειτουργίας τους.

Η δυσκολία εκτίμησης των καταναλώσεων έγινε φανερή και κατά τη σύνταξη αυτού του άρθρου όταν, προκειμένου να συλλέξουμε στοιχεία για τις καταναλώσεις στον αγροτικό τομέα ανά υδατικό διαμέρισμα, ανατρέξαμε στο Σχέδιο Δράσης που έχει εκπονηθεί για το Υπουργείο Ανάπτυξης [15]. Διαπιστώθηκε λοιπόν ότι σε πολλά Υδατικά Διαμερίσματα γινόταν απλώς εκτίμηση των υδατικών αναγκών με μοντέλα εξατμισοδιαπνοής και υπολογιζόταν η κατανάλωση βάσει κάποιων παραδοχών στην αποτελεσματικότητα μεταφοράς και εφαρμογής. Προφανώς, το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι δεν υπάρχει καταγραφή και συγκέντρωση σε κεντρικό επίπεδο της κατανάλωσης νερού σε ετήσια βάση σε κάθε δίκτυο και γεώτρηση.

Σημαντικό επίσης είναι το πρόβλημα των παρανόμων γεωτρήσεων που οδηγούν σε υπερεκμετάλλευση των υπογείων υδροφορέων με τα προαναφερθέντα προβλήματα. Παρόλο που και στον προγενέστερο νόμο για τους υδατικούς πόρους υπήρχε η έννοια του 'νερού-κοινωνικού αγαθού' (ο κάθε χρήστης μπορεί να χρησιμοποιήσει υδατικούς πόρους μέχρι να καλύψει τις ανάγκες του - ορθολογικά εκτιμώμενες - και πέραν αυτού

οι πλεονάζουσες ποσότητες ανήκουν στο κοινωνικό σύνολο), έχει αναπτυχθεί η αντίληψη ότι το νερό μιας ιδιωτικής γεώτρησης ανήκει στον ιδιοκτήτη της, ο οποίος μπορεί να αντλεί όση ποσότητα επιθυμεί (να το εμπορεύεται επίσης) και να μην πληρώνει κανένα περιβαλλοντικό κόστος για αυτή τη χρήση.

4. ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Η καλή γνώση της υφισταμένης κατάστασης είναι βασική προϋπόθεση για την αντιμετώπιση του προβλήματος. Είναι απαραίτητο, τόσο σε τοπικό όσο και σε κεντρικό επίπεδο να υπάρχουν αξιόπιστες πληροφορίες για τις ανάγκες των φυτών, τις καταγεγραμμένες παροχές και πιέσεις, όπως επίσης και τους καταναλωθέντες όγκους ετησίως σε κάθε συλλογικό δίκτυο. Στοιχεία επίσης σχετικά με τις καταναλώσεις και τη στάθμη του υπόγειου υδροφορέα θα πρέπει να υπάρχουν για κάθε γεώτρηση. Πρέπει να εκλείνουν οι παράνομες γεωτρήσεις. Έχοντας γνώση της υφισταμένης κατάστασης (διαθέσιμο υδατικό δυναμικό, ανάγκες σε νερό, καταναλώσεις, προβλήματα που παρουσιάζουν τα συλλογικά δίκτυα, στάθμη των υδροφορέων) θα είναι δυνατόν να προγραμματιστούν ορθολογικά νέα έργα, όπως και έργα αναβάθμισης και εκσυγχρονισμού των ήδη υπαρχόντων και να γίνει καλύτερη διαχείριση των υφισταμένων υποδομών. Η τιμολόγηση του νερού πρέπει επίσης να συναρτάται απαραίτητως προς τον καταναλισκόμενο όγκο βάσει ενός προοδευτικού τιμολογίου. Το κόστος του νερού πρέπει να αποτελεί κίνητρο ώστε οι χρήστες του να το χρησιμοποιούν αποδοτικά. Η Οδηγία 2000/60 για να πετύχει τους στόχους της αιεφόρου χρήσης των υδατικών πόρων εφαρμόζει την αρχή «ο ρυπαίνων πληρώνει» και θεσπίζει οικονομικά μέσα (τιμολόγηση που επιτρέπει την ανάκτηση του κόστους των υπηρεσιών ύδατος, του περιβαλλοντικού κόστους και του κόστους των πόρων). Η πλήρης εκμετάλλευση των ως άνω οικονομικών μέσων θα συμβάλει στην αιεφόρο διαχείριση των υδατικών πόρων. Τα μέτρα αυτά πρέπει να εφαρμοστούν τόσο στους χρήστες συλλογικών δικτύων όσο και ιδιωτικών γεωτρήσεων.

Τα δεδομένα που προαναφέρθηκαν θα δίνουν τη δυνατότητα στο τέλος κάθε καλλιεργητικής περιόδου να γίνεται εκτίμηση της αποτελεσματικότητας χρήσης του νερού με στόχο την περαιτέρω βελτίωσή της. Για την επίτευξη του στόχου αυτού πρέπει να μειωθούν οι απώλειες σε όλα τα στάδια, μεταφορά, διανομή και εφαρμογή του αρδευτικού νερού. Συγχρόνως, θα παρακολουθείται η ανάπτυξη των αρδεύσεων μέσα στην περίμετρο και ο βαθμός αξιοποίησης των έργων. Η συντήρηση των έργων πρέπει να γίνεται μέσα στα πλαίσια πρόληψης και όχι επισκευής. Το κόστος ενός καλού επιπέδου συντήρησης είναι ετησίως 1% της αρχικής επένδυσης για το δίκτυο των αγωγών, και 3-5 % για το αντλιοστάσιο [2].

5. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΗ ΟΡΓΑΝΩΤΙΚΗ ΔΟΜΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Βάσει του νόμου 3199/2003 [9] συστήθηκαν η Εθνική Επιτροπή Υδάτων, το Εθνικό Συμβούλιο Υδάτων, η Κεντρική Υπηρεσία Υδάτων, η Διεύθυνση Υδάτων και το Περιφερειακό Συμβούλιο Υδάτων σε κάθε Περιφέρεια. Τόσο το Εθνικό όσο και τα Περιφερειακά Συμβούλια Υδάτων είναι όργανα δημόσιας διαβούλευσης.

Η Εθνική Επιτροπή Υδάτων χαράσσει την πολιτική για την προστασία και διαχείριση των υδάτων, παρακολουθεί και ελέγχει την εφαρμογή της και εγκρίνει, μετά από εισήγηση του Υπουργού Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων και γνώμη του Εθνικού Συμβουλίου Υδάτων, τα εθνικά προγράμματα προστασίας και διαχείρισης του υδατικού δυναμικού της χώρας. Η Εθνική Επιτροπή Υδάτων υποβάλλει στη Βουλή και στο Συμβούλιο Υδάτων ετήσια έκθεση σχετικά με την κατάσταση του

υδάτινου περιβάλλοντος της χώρας, την εφαρμογή της νομοθεσίας για την προστασία και διαχείριση των υδάτων, καθώς και για τη συμβατότητα με το κοινοτικό κεκτημένο.

Η Κεντρική Υπηρεσία Υδάτων (ΚΥΥ) που συστήθηκε στο ΥΠΕΧΩΔΕ καταρτίζει τα εθνικά προγράμματα προστασίας και διαχείρισης του υδατικού δυναμικού της χώρας και παρακολουθεί και συντονίζει την εφαρμογή τους. Τα προγράμματα, πριν την έγκρισή τους εισάγονται για διαβούλευση στο Εθνικό Συμβούλιο Υδάτων. Η ΚΥΥ καταρτίζει επίσης την ετήσια έκθεση της Εθνικής Επιτροπής Υδάτων, εισηγείται τους γενικούς κανόνες κοστολόγησης και τιμολόγησης των υδάτων, παρακολουθεί την τήρησή τους, παρακολουθεί σε εθνικό επίπεδο την ποιότητα και ποσότητα των υδάτων σε συνεργασία με τις Διευθύνσεις Υδάτων των Περιφερειών και μεριμνά για την ανάπτυξη και λειτουργία εθνικού δικτύου παρακολούθησης της ποιότητας και της ποσότητας των υδάτων. Επίσης, η ΚΥΥ διαχειρίζεται βάση υδρολογικών και μετεωρολογικών δεδομένων σε εθνικό δίκτυο και μεριμνά για τη διαρκή ενημέρωσή της, κ.α.

Η προαναφερθείσα οργανωτική δομή εξασφαλίζει μια διαχείριση σε επίπεδο υδρολογικής λεκάνης, όπως απαιτεί η Οδηγία 2000/60, αλλά δεν γίνεται φανερό πώς θα εξασφαλισθεί η βελτίωση της αποτελεσματικότητας των οργανισμών που έχουν την ευθύνη των συλλογικών έργων (ΓΟΕΒ, ΤΟΕΒ κ.ά.) και πώς θα υποστηριχθούν οι οργανισμοί αυτοί τόσο σε τεχνικό όσο και οικονομικό επίπεδο για να φέρουν σε πέρας το έργο που τους έχει ανατεθεί. Με βάση τη διεθνή εμπειρία, τα αγροτικά δίκτυα με καλό επίπεδο συντήρησης δύσκολα επιτυγχάνουν ισοσκελισμένους προϋπολογισμούς (οι αγροτικές εκμεταλλεύσεις δεν μπορούν να αντέξουν υψηλό κόστος νερού), γεγονός που υποχρεώνει τους διαχειριστές να προστρέχουν σε επιδοτήσεις. Ένας τρόπος αντιμετώπισης του προβλήματος που εφαρμόζεται από την Société du Canal de Provence (SCP) είναι η υψηλότερη κοστολόγηση στο βιομηχανικό και αστικό νερό και η χαμηλότερη κοστολόγηση του αγροτικού (έμμεση επιδότηση της βιομηχανίας και των αστικών κέντρων στη γεωργία). Φυσικά αυτό είναι εφικτό επειδή η συγκεκριμένη εταιρεία κοινής ωφέλειας είναι ο διαχειριστής του συνόλου των υδατικών πόρων της Προβηγκίας (Ν. Γαλλία).

Προκειμένου να υπάρξει μια ουσιαστική τεχνική υποστήριξη των οργανισμών διαχείρισης των συλλογικών έργων, αναβάθμιση της συντήρησης και λειτουργικότητας, όπως επίσης και έλεγχος των γεωτρήσεων που λειτουργούν (όγκοι που αντλούνται, παράνομες γεωτρήσεις), πρέπει να δημιουργηθούν οργανισμοί κοινής ωφέλειας που θα αναλάβουν αυτόν το ρόλο για ευρύτερες περιοχές (ένα σύνολο υδατικών διαμερισμάτων). Οι ΤΟΕΒ, ΓΟΕΒ και οι άλλοι οργανισμοί που σχετίζονται με τη διαχείριση του αγροτικού νερού θα συνεχίσουν το έργο τους και θα συνεργάζονται με τους νέους αυτούς οργανισμούς. Οι οργανισμοί αυτοί θα παρακολουθούν την εξέλιξη των δικτύων, θα τα αναλύουν και θα εντοπίζουν τα προβλήματά τους. Θα ελέγχουν τις μελέτες νέων δικτύων ή τις μελέτες αναβάθμισης και εκσυγχρονισμού ήδη λειτουργούντων δικτύων. Θα επικουρούν τους προαναφερθέντες οργανισμούς (ΤΟΕΒ, ΓΟΕΒ κ) και σε θέματα συντήρησης, οικονομικής και εμπορικής διαχείρισης. Ένα επιτελείο γεωπόνων, μηχανικών, οικονομολόγων, ειδικών στη διαχείριση θα επικουρούν όλους τους οργανισμούς διαχείρισης υδατικών πόρων στην περιοχή ευθύνης του οργανισμού, αναπτύσσοντας τεχνογνωσία που θα μπορούσε να επιτρέψει μια διεθνή δραστηριότητα του οργανισμού. Στο συμβούλιο διοίκησης των οργανισμών αυτών θα πρέπει να συμμετέχουν εκπρόσωποι της κεντρικής διοίκησης, εκλεγμένοι άρχοντες της περιοχής, εκπρόσωποι των χρηστών και τεχνοκράτες με εμπειρία στο αντικείμενο. Η συμμετοχή των εκπροσώπων των τοπικών φορέων και των χρηστών θα επιτρέψει στο διοικητικό συμβούλιο αυτών των οργανισμών να αποτελέσουν ένα επί πλέον βήμα δημόσιας διαβούλευσης που είναι αναγκαία στην διαχείριση των υδατικών πόρων. Σημειώνεται ότι οι ευρείες διαβουλεύσεις των ενδιαφερομένων φορέων με την

συμμετοχή όλων των χρηστών είναι βασικής σημασίας για την ανάπτυξη και αποδοχή πολιτικών τιμολόγησης με σαφείς περιβαλλοντικούς στόχους [3].

Επίσης, είναι αναγκαία η δημιουργία γραφείων αρδεύσεων που θα μπορούσαν να υπάγονται στον προαναφερθέντα οργανισμό, με σκοπό την ενημέρωση και εκπαίδευση των αγροτών σε θέματα άρδευσης. Επίσης, τα γραφεία αρδεύσεως μπορούν να επιφορτιστούν και με τον αναγκαίο έλεγχο των χαρακτηριστικών των αρδευτικών συστημάτων μέσα σε κάθε αρδευτική περίμετρο. Τα συστήματα αυτά πρέπει να είναι πιστοποιημένα και με χαρακτηριστικά που συνάδουν με αυτά του δικτύου. Με αυτό τον τρόπο δεν θα υπάρχει κίνητρο να επέμβουν οι χρήστες στο συλλογικό δίκτυο (αφαίρεση περιοριστών παροχής και ρυθμιστών πίεσης), και η αποτελεσματικότητα των αρδεύσεων θα είναι υψηλότερη. Τα γραφεία αρδεύσεων θα πρέπει να αναλάβουν και τον έλεγχο στη χρήση του νερού των γεωτρήσεων (καταναλωθέντες όγκοι νερού, αρδευτικά συστήματα που χρησιμοποιούνται, αποτελεσματικότητα νερού άρδευσης).

Πρέπει απαραίτητα να γίνεται χρέωση του νερού σύμφωνα με τον καταναλισκόμενο όγκο, γεγονός που θα οδηγήσει σε ορθολογικότερες καταναλώσεις. Στην κατεύθυνση αυτή μπορεί να βοηθήσει η χρήση υδροληψιών νέας τεχνολογίας με ηλεκτρονικές κάρτες. Έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί στα δίκτυα της Foggia στην Ιταλία [8]. Ο κάθε χρήστης ανάλογα με τις καλλιέργειες και την έκταση που αρδεύει πιστώνεται μια ποσότητα που χρεώνεται με το κανονικό τιμολόγιο του οργανισμού διαχείρισης. Για κάθε περεταίρω κατανάλωση η χρέωση γίνεται με προοδευτικά αυξανόμενο τιμολόγιο. Η τεχνολογία αυτή έχει οδηγήσει σε 20% μείωση της κατανάλωσης σε σχέση με τις συμβατικές υδροληψίες. Η χρήση των νέων αυτών υδροληψιών μπορεί να συνδυαστεί με τιμολόγηση που θα λαμβάνει υπόψη το οικονομικό, το περιβαλλοντικό κόστος και κόστος φυσικών πόρων, σύμφωνα με την Οδηγία 2000/60.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η Οδηγία 2000/60 έχει έντονη την περιβαλλοντική διάσταση. Εισάγει το περιβαλλοντικό κόστος και το κόστος φυσικών πόρων και την ολοκληρωμένη διαχείριση σε επίπεδο υδρολογικής λεκάνης. Προκειμένου να υπάρξει αποτελεσματικότητα στην νέα οργανωτική δομή θα πρέπει, συμπληρωματικά με την όλη οργάνωση που έχει ήδη αναπτυχθεί, να δημιουργηθούν νέοι ευέλικτοι οργανισμοί που θα έχουν το κατάλληλο προσωπικό, την τεχνογνωσία και το μέγεθος για να φέρουν σε πέρας επιτυχώς, μαζί με τους υπάρχοντες οργανισμούς, το έργο της διαχείρισης των υδατικών πόρων.

Συγχρόνως, είναι απαραίτητο με τα προτεινόμενα γραφεία αρδεύσεων να υπάρξουν ειδικοί επιστήμονες κοντά στους αγρότες που θα τους καθοδηγούν για μια αποτελεσματικότερη χρήση του αρδευτικού νερού. Είναι ένα θέμα σημαντικό και είναι κάτι που λείπει από την ελληνική πραγματικότητα.

Η χρέωση του νερού πρέπει να γίνεται σύμφωνα με τον καταναλισκόμενο όγκο και η χρήση συστημάτων νέας τεχνολογίας όπως οι υδροληψίες με ηλεκτρονικές κάρτες μπορεί να συμβάλει στην ορθολογικότερη κατανάλωση νερού.

Πιστεύουμε ότι με τις βελτιώσεις αυτές θα οδηγηθούμε σε μια καλύτερη διαχείριση των υδατικών πόρων στη χώρα μας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Βελλόπουλος, Δ., 2002. *Ανάλυση λειτουργίας αρδευτικού δικτύου Πηνειού Ηλείας- Προβλήματα και προτάσεις αντιμετώπισης*. Πτυχιακή Μελέτη. Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών. Σελ. 69.
2. C.E.M.A.G.R.E.F., 1983. *Calcul des réseaux ramifiés sous pression*. No 506, Decembre, pp. 120.
3. COM(2000)477, Πολιτική τιμολόγησης για την ενίσχυση της αειφορίας των υδάτινων πόρων.
4. Γκούμας, Κ., 1996. Η Διαχείριση των Υδατικών Πόρων στη Θεσσαλία και η Λειτουργία του Νομοθετικού Πλαισίου (Νόμος 1739/87). *Πρακτικά 2^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου ΓΕΩ.Ε.Ε., Εγχειοβελτιωτικά Έργα, Διαχείριση Υδατικών Πόρων, Εκμνησίωση της Γεωργίας*. Λάρισα, 24-27 Απριλίου 1996, σελ. 104-131.
5. Δέρκας, Ν., 2003. Αειφορία των αρδεύσεων. Το Νερό στον 21^ο Αιώνα: Προβλήματα και Προοπτικές. *Πρακτικά Συνεδρίου ΓΕΩΤΕΕ*. Κρήτη, 21-23 Μαρτίου 2003.
6. ΕΣΥΕ., 2001. *Γεωργική Στατιστική της Ελλάδας Έτους 2001*.
7. Karamanos, A., Aggelides, S., and Londra, P., 2004. Irrigation systems performance in Greece. *2nd Workshop on Water Saving in Mediterranean Agriculture*. Hammamet, Tunisia, 25-28 June 2004.
8. Le grandi opere idriche del Consorzio per la Bonifica della Capitanata, Foggia, 2004. pp. 63.
9. Νόμος 3199/2003, Προστασία και Διαχείριση των Υδάτων – Εναρμόνιση με την Οδηγία 2000/60/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου.
10. Οδηγία 2000/60/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 23-10-2000 για τη θέσπιση πλαισίου κοινοτικής δράσης στον τομέα της πολιτικής των υδάτων.
11. Οργανισμός Ανάπτυξης Δυτικής Κρήτης (ΟΑΔΥΚ), 2001. *Έργα Ανάπτυξης Υδατικών Πόρων*. Χανιά Κρήτης.
12. Πανταζής, Χ., 2000. *Διερεύνηση και επίλυση προβλημάτων αρδευτικού δικτύου Κωπαδικού πεδίου*. Πτυχιακή Μελέτη. Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών. Σελ. 84.
13. Tsagarakis, K.P., Tsoumanis, P., Chartzoulakis, K. And Angelakis, A.N., 2001. "Water Resources Status Including Wastewater Treatment and Reuse in Greece Related Problems and Prospectives". IWRA, *Water International*, Volume 26, No 2, pp. 252-258, June 2001.
14. Tsanis, K., P.A. Londra and A.N. Angelakis, 1996. Assesment of Water Needs for Irrigation in the Island of Crete. *2nd International Symposium on Irrigation of Horticulture Crops*, 8-13 September, 1996, pp.41-48.
15. Υπουργείο Ανάπτυξης, 2003. *Σχέδιο Προγράμματος Διαχείρισης των Υδατικών Πόρων της Χώρας*.
16. Υπουργείο Γεωργίας, 2003. *Το υδατικό δυναμικό της Ελλάδας*. Σελ. 31.
17. Υπουργείο Γεωργίας, 2000. *Διαχείριση των υδατικών πόρων στον αγροτικό τομέα*. Σελ 43.

(218)

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΛΑΜΠΟΚΙΟΥ ΜΕ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ WAVE

Ι. Αλεξίου⁽¹⁾, Δ. Παπαμιχαήλ^(2α) και Β. Αντωνόπουλος^(2β)

⁽¹⁾ ΕΘΙΑΓΕ, Ινστιτούτο Χαρτογράφησης και Ταξινόμησης Εδαφών Λάρισας,
Θεοφράστου 1, Λάρισα 413 35, alexiou@nagref.gr

⁽²⁾ Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Γεωπονική Σχολή, 54124 Θεσσαλονίκη,
^αpapamich@agro.auth.gr, ^βvasanton@agro.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία γίνεται προσομοίωση του υδατικού ισοζυγίου του εδάφους και της ανάπτυξης της καλλιέργειας με το μονοδιάστατο μοντέλο WAVE, χρησιμοποιώντας για την έκφραση της υδραυλικής αγωγιμότητας δύο διαφορετικές σχέσεις. Οι πειραματικές μετρήσεις προέρχονται από πηλώδη εδάφη στον Παλαμά (Κεντρική Ελλάδα), καλλιεργημένα με καλαμπόκι κατά τις καλλιεργητικές περιόδους 1998 και 1999. Η ποιοτική και η ποσοτική διαδικασία αξιολόγησης έδειξε ότι οι προσομοιώσεις με τη σχέση του van Genuchten περιγράφουν με οριακά μεγαλύτερη ακρίβεια την εδαφική υγρασία απ' ότι η σχέση του Gardner.

EFFECT OF HYDRAULIC CONDUCTIVITY ON CORN CROP SIMULATION WITH THE WAVE MODEL

I. Alexiou¹, D. Papamichail^{2a} and V. Antonopoulos^{2b}

¹NAGREF/Institute for Soil Mapping and Classification, 1, Theophrastos Str, 41335
Λάρισα, alexiou@nagref.gr

²Aristotle University of Thessaloniki, Sch. of Agriculture, 54124 Thessaloniki,
^apapamich@agro.auth.gr, ^bvasanton@agro.auth.gr

ABSTRACT

In the present work the soil water balance and crop growth are simulated using the one-dimensional WAVE-model and two different relationships for the hydraulic conductivity. The field and crop data were collected from a loamy soil (located at Palama area, Central Greece), cultivated with maize, during the 1998 and 1999 growing periods. The qualitative and quantitative procedures showed that the simulations based on the van Genuchten's hydraulic conductivity relationship, describe slightly better the soil water content than the Gardner's one.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο πεδίο της διαχείρισης των φυσικών πόρων και ιδιαίτερα των υδατικών έχει καθιερωθεί τις τελευταίες δεκαετίες η πρακτική εφαρμογή των μαθηματικών μοντέλων. Τα μαθηματικά μοντέλα χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο στο σχεδιασμό και στη διαχείριση της εκμετάλλευσης των φυσικών πόρων, όπως επίσης και στην πρόβλεψη και την αποτίμηση των επιπτώσεων της ανθρώπινης δραστηριότητας στο περιβάλλον.

Σ' όλα τα μοντέλα προσομοίωσης του υδατικού ισοζυγίου οι υδραυλικές ιδιότητες του εδάφους εκφράζονται με τη συνάρτηση της χαρακτηριστικής καμπύλης (ΧΚ) και της υδραυλικής αγωγιμότητας (ΥΑ). Για τη χαρακτηριστική καμπύλη έχουν προταθεί διάφορες εμπειρικές σχέσεις [1, 2, 3], όπως και για την υδραυλική αγωγιμότητα [1, 3, 4]. Η πλέον χρησιμοποιούμενη σχέση για την ΧΚ είναι η σχέση του van Genuchten [1] και για την ΥΑ οι σχέσεις του van Genuchten [1] και του Gardner [4]. Η σχέση ΥΑ του van Genuchten χρησιμοποιεί τις παραμέτρους της χαρακτηριστικής καμπύλης, ενώ οι παράμετροι της σχέσης του Gardner προσδιορίζονται με πεδοσυναρτήσεις [5], από εύκολα μετρήσιμα χαρακτηριστικά του εδάφους όπως είναι η μηχανική σύσταση.

Οι δύο αυτές σχέσεις χρησιμοποιούνται στο μοντέλο WAVE [6] και γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων του μοντέλου, προκειμένου να διαπιστωθεί η καταλληλότητάς τους για παρόμοιες εφαρμογές. Το μοντέλο WAVE έχει χρησιμοποιηθεί σε πολλές εφαρμογές, από τις οποίες λίγες αναφέρονται σε μεσογειακές συνθήκες [7].

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1 Περιγραφή του μοντέλου

Το μοντέλο WAVE (Water and Agrochemicals in soil, crop and Vadose Environment) [6], που αναπτύχθηκε από το πανεπιστήμιο του Leuven, είναι ένα αριθμητικό, μονοδιάστατο, ντετερμινιστικό μοντέλο. Η κίνηση του νερού περιγράφεται με την εξίσωση Richards, η λύση της οποίας γίνεται με την αριθμητική μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών σε συνδυασμό με το επαναληπτικό σχήμα των Newton-Raphson, η χαρακτηριστική καμπύλη περιγράφεται με το παραμετρικό μοντέλο του van Genuchten [1] (Εξ.1) και η υδραυλική αγωγιμότητα μπορεί να περιγραφεί με τη σχέση των Mualem-van Genuchten [1] (Εξ. 2) ή τη σχέση του Gardner [4] (Εξ. 3).

$$\theta(h) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) / [1 + (a|h|)^n]^m \quad (1)$$

$$K(h) = K_s \{1 - (a \cdot h)^{n-1} [1 + (ah)^n]^{-m}\}^2 / [1 + (ah)^n]^{m/2} \quad (2)$$

$$K(h) = K_s / (1 + (b \cdot h)^N) \quad (3)$$

όπου θ η υγρασία του εδάφους ($L^3 L^{-3}$), θ_r η υπολειμματική υγρασία ($L^3 L^{-3}$), θ_s η υγρασία του εδάφους στον κορεσμό ($L^3 L^{-3}$), h το ύψος πίεσης (L), a , n και m παράμετροι που εξαρτώνται από τις εδαφικές ιδιότητες, K η υδραυλική αγωγιμότητα, K_s είναι η υδραυλική αγωγιμότητα στον κορεσμό, b και N είναι εμπειρικές παράμετροι που προσδιορίζονται από εύκολα μετρήσιμα χαρακτηριστικά του εδάφους με τις παρακάτω πεδοσυναρτήσεις [5].

$$\ln(b) = -2,64 - 0,0019(Sa) + 0,05(Cl) + 0,506 \ln(K_s) \quad (4)$$

$$\ln(N) = -2,64 - 0,019 \ln(Cl) - 0,0489 \ln(Si) \quad (5)$$

όπου Sa , Cl και Si είναι τα ποσοστά % της άμμου της αργίλου και της ιλύος αντίστοιχα. Το μοντέλο υπολογίζει το ρυθμό ανάπτυξης της καλλιέργειας, τη συσσώρευση της ξηρής φυτικής μάζας στα διάφορα όργανα του φυτού και το δείκτη φυλλικής επιφάνειας ως συνάρτηση κλιματικών παραμέτρων (ακτινοβολία και θερμοκρασία) και

φαινολογικών παραμέτρων του φυτού. Χρησιμοποιεί χρονικό βήμα μικρότερο της μιας ημέρας για να υπολογίσει τις μεταβλητές που σχετίζονται με έντονα δυναμικές διαδικασίες (κίνηση νερού). Ενώ χρησιμοποιεί σταθερό χρονικό βήμα μιας ημέρας για λιγότερο δυναμικές διαδικασίες, όπως η ανάπτυξη της καλλιέργειας.

2. 2 Πειραματικά δεδομένα και μετρήσεις

Τα πειραματικά δεδομένα προέρχονται από πειραματικούς αγρούς του Σταθμού Γεωργικής Έρευνας Παλαμά Καρδίτσας, καλλιεργημένους με καλαμπόκι κατά τις καλλιεργητικές περιόδους 1998 και 1999. Η διεξαγωγή των πειραμάτων είχε γίνει στα πλαίσια του χρηματοδοτούμενου από το Β' Κ.Π.Σ., ερευνητικού έργου «Υπολογισμός αναγκών σε νερό άρδευσης ορισμένων καλλιεργειών». Η έκταση των πειραματικών αγρών ήταν 6 στρέμματα με διαστάσεις 100x60 μέτρα. Τα υβρίδια καλαμποκιού που καλλιεργήθηκαν ήταν κατά το 1998 το υβρίδιο ΔΙΑΣ και κατά το έτος 1999 το υβρίδιο ΑΡΗΣ. Η καλλιέργεια του καλαμποκιού γίνονταν σε γραμμές με απόσταση μεταξύ τους 75 cm και πυκνότητα φυτών 65000 ανά στρέμμα. Το 1998 η σπορά έγινε στις 15 Απριλίου και το 1999 στις 27 Απριλίου. Η περίοδος προσομοίωσης είναι από τις 15 Απριλίου μέχρι 12 Σεπτεμβρίου το 1998 και από τις 27 Απριλίου μέχρι 24 Σεπτεμβρίου το 1999.

Σε δύο θέσεις κάθε πειραματικού αγρού, Α και Β, που δέχονταν διαφορετική δόση άρδευσης από αυτοκινούμενο εκτοξευτήρα ασύμμετρης γωνίας λειτουργίας [8] γίνονταν μετρήσεις του αρδευτικού νερού με βροχόμετρα, της εδαφικής υγρασίας με τη συσκευή TRIME-FM, του δείκτη φυλλικής επιφάνειας με τη συσκευή SunScan, και της παραγωγής. Το 1998 εφαρμόστηκαν με άρδευση σε έξι δόσεις στη θέση Α 270 mm και στη θέση Β 160 mm, ενώ το 1999 εφαρμόστηκαν 280 mm και 166 mm αντίστοιχα και πάλι σε έξι δόσεις. Η βροχόπτωση κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου του 1998 ήταν 154 mm και του 1999 ήταν 148 mm.

Οι φυσικοχημικές ιδιότητες των εδαφών φαίνονται στον Πίνακα 1. Οι παράμετροι του μοντέλου χαρακτηριστικής καμπύλης του van Genuchten (Πίνακας 2) προσδιορίστηκαν από αδιατάρακτα εδαφικά δείγματα σε τρία βάθη 25, 60 και 110 cm με τη συσκευή πιέσεως της Soil moisture equipment και το πρόγραμμα RETC [9]. Στον Πίνακα 2 δίνονται επίσης οι υπολογισμένες με τις εξισώσεις (4) και (5) τιμές των παραμέτρων b και N της σχέσης του Gardner, καθώς και οι μετρήσεις υδραυλικής αγωγιμότητας στον κορεσμό (K_s), που έγιναν σε διάφορα βάθη με το περατόμετρο Guelph.

Πίνακας 1. Τιμές εδαφικών ιδιοτήτων στα εδάφη πειραματισμού το 1998 και το 1999.

Βάθος cm	Άμμος %	Ιλύς %	Άργιλος %	Χαρακτη- ρισμός	CaCO ₃ %	Οργ. Ουσ. %	p _b gr/cm ³
Έδαφος πειραματικού 1998							
0-30	37	45	18	L	1,89	1,34	1,45
30-95	29	55	16	SiL	4,2	1,5	1,55
95-140	23	47	30	CL	4,2	1,15	1,43
Έδαφος πειραματικού 1999							
0-48	47	35	18	L	2,1	1,1	1,51
48-75	69	22	9	SL	4,4	0,4	1,55
75-140	23	44	33	CL	5,7	1,07	1,43

Η εξαμυσοδιαπνοής της καλλιέργειας αναφοράς υπολογίστηκε με τη μέθοδο Penman-Monteith [10, 11, 12] από τις τιμές των κλιματολογικών παραμέτρων που

καταγράφονταν από παρακείμενο μετεωρολογικό σταθμό δικαιοδοσίας του ΥΑΑΤ. Η δυναμική εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας υπολογίστηκε από την εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας αναφοράς και τους φυτικούς συντελεστές κατά στάδιο της καλλιέργειας όπως προτείνονται για τις Ελληνικές συνθήκες [10, 13].

Πίνακας 2. Τιμές των παραμέτρων της εξίσωσης XK του van Genuchten και της εξίσωσης YA του Gardner

	Παράμετροι εξίσωσης van Genuchten για $m=1-1/n$			Πειραματικός 1999		
	Πειραματικός 1998			Πειραματικός 1999		
Βάθος (cm)	20	60	110	25	60	110
θ_r ($\text{cm}^{-3} \text{cm}^{-3}$)	0,09467	0,08799	0	0	0,0927	0
θ_s ($\text{cm}^{-3} \text{cm}^{-3}$)	0,39726	0,41894	0,42926	0,39877	0,40042	0,44635
a (cm^{-1})	0,00802	0,01576	0,01435	0,00789	0,01455	0,01388
n (-)	1,40363	1,37440	1,14661	1,23315	1,70465	1,13382
$m=1-1/n$ (-)	0,28756	0,27241	0,12786	0,18907	0,41337	0,11803
b	0,668	0,707	1,783	0,567	1,270	2,122
N	1,551	1,572	1,402	1,571	1,838	1,381
K_s (cm day^{-1})	78,36	71,25	14,36	83,5	76,25	4,50

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Τα πειραματικά δεδομένα που συλλέχθηκαν, χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση της καλλιέργειας του καλαμποκιού με το μοντέλο WAVE. Έγιναν συνολικά τέσσερις προσομοιώσεις για κάθε σχέση YA, που αναφέρονται ως περιπτώσεις 1998-A, 1998-B, 1999-A και 1999-B. Τα γράμματα A και B χαρακτηρίζουν τις θέσεις με διαφορετική δόση άρδευσης στο ίδιο καλλιεργητικό έτος.

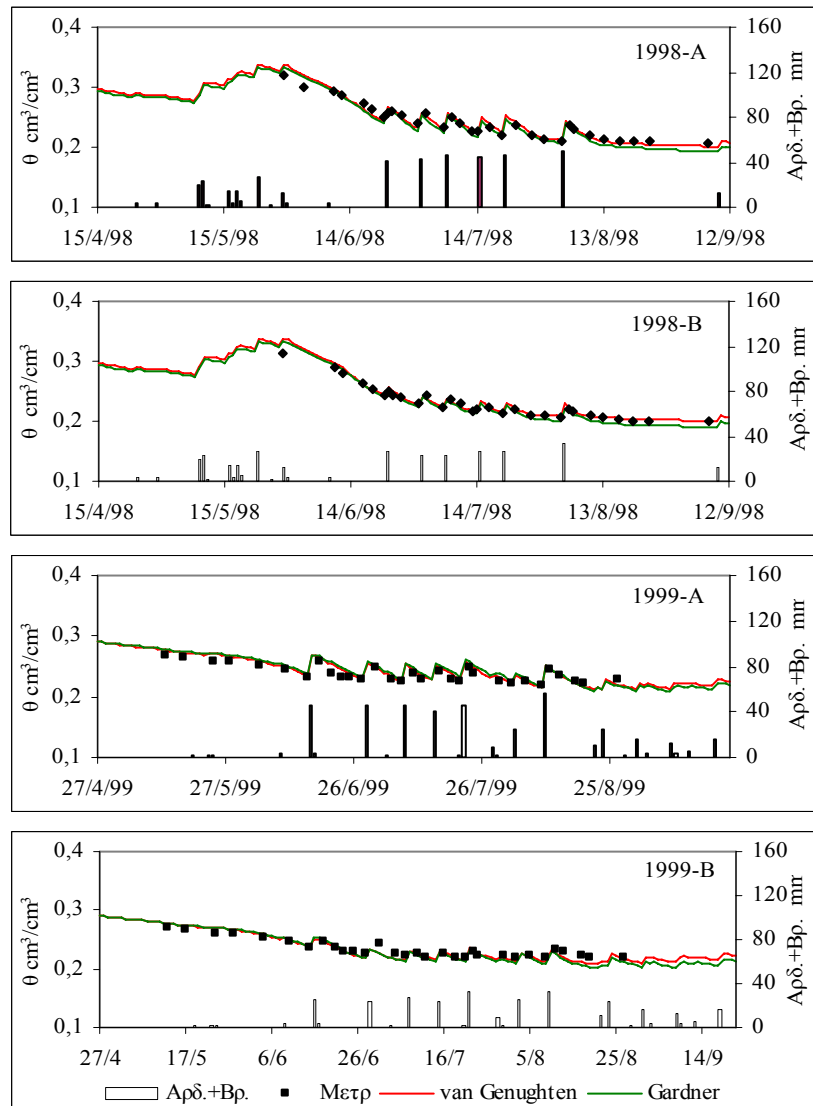
Στα διαγράμματα του Σχήματος 1 φαίνονται οι μετρημένες και οι υπολογισμένες με το μοντέλο WAVE τιμές της εδαφικής υγρασίας μέχρι το βάθος των 140 cm. Όπως δείχνουν τα διαγράμματα του Σχήματος 1, οι υπολογισμένες τιμές εδαφικής υγρασίας ακολουθούν τις διακυμάνσεις στο χρόνο της μετρημένης εδαφικής υγρασίας με ικανοποιητική ακρίβεια, η οποία είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση της σχέσης του van Genuchten. Η ίδια διαπίστωση προκύπτει κι από τα στατιστικά κριτήρια [14, 15, 16], του Πίνακα 3, των οποίων η επιθυμητή τιμή είναι η τιμή μηδέν. Οι τιμές του μέσου σφάλματος (E), του μέσου αηγημένου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE) και του συντελεστή υπολειμματικής μάζας (CRM), σ' όλες τις περιπτώσεις είναι μικρότερες για τη σχέση YA του van Genuchten σε σύγκριση με τη σχέση του Gardner.

Πίνακας 3. Τιμές στατιστικών κριτηρίων των προσομοιώσεων της εδαφικής υγρασίας

Περίπτωση	van Genuchten			Gardner		
	E ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	RMSE (%)	CRM (-)	E ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	RMSE (%)	CRM (-)
1998-A	-0,0004	2,73	-0,002	0,0070	4,54	0,028
1998-B	-0,0017	2,23	-0,007	0,0068	4,31	0,029
1999-A	-0,0040	2,91	-0,017	0,0070	3,89	-0,028
1999-B	0,0018	2,68	0,008	0,0030	3,38	0,014

Στον Πίνακα 4 δίνονται οι υπολογισμένες τιμές της αθροιστικής πραγματικής εξατμισοδιαπνοής (ET_a), της διαπνοής (T_a) και της εξάτμισης (E_a) όταν χρησιμοποιήθηκαν οι σχέσεις YA του van Genuchten και του Gardner στο WAVE. Οι

τιμές των παραπάνω μεταβλητών αναφέρονται στο χρονικό διάστημα κατά το οποίο πραγματοποιούνταν μετρήσεις εδαφικής υγρασίας.



Σχήμα 1. Μεταβολή στο χρόνο της μετρημένης και της υπολογισμένης υγρασίας του εδάφους για τις τέσσερις περιπτώσεις προσομοίωσης.

Οι μετρημένες τιμές της αθροιστικής ET_a που δίνονται στον Πίνακα 4, αφορούν τις εκτιμήσεις της πραγματικής αθροιστικής εξατμισοδιαπνοής, με την εξίσωση του υδατικού ισοζυγίου του εδάφους [10]. Οι υπολογισμένες τιμές της αθροιστικής πραγματικής εξατμισοδιαπνοής για τις δύο σχέσεις ΥΑ δεν παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές όταν συγκρίνονται με τις αντίστοιχες μετρημένες τιμές (Πίνακας 4). Οι αποκλίσεις ανάμεσα στις υπολογισμένες τιμές της ET_a με τη σχέση του van Genuchten και στις μετρημένες τιμές είναι 1,7%, -3,8%, -0,6% και 2,5% για τις τέσσερις περιπτώσεις προσομοίωσης, ενώ για τη σχέση του Gardner οι αντίστοιχες αποκλίσεις

είναι -2,5%, -8,7%, -1,9% και -0,5%.

Πίνακας 4. Μετρημένες και υπολογισμένες τιμές αθροιστικής πραγματικής εξατμισοδιαπνοής (ET_a), διαπνοής (T_a) και εξάτμισης (E_a)

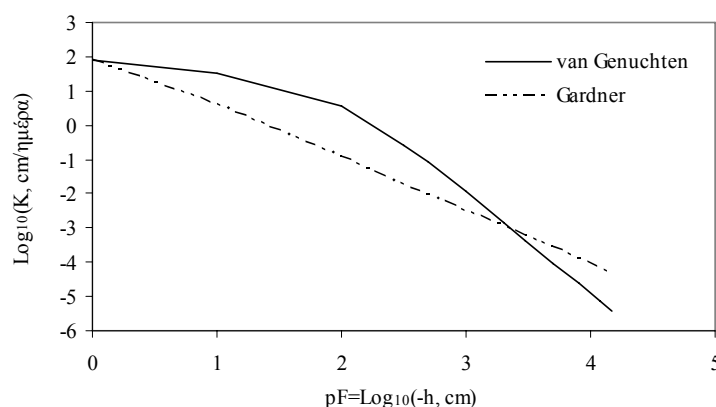
Περίπτωση (χρονικό διάστημα)	Σχέση YA	Υπολογισμένες τιμές				Μετρημένες
		ET_a (mm)	T_a (mm)	E_a (mm)	E_a/ET_a	ET_a (mm)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
1998-A	van Genuchten	442,9	419,6	23,3	0,05	450,6
(29-5/24-8)	Gardner	462,0	430,1	31,9	0,07	
1998-B	van Genuchten	335,1	312,7	22,4	0,07	322,8
(29-5/24-8)	Gardner	350,9	319,9	31,0	0,09	
1999-A	van Genuchten	424,9	365,8	54,1	0,13	422,2
(10-6/7-9)	Gardner	430,2	366,6	63,6	0,15	
1999-B	van Genuchten	314,3	254,0	60,3	0,19	322,4
(10-6/7-9)	Gardner	324,1	259,0	65,1	0,20	

Στον Πίνακα 5 δίνονται οι υπολογισμένες και οι μετρημένες τιμές της ξηρής φυτικής μάζας και της παραγωγής σε σπόρο της καλλιέργειας του καλαμποκιού κατά τα δύο έτη πειραματισμού (1998 και 1999). Όπως προκύπτει από τον Πίνακα 5 οι προσομοιώσεις με το μοντέλο WAVE και με τις δύο σχέσεις YA υποεκτιμούν τις τιμές της ξηρής φυτικής μάζας (ΞΦΜ) και της παραγωγής σε σπόρο. Η υποεκτίμηση της ΞΦΜ είναι μεγαλύτερη για τη σχέση YA του van Genuchten, 14,2%, 17,9%, 8,8% και 7,1% για τις τέσσερις περιπτώσεις, ενώ για τη σχέση του Gardner τα αντίστοιχα ποσοστά είναι 12,3%, 15,3%, 7,3% και 5,7%. Αυτό οφείλεται στις μεγαλύτερες τιμές πραγματικές διαπνοής που εξασφαλίζει η σχέση YA του Gardner (Πίνακας 4).

Πίνακας 5. Μετρημένες και υπολογισμένες τιμές ξηρής φυτικής μάζας και παραγωγής.

	Ξηρή φυτική μάζα (kg/στρμ.)			Παραγωγή (kg/στρμ.)		
	van Genuchten	Gardner	Πειραματ.	van Genuchten	Gardner	Πειραματ.
1998-A	2022	2067	2358	710	727	915
1998-B	1490	1537	1815	400	403	698
1999-A	2350	2391	2578	928	975	1136
1999-B	1691	1718	1821	620	618	807

Από την ανάλυση που προηγήθηκε προέκυψε ότι υπάρχουν μικρές διαφορές μεταξύ των προσομοιώσεων με τις δύο σχέσεις YA, όπως η υποεκτίμηση της υγρασίας του εδάφους από τη σχέση του Gardner, την περίοδο μετά το τέλος των αρδεύσεων (Σχήμα 1.), η εκτίμηση μεγαλύτερων τιμών πραγματικής εξατμισοδιαπνοής από τη σχέση του Gardner (Πίνακας 4), που έχει σαν αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη εκτιμώμενη παραγωγή (Πίνακας 5) και η μεγαλύτερη συμμετοχή της πραγματικής εξάτμισης στην πραγματική εξατμισοδιαπνοή στην περίπτωση της σχέσης του Gardner. Μία πιθανή εξήγηση για τα παραπάνω είναι η διαφορετική μεταβολή της υδραυλικής αγωγιμότητας με την υγρασιακή κατάσταση του εδάφους που δίνουν οι σχέσεις. Οι καμπύλες των δύο σχέσεων σε λογαριθμική κλίμακα (log-log) για το έδαφος του πειραματικού του 1998 (βάθος 0-30 cm) φαίνονται στο διάγραμμα του Σχήματος 2.



Σχήμα 2. Γραφική παράσταση των σχέσεων υδραυλικής αγωγιμότητας, $K(h)$, του van Genuchten και του Gardner.

Η σχέση του Gardner δίνει μικρότερες τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας από τη σχέση του van Genuchten για τιμές του ύψους πίεσης, h , από 0 μέχρι -2000 cm ($pF=3,3$). Σε μικρότερες τιμές του ύψους πίεσης ($h < -2000$ cm) η κατάσταση αντιστρέφεται και οι τιμές της σχέσης του Gardner γίνονται μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες της σχέσης του van Genuchten. Με το τέλος των αρδεύσεων όταν το έδαφος στην επιφάνεια αρχίζει να ξηραίνεται, οι προσομοιώσεις με τη σχέση ΥΑ του Gardner, λόγω μεγαλύτερης τιμής της ΥΑ, επιτρέπουν μεγαλύτερη εξάτμιση, όπως επίσης και μεγαλύτερη διαπνοή λόγω κίνησης του νερού προς το ριζόστρωμα της καλλιέργειας.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων με δύο διαφορετικές συναρτήσεις υδραυλικής αγωγιμότητας προέκυψε ότι, και οι δύο σχέσεις περιγράφουν με ικανοποιητική ακρίβεια τη χρονική μεταβολή της υγρασίας του εδάφους. Η μεγαλύτερη ακρίβεια της σχέσης του van Genuchten στην προσομοίωση της εδαφικής υγρασίας που παρατηρήθηκε, είναι οριακή και δεν αποτελεί συγκριτικό πλεονέκτημά έναντι της σχέσης του Gardner. Όσον αφορά την εκτίμηση της αθροιστικής πραγματικής εξατμισοδιαπνοής, που είναι ένα σημαντικό ζητούμενο στην προσομοίωση του υδατικού ισοζυγίου του εδάφους και την παραγωγή της καλλιέργειας, επίσης δεν προκύπτει σημαντική διαφορά μεταξύ των δύο σχέσεων υδραυλικής αγωγιμότητας.

Παρά την μικρή υπεροχή της σχέσης του van Genuchten σε όλες τις περιπτώσεις προσομοίωσης της καλλιέργειας του καλαμποκιού, δεν μπορεί να παραβλεφθεί η αξία της σχέσης του Gardner. Κι αυτό γιατί οι παράμετροι της σχέσης αυτής προσδιορίζονται από τη μηχανική σύσταση του εδάφους, μια παράμετρο που εύκολα προσδιορίζεται και είναι διαθέσιμη για τα εδάφη πολλών περιοχών της χώρας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. van Genuchten, M.T., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44: 892–898.
2. Brutsaert, W., 1966. Propability laws for pore-size distributions. *Soil Science*, 101: 85-92.

3. Brooks, R. H. and A. T. Corey, 1966. Properties of porous media affecting fluid flow. *Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE*, 92: 61-88.
4. Gardner, W.R., 1958. Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. *Soil Science*, 85: 228-232.
5. Vereecken, H., Maes, J. and Feyen, J., 1990. Estimating unsaturated hydraulic conductivity from easily measured soil properties. *Soil Science*, 149: 1-12.
6. Vanclooster, M., Viaene, P., Christiaens, K. and Dusheyne, S., 1996. *WAVE: A mathematical model for simulating water and agrochemicals in the soil and Vadose environment-reference and user's manual (release 2.1)*, Institute for Land and Water Management, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium.
7. Alexiou, I. G., Papamichail, D.M. and Antonopoulos, V. Z., 2002. Simulation of soil water balance and irrigation efficiency of maize crop. *Proc. 5th Int. Conf. of EWRA Water resources management in the era of transition*, (ed. G. Tsakiris), Athens, Greece, 4-8 September, 2002.
8. Αλεξίου, Ι. Γ., 2005. *Ανάλυση και προσομοίωση του συστήματος νερού εδάφους ατμόσφαιρας σε σχέση με την ανάπτυξη και την απόδοση ετήσιων καλλιεργειών*, Διδακτορική Διατριβή, Α.Π.Θ.
9. van Genuchten, M. Th., Leij, F. J. and Yates, S.,R.,M., 1991. *The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils*. USDA, Agric. Research Service, Riverside, California.
10. 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.
11. Kotsopoulos, S., Kalfountzos, D., Alexiou, I., Zerva, G., Karamaligas, C. and Vyrilas, P., 2002. Actual evapotranspiration and soil moisture studies in irrigated cotton fields. *Proc. 5th Int. Conf. of EWRA Water resources management in the era of transition*, (ed. G. Tsakiris), Athens, Greece, 4-8 September 2002.
12. Παπαμιχαήλ, Δ. Μ. και Γεωργίου, Π. Ε., 1999. Συγκριτική ανάλυση των ωριαίων και ημερήσιων εκτιμήσεων της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς με τη μέθοδο FAO Penman-Monteith. *Πρακ. 4^{ου} Εθνικού Συν. ΕΕΔΥΠ, Διαχείριση υδατικών πόρων στις ευαίσθητες περιοχές του Ελλαδικού χώρου*, Βόλος, 1999.
13. Παπαζαφειρίου, Ζ., 1999. *Οι ανάγκες σε νερό των καλλιεργειών*, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, σελ 347.
14. Clemente, R.C., De Jong, R., Hayhoe, H. N., Reynolds, W. D. and Hares, M., 1994. Testing and comparison of three unsaturated soil water models. *Agricultural Water Management*, 25: 135-152.
15. Antonopoulos, V., 1997. Simulation of soil moisture dynamics on irrigated cotton in semi-arid climates. *Agricultural Water Management*, 34: 233-246.
16. Babajimopoulos, C., Budina, A. and Kalfountzos, D., 1995. A model for the estimation of the water balance of a cropped soil. *Environmental Software*, 10: 211-220.

(235)

PLEIADES –ΒΟΗΘΗΤΙΚΑ ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΓΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΝΕΡΟΥ ΣΤΗ ΓΕΩΡΓΙΑ ΚΑΙ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΑΠΟΦΑΣΗΣ

A. Μπλάντα^{1α}, Χ. Δομενικιώτης^{1β} και Ν. Δαλέζιος^{1γ}

¹ Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Σχολή Γεωπονικών Επιστ., Τμ. Γεωπονίας Ιχθυολογίας και Υδάτινου Περιβάλλοντος, Οδός Φυτόκου, 38446, Ν. Ιωνία Μαγνησίας,
^αamplanta@uth.gr, ^βcdomen@uth.gr, ^γdalezios@apae.uth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το νερό που χρησιμοποιείται για την παραγωγή τροφής αντιπροσωπεύει το μεγαλύτερο ποσοστό, σε σχέση με άλλες χρήσεις, ενώ οι απαιτήσεις αυξάνονται συνεχώς με την αύξηση του πληθυσμού. Το PLEIADeS (Participatory multi-Level EO-assisted tools for Irrigation water management and Agricultural Decision –Support) στοχεύει στην αποτελεσματική και αειφόρο χρήση του νερού για την παραγωγή τροφής σε περιβάλλοντα με έλλειμμα νερού με τη χρήση δορυφορικών δεδομένων και GIS.

PLEIADES-EO-ASSISTED TOOLS FOR WATER MANAGEMENT IN AGRICULTURE AND AGRICULTURAL DECISION SUPPORT

A. Mplanta^{1α}, C. Domenikiotis^{1β} and N. Dalezios^{1γ}

¹ University of Thessaly, Sch. of Agricultural Sc., Dept. of Agriculture Ichthyology and Aquatic Environment, Fytokou Str, 38446, N. Ionia Magnesias,
^αamplanta@uth.gr, ^βcdomen@uth.gr, ^γdalezios@apae.uth.gr

ABSTRACT

Water for food production represents by far the largest share among all uses and its demand keeps growing with increasing population. PLEIADeS (Participatory multi-Level EO-assisted tools for Irrigation water management and Agricultural Decision –Support) addresses the efficient and sustainable use of water for food production in water – scarce environments with the use of satellite data and GIS.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το έδαφος και το νερό είναι οι δύο κρίσιμοι πόροι για τη γεωργική παραγωγή και έτσι υπάρχει μια επείγουσα και τρέχουσα ανάγκη να επινοηθούν τρόποι διαχείρισης του εδάφους και των υδάτινων πόρων κατά τρόπο πιο βιώσιμο [1]. Παγκοσμίως, το νερό που διανέμεται για την άρδευση ανέρχεται σε 80% περίπου των συνολικών παροχών νερού [2]. Οι συνέπειες της άρδευσης στο υδατικό ισοζύγιο, στη βλάστηση και στον υδροφόρο ορίζοντα είναι σημαντικές για το περιβάλλον.

Το νερό που χρησιμοποιείται για την άρδευση των καλλιεργειών αποτελεί ένα ουσιαστικό μέσο για την ενίσχυση των αποδόσεων της γεωργικής παραγωγής. Κατά τη διάρκεια του περασμένου αιώνα οι αυξημένες ανάγκες για παραγωγή τροφίμων είχε σαν αποτέλεσμα την επέκταση των καλλιεργούμενων εκτάσεων και κατ' επέκταση των αρδευόμενων περιοχών. Εκτιμάται ότι αν και μόνο το 20% της παγκόσμιας αγροτικής γης αρδεύεται προς το παρόν, αυτό αντιστοιχεί στο 40% της παγκόσμιας αγροτικής παραγωγής. Η άρδευση παρέχει τη βάση για ένα βελτιωμένο σύστημα καλλιεργειών και την αύξηση της παραγωγής των καλλιεργούμενων φυτών με υψηλή θρεπτική αξία και γι' αυτό προωθούνται οι βελτιώσεις των συστημάτων άρδευσης των καλλιεργειών [3].

Το PLEIADeS στοχεύει στην αποδοτική και αειφόρο χρήση του νερού για την παραγωγή τροφής σε περιβάλλοντα με έλλειμμα νερού. Στοχεύει στη βελτίωση και βελτιστοποίηση των συστημάτων άρδευσης μέσω νέων τεχνολογιών (Τηλεπισκόπηση, GIS, Συστήματα Λήψης Αποφάσεων και Τεχνολογίες Πληροφοριών και Επικοινωνιών). Το έργο καλύπτει κλίμακες από μεμονωμένα αγροκτήματα ως ολόκληρες λεκάνες απορροής.

Στην παρούσα εργασία περιγράφεται η διαδικασία που θα χρησιμοποιηθεί για την εξαγωγή αποτελεσμάτων από δεδομένα πεδίου που θα αποτελέσουν τη βάση για τη σύνδεση τους με δορυφορικά δεδομένα χρησιμοποιώντας τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών που θα αναπτυχθούν στο πλαίσιο του έργου. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε βασίζεται στη μεθοδολογία του Προγράμματος DEMETER για τη βλαστική περίοδο 2005 [4], [5], [6], [7], [8].

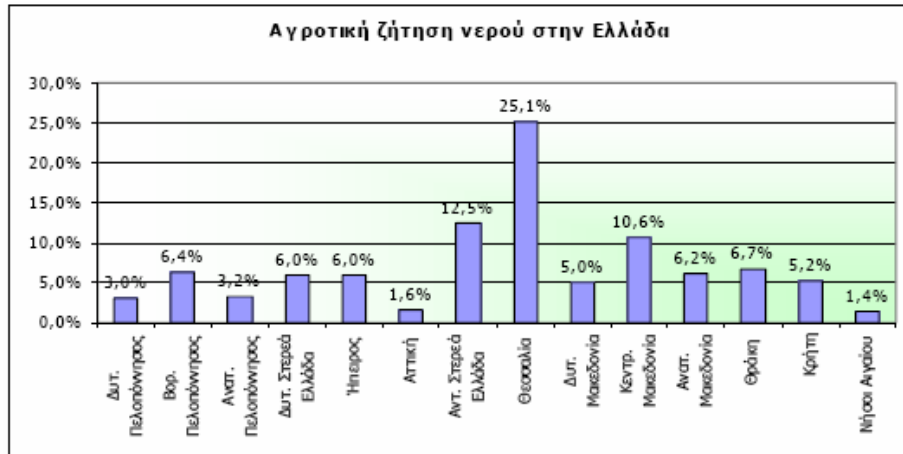
2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Στην Ελλάδα το 82% της χρήσης του νερού χρησιμοποιείται για γεωργικούς σκοπούς και περίπου το 35% των καλλιεργούμενων περιοχών αρδεύεται (εικόνα 1). Όμως η διαφορά ανάμεσα στο αρδευόμενο νερό και σε εκείνο που δεσμεύεται τελικά από τις καλλιέργειες για παραγωγή βιομάζας (water use efficiency) είναι συνήθως μεγάλη. Χρήζει διερεύνησης το μέγεθος των απωλειών που προκύπτουν κατά την περίοδο άρδευσης της καλλιέργειας. Οι νέες τεχνολογίες των δορυφορικών δεδομένων και των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (ΓΣΠ) παρέχουν τα εργαλεία για μια πιο ουσιαστική διαχείριση της άρδευσης [9].

Το PLEIADeS σκοπεύει στη συνεισφορά της ορθολογικής διαχείρισης του νερού μέσω της συμμετοχής όλων των χρηστών σε μια διαδικασία εκμάθησης, αυξάνοντας τη διαφάνεια της χρήσης του νερού και οδηγώντας σε ένα αειφόρο μέλλον. Στοχεύει επίσης στην παροχή συστημάτων και υπηρεσιών που θα επιτρέψουν τις βέλτιστες αποφάσεις που θα πρέπει να ληφθούν σε τεχνικό, οικονομικό, περιβαλλοντικό και κοινωνικό επίπεδο.

Ένα σύνολο από πιλοτικές περιοχές μελέτης αντιπροσωπεύουν το ευρύ φάσμα συνθηκών που επικρατούν στη Μεσόγειο. Αυτές οι περιπτώσεις περιλαμβάνουν πολλές περιοχές όπου η μείωση του υπόγειου νερού, λόγω της υπέρ - άντλησης από τους υδροφορείς, ανησυχεί όχι μόνο τους αγρότες αλλά και την κοινωνία εν γένει. Σε άλλες περιοχές το επιφανειακό νερό εκτρέπεται σε αρδευτικά συστήματα, οδηγώντας σε άδηλη

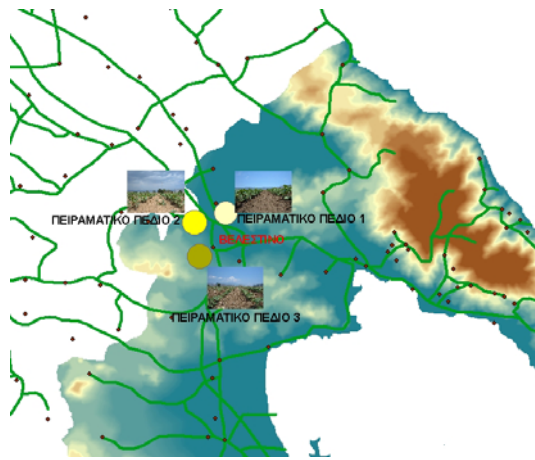
διαμάχη με τους υπόλοιπους χρήστες νερού. Σε όλες τις περιοχές η αύξηση της έλλειψης των υδάτινων πόρων και η επιδείνωση της περιβαλλοντικής κατάστασης απαιτεί τη βέλτιστη χρήση νερού.



Εικόνα 1. Αγροτική ζήτηση νερού στην Ελλάδα [10].

Ένα πείραμα πραγματοποιήθηκε από το Εργαστήριο Αγρομετεωρολογίας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας [11,12]. Για τον πειραματικό σχεδιασμό επιλέχθηκε η περιοχή του Δήμου Φερών Μαγνησίας και πιο συγκεκριμένα τα δημοτικά διαμερίσματα Βελεστίνου, Χλόης και Αγίου Γεωργίου λόγω της εντατικής καλλιέργειας του βαμβακιού στην περιοχή. Για τη συλλογή των δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν τρία αγροτεμάχια, σε κάθε πειραματικό πεδίο δημιουργήθηκαν δυο πειραματικοί σταθμοί για τα δυο πρώτα χωράφια (Άγιος Γεώργιος, Χλόη) και τρεις πειραματικοί σταθμοί στο τρίτο χωράφι (λόγω επανασποράς) (εικόνα 2). Οι παράγοντες που εξετάζονται για την επιλογή των πειραματικών πεδίων περιλαμβάνουν:

- α) Συνεργασία με τους αγρότες
- β) Ποικιλία καλλιέργειας
- γ) Πειραματικά σημεία στο χωράφι
- δ) Δειγματοληπτική περίοδο (μια ή δυο φορές την εβδομάδα)
- ε) Ώρα της ημέρας
- στ) Καθορισμός θέσεων χωραφιών με τη χρήση του GPS eTrex
- ζ) Μετρήσεις στο πεδίο
 - ψηφιακή φωτογραφική μηχανή (2 m από το έδαφος)
 - ύψος συγκομιδής
 - υγρασία εδάφους
- η) Πληροφορίες από τους αγρότες (σπορά, ημερομηνίες άρδευσης, κόστος άρδευσης, παραγωγή)
- η) Διαθεσιμότητα μετεωρολογικών δεδομένων της περιοχής



Εικόνα 2. Θέση των τριών πειραματικών πεδίων στην περιοχή μελέτης.

Για τον υπολογισμό του υδατικού ισοζυγίου ήταν απαραίτητος ο υπολογισμός της εξατμισοδιαπνοής των καλλιεργειών (crop evapotranspiration) ET_c . Η εξίσωση για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής καλλιεργειών δίνεται από τη σχέση:

$$ET_c = K_c \cdot ET_o \quad (1)$$

όπου:

ET_c : εξατμισοδιαπνοή καλλιεργειών

K_c : φυτικός συντελεστής

ET_o : εξατμισοδιαπνοή αναφοράς

Για την επίλυση της εξίσωσης της εξατμισοδιαπνοής καλλιεργειών ήταν απαραίτητοι και οι υπολογισμοί του φυτικού συντελεστή και της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς με τη χρήση των μετεωρολογικών δεδομένων της περιοχής, σε συνδυασμό με τις πειραματικές μετρήσεις. Ο συντελεστής καλλιεργειών, K_c , είναι βασικά η αναλογία της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας ET_c προς την εξατμισοδιαπνοή αναφοράς ET_o .

Η εξίσωση για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς δίνεται από τη σχέση [13]:

$$ET_o = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{37}{T_{hr} + 273} u_2 (e^s(T_{hr}) - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} \quad (2)$$

2.1 Υπολογισμός υδατικού ισοζυγίου

Η εξίσωση για τον υπολογισμό του υδατικού ισοζυγίου δίνεται από:

$$\text{Υδατικό ισοζύγιο} = R - ET_c \quad (3)$$

όπου:

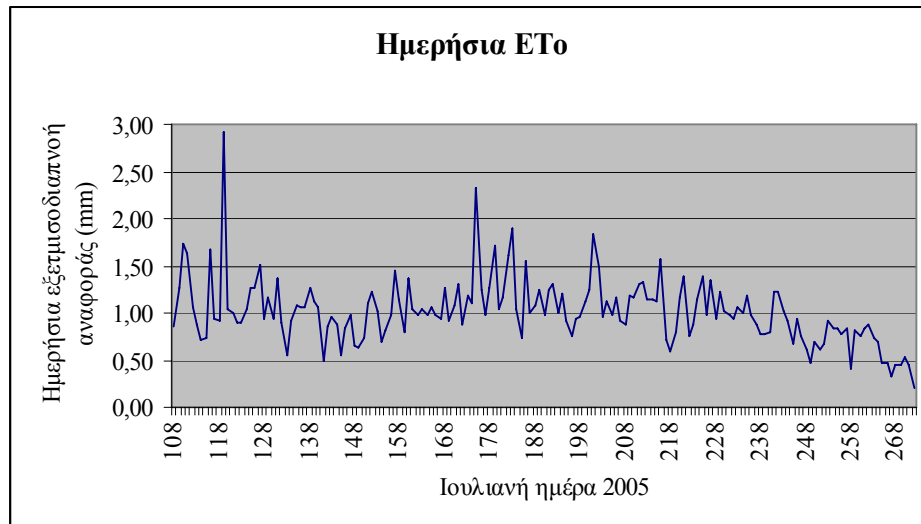
R: διαθέσιμο νερό στη μονάδα του χρόνου (mm)

ET_c : εξατμισοδιαπνοή καλλιεργειών (mm)

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση των μετρήσεων, παρατηρείται ότι τα χαρακτηριστικά του κάθε πειραματικού πεδίου (έδαφος, ποικιλία καλλιέργειας, άρδευση) είναι καθοριστικά για τη διαμόρφωση των αποτελεσμάτων.

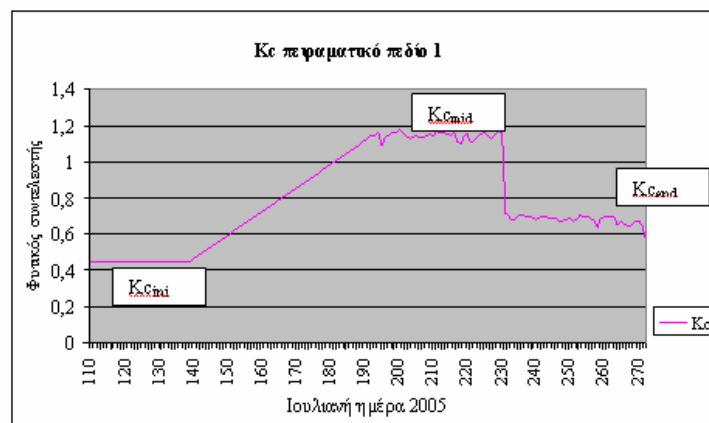
Τα αποτελέσματα για την εξατμισοδιαπνοή αναφοράς ΕΤ₀, προέκυψαν από τα μετεωρολογικά δεδομένα της περιοχής μελέτης και παρουσιάζονται στο σχήμα 1.



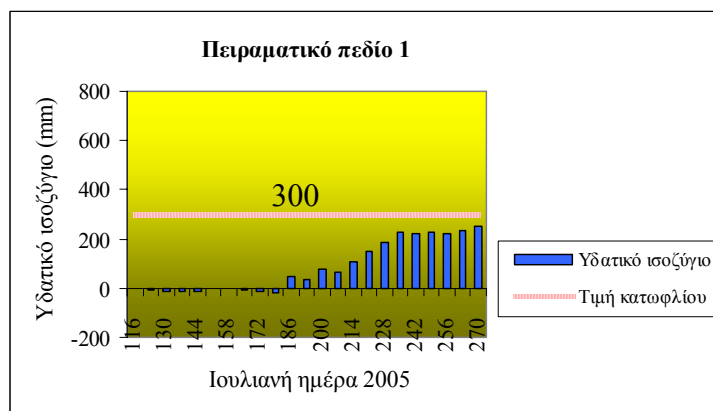
Σχήμα.1. Διάγραμμα ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής ΕΤ₀ της περιοχής μελέτης για το έτος 2005.

Όσον αφορά στον υπολογισμό του φυτικού συντελεστή αρχικά υπολογίστηκαν τα διάφορα στάδια της βλαστικής περιόδου για κάθε πειραματικό πεδίο. Ο φυτικός συντελεστής για το αρχικό στάδιο ($K_{c_{ini}}$) υπολογίστηκε από διάγραμμα, για το στάδιο μέσης περιόδου ($K_{c_{mid}}$) και το στάδιο της τελευταίας περιόδου ($K_{c_{end}}$) υπολογίστηκαν με μια σειρά εξισώσεων από τα μετεωρολογικά δεδομένα της περιοχής [13]. Ο φυτικός συντελεστής για το στάδιο ανάπτυξης υπολογίστηκε με γραμμική παρεμβολή από το φυτικό συντελεστή του αρχικού σταδίου και το φυτικό συντελεστή στην αρχή του σταδίου μέσης περιόδου (σχήμα 2).

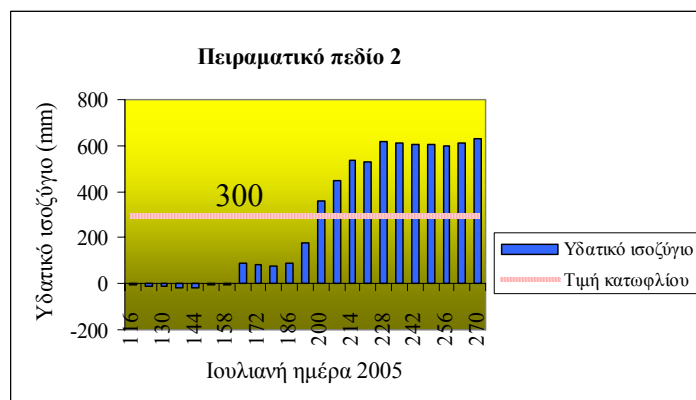
Τα σχήματα 3, 4 και 5 προέκυψαν από τη διαφορά του εβδομαδιαίου αθροίσματος των βροχοπτώσεων και των αρδεύσεων με το εβδομαδιαίο άθροισμα της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας εφαρμόζοντας την εξίσωση 3.



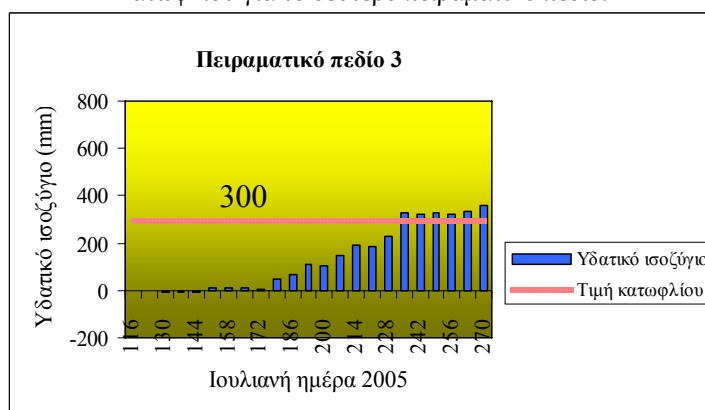
Σχήμα.2. Διάγραμμα ημερήσιου φυτικού συντελεστή K_c στο πρώτο πειραματικό πεδίο.



Σχήμα 3. Διάγραμμα αθροιστικού υδατικού ισοζυγίου σχετιζόμενο με την τιμή κατωφλίου για το πρώτο πειραματικό πεδίο.



Σχήμα 4. Διάγραμμα αθροιστικού υδατικού ισοζυγίου σχετιζόμενο με την τιμή κατωφλίου για το δεύτερο πειραματικό πεδίο.



Σχήμα 5. Διάγραμμα αθροιστικού υδατικού ισοζυγίου σχετιζόμενο με την τιμή κατωφλίου για το τρίτο πειραματικό πεδίο.

Όσον αφορά στα αποτελέσματα από τον υπολογισμό του υδατικού ισοζυγίου που προέκυψαν από τα δεδομένα πεδίου σε συνδυασμό με τα μετεωρολογικά στοιχεία, παρατηρείται πλεόνασμα νερού κατά τη διάρκεια των αρδεύσεων. Μόνο στο πρώτο πειραματικό πεδίο το νερό που χρησιμοποιήθηκε στις αρδεύσεις πλησιάζει την αποδεκτή ποσότητα νερού (300 mm) [14]. Αντίθετα στο δεύτερο πειραματικό πεδίο η ποσότητα του νερού που χρησιμοποιείται για τις αρδεύσεις είναι διπλάσια της απαιτούμενης ποσότητας του νερού, ενώ στο τρίτο πειραματικό πεδίο η ποσότητα του νερού υπερβαίνει της απαιτούμενης ποσότητας.

Ο ακριβέστερος προσδιορισμός της απαραίτητης ποσότητας νερού για την άρδευση των καλλιεργειών αποτελεί ένα από τα αντικείμενα μελέτης του PLEIADeS, το οποίο μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση δορυφορικών εικόνων και GIS.

Κατά τη διάρκεια του πειράματος και από τη συνεργασία με τους αγρότες προέκυψε ότι δεν υπάρχει ένας φορέας να ενημερώνει τους αγρότες σε θέματα διαχείρισης νερού που χρησιμοποιείται για τις αρδεύσεις. Οι αγρότες ακολουθούν συγκεκριμένες μεθόδους διαχείρισης του νερού τόσο ως προς τον αριθμό των αρδεύσεων όσο και ως προς την ποσότητα του νερού που θα χρησιμοποιήσουν. Τα εργαλεία και οι υπηρεσίες που θα αναπτυχθούν στο PLEIADeS θα επιτρέψουν στους αγρότες να συντονίσουν τη διαχείριση της άρδευσης στο αγρόκτημα τους με την ισχύουσα κατάσταση του νερού σε επίπεδο λεκάνης απορροής. Αυτή η ευρεία προοπτική παρέχει ένα ισχυρό πλαίσιο για την επίλυση διαφορών σε περιοχές όπου παρατηρείται έλλειμμα νερού. Οι νέες τεχνολογίες παρέχουν εύκολη πρόσβαση στην πληροφορία για όλους τους χρήστες, ενώ η ενεργή συμμετοχή θα είναι αποτελεσματική με τη χωρική πληροφορία και τα καινοτόμα δίκτυα εργαλείων.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Μέρος της παρούσας εργασίας έχει χρηματοδοτηθεί από τα Προγράμματα DEMETER και PLEIADeS. Οι συγγραφείς της εργασίας θα ήθελαν να ευχαριστήσουν τους Γεώργιο Γεροβασίλη, Δημήτρη Καζά και Νικόλαο Υφαντή για την παραχώρηση των χωραφίων για τις πειραματικές μετρήσεις και τις πληροφορίες που παρείχαν κατά τη διάρκεια του πειράματος, καθώς και τη Ζωή Μπομπότη, γεωπόνο στο Δήμο Φερών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. National Research Council, 1991.
<http://www.cnr.it/sitocnr/Englishversion/Englishversion.html>
2. Seckler, D., Amarasinghe, U., Molden, D., De Silva, R., and Barker, R., 1998. *World water demand and supply 1990 to 2025: Scenarios and issues*. Research Report 19. International Irrigation Management Institute, Colombo, Sri Lanka.
3. Gore, A., 1993: *Earth in the Balance: Ecology and the Human Spirit*. Plume, New York, 407 pp.
4. Calera, A., Medrano, J., Vela, A., and Castaño, S., 1999. *GIS tools applied to the sustainable management of water resources. Application to aquifer system 08-29, Agricultural Water Management*, 40: 207-220.
5. Calera, A; Martinez, C. and Meliá, J., 2001. A procedure for obtaining green plant cover. Its relation with NDVI in a case study for barley. *International Journal of Remote Sensing*.
6. Calera, A., Jochum, A.M. and Cuesta, A., 2003. Space-assisted irrigation management: Towards user-friendly products. *ICID Workshop on Remote Sensing of Crop Evapotranspiration*, Montpellier, 17 Sep 2003, 12 pp.
7. Calera, A., Jochum, A.M., Cuesta, A., Montoro, A., and López Fuster, P., 2005. *Irrigation management from space: Towards user-friendly products. Irrig. Drain. Systems*, 19: 337-353.
8. Jochum, A.M., Calera, A., and co-authors, 2006. Operational Space-assisted Irrigation Advisory Services: Overview and lessons learned from the DEMETER project. *In Proceedings International Conference on Earth Observation for vegetation monitoring and water management*. Napoli, 9-11 November 2005. American Institute of Physics: 3-13.
9. Bastiaanssen, W.G.M., 1998: *Remote Sensing in water resources management: The state of the art*. International Water Management Institute, Colombo, 118pp.
10. Μιμίκου, Μ., 2005. *Σημειώσεις Μαθήματος: ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ*.
<http://www.itia.ntua.gr/nikos/diaxeirish/I.pdf>
11. Domenikiotis, C., Blanta, A., Dalezios, N., 2006. Transferability of the DEMETER Methodology. *Proceedings of International Conference on: Information Systems in Sustainable Agriculture, Agroenvironment and Food Technology*, 20-23 September 2006, Volos, Greece, 963-972 pp.
12. Μπλάντα, Α., 2007. *Παρακολούθηση Υδατικού Ισοζυγίου με Μεθόδους Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (Γ.Σ.Π.)*, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Σχολή Γεωπονικών Επιστημών, Τμήμα Γεωπονίας Ιχθυολογίας και Υδάτινου Περιβάλλοντος, Εργαστήριο Αγρομετεωρολογίας, 175 σελ.
13. FAO, 1998. *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56*.
<http://www.fao.org/docrep/X0490E/X0490E00.htm>
14. Δημητριάδου, Μ., 2005, Εργαστήριο Γεωργίας και Εφαρμοσμένης Φυσιολογίας Φυτών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

(237)

ΑΔΡΟΜΕΡΗΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΤΗΣ ΞΗΡΑΣΙΑΣ ΣΤΗ ΓΕΩΡΓΙΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΞΗΡΑΣΙΑΣ RDI

Γ. Τσακίρης, Δ. Τίγκας

*Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Κέντρο Εκτίμησης Φυσικών Κινδύνων &
Προληπτικού Σχεδιασμού, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 15780, Αθήνα, e-mail:
water@survey.ntua.gr*

Περίληψη

Στην εργασία αυτή περιγράφεται ο νέος δείκτης ξηρασίας RDI (*Reconnaissance Drought Index*) και η χρήση του για τη γενική εκτίμηση της ξηρασίας μιας περιοχής και κάθε έτους ή περιόδου. Ο δείκτης στηρίζεται τόσο στην αθροιστική βροχόπτωση όσο και στην αθροιστική δυνητική εξατμισοδιαπνοή για κάθε περίοδο που εξετάζεται. Με τη χρήση του δείκτη ξηρασίας RDI γίνεται στην παρούσα εργασία η εκτίμηση της έντασης της ξηρασίας σε διάφορες περιοχές της χώρας για το έτος 2006 – 2007. Προτείνεται επίσης μεθοδολογία για την αδρομερή εκτίμηση των απωλειών παραγωγής της μη αρδευόμενης γεωργίας με τη χρήση του συντελεστή RDI και απλοποιημένων συναρτήσεων γεωργικής παραγωγής.

Αναλυτικότερα, ο προτεινόμενος δείκτης ξηρασίας RDI περιγράφεται με τρεις τρόπους. Η αρχική τιμή του δείκτη για κάποια συγκεκριμένη χρονική περίοδο, υπολογίζεται ως το πηλίκο του συνολικής βροχόπτωσης για την περίοδο αυτή, προς τη συνολική δυνητική εξατμισοδιαπνοή για την ίδια περίοδο. Στη συνέχεια μπορούν να υπολογιστούν δύο ακόμα μορφές του δείκτη, η κανονικοποιημένη (*Normalised – RDI_n*) και η τυποποιημένη (*Standardised – RDI_{st}*). Η τελευταία μορφή είναι ανάλογη του ευρέως χρησιμοποιούμενου δείκτη SPI.

Με τη χρήση του δείκτη RDI έγινε προσπάθεια παρακολούθησης της εξέλιξης της ξηρασίας σε περιοχές του ελλαδικού χώρου (σταθμοί Λάρισας, Ελληνικού, Νάξου και Ηρακλείου) για την περίοδο 2006 – 2007. Το δείγμα βροχοπτώσεων και δυνητικής εξατμισοδιαπνοής χρησιμοποιήθηκε σε μηνιαία βάση με αφετηρία την έναρξη του υδρολογικού έτους (Οκτώβριος 2006).

Χρησιμοποιώντας την πρώτη έκφραση του δείκτη RDI και το εμπειρικό μοντέλο Zhang et al. (2004) προκύπτει η εκτίμηση για το λόγο της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής προς την δυνητική εξατμισοδιαπνοή. Με βάση το λόγο αυτό που χρησιμοποιείται ως ανεξάρτητη μεταβλητή στις απλές συναρτήσεις παραγωγής, μπορεί να προκύψει μια αδρομερής εκτίμηση για τις απώλειες παραγωγής για κάθε καλλιέργεια της οποίας είναι γνωστή η συνάρτηση παραγωγής.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ξηρασία είναι ένα φαινόμενο για το οποίο έχουν δοθεί αρκετοί ορισμοί, που σχετίζονται αφενός με συγκεκριμένες εφαρμογές ή έρευνες, αφετέρου με την αντίληψη του κάθε ερευνητή για το φαινόμενο αυτό. Σύμφωνα με τον Rossi (2000) ως ξηρασία μπορεί να θεωρηθεί ένα επαναλαμβανόμενο φαινόμενο που σχετίζεται με το έλλειμμα στη διαθεσιμότητα των υδατικών πόρων σε μία ευρεία γεωγραφική περιοχή και για μία σημαντική χρονική περίοδο.

Η ξηρασία μπορεί να χαρακτηριστεί με τρεις παραμέτρους: την ένταση, τη διάρκεια και την έκτασή της (Rossi et al., 1992), από τις οποίες η ένταση θεωρείται ως η σημαντικότερη (Tsakiris et al., 2007a). Με τον όρο ένταση της ξηρασίας νοείται η σημαντική μείωση στη διαθεσιμότητα του νερού συγκρινόμενη με κάποια τιμή που αντιπροσωπεύει τις ‘κανονικές συνθήκες’.

Ένας από τους περισσότερο ευπαθείς τομείς στην ξηρασία είναι η γεωργία. Η επίδραση των επιπτώσεων στη γεωργία μπορεί να προσδιοριστεί βάσει της έντασης και της διάρκειας της ξηρασίας καθώς και της τρωτότητας του συγκεκριμένου αγροτικού συστήματος (Tsakiris and Tigkas, 2007). Στην εργασία αυτή επιχειρείται η αδρομερής ποσοτικοποίηση της επίδρασης της έντασης της ξηρασίας στη γεωργική παραγωγή μέσω του δείκτη ξηρασίας RDI και απλών συναρτήσεων παραγωγής.

2. ΔΕΙΚΤΗΣ ΞΗΡΑΣΙΑΣ RDI

Ο δείκτης ξηρασίας RDI (Reconnaissance Drought Index) βασίζεται στο λόγο της συνολικής βροχόπτωσης προς τη συνολική δυνητική εξατμισοδιαπνοή και δημοσιεύτηκε αρχικά το 2005 (Tsakiris and Vangelis, 2005, Tsakiris et al., 2007a). Η αρχική τιμή του δείκτη για μία ορισμένη περίοδο προσδιορίζεται από ένα συγκεκριμένο μήνα (k) του υδρολογικού έτους και υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$a_k = \frac{\sum_{j=1}^{j=k} P_j}{\sum_{j=1}^{j=k} PET_j} \quad (1)$$

όπου P_j και PET_j είναι η βροχόπτωση και η δυνητική εξατμισοδιαπνοή, αντίστοιχα, για τον μήνα j του υδρολογικού έτους, το οποίο θεωρείται ότι ξεκινά από τον Οκτώβριο ($k=1$).

Ο a_k υπολογίζεται ως ένας γενικός δείκτης που περιγράφει τη μετεωρολογική ξηρασία και ο υπολογισμός του προτείνεται για περιόδους 3, 6, 9 και 12 μηνών. Αν επιλεγεί η περίοδος των 12 μηνών, τα αποτελέσματα είναι άμεσα συγκρίσιμα με τον Δείκτη Ξηρότητας (Aridity Index) της περιοχής. Αν ο a_{12} ενός συγκεκριμένου έτους είναι μικρότερος από τον Δείκτη Ξηρότητας (UNEP, 1992), τότε η περιοχή βρίσκεται σε κατάσταση ξηρασίας για το έτος αυτό.

Η δεύτερη έκφραση του δείκτη RDI_n (Normalised RDI) περιγράφεται από την εξίσωση:

$$RDI_n(k) = \frac{a_k}{\bar{a}_k} - 1 \quad (2)$$

όπου $\bar{a}_k$ ο αριθμητικός μέσος των a_k τιμών υπολογισμένων για n έτη.

Η τρίτη έκφραση του δείκτη RDI_{st} (Standardized RDI) υπολογίζεται βάσει της παρακάτω εξίσωσης:

$$RDI_{st}(k) = \frac{y_k - \bar{y}_k}{\hat{\sigma}_k} \quad (3)$$

όπου y_k ισούται με το $\ln a_k$, $\bar{y}_k$ είναι ο αριθμητικός του μέσος και $\hat{\sigma}_k$ είναι η τυπική του απόκλιση. Σημειώνεται ότι η παραπάνω έκφραση βασίζεται στην παραδοχή ότι οι τιμές a_k ακολουθούν λογαριθμοκανονική κατανομή.

Για τον προσδιορισμό του επιπέδου της έντασης της ξηρασίας βάσει του RDI_{st} μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι τιμές του Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Τιμές RDI_{st} για τον προσδιορισμό της έντασης της ξηρασίας.

Τιμή RDI_{st}	Κατηγορία έντασης ξηρασίας
> 2.00	Εξαιρετικά υγρό
1.50 έως 1.99	Έντονα υγρό
1.00 έως 1.49	Μέτρια υγρό
0 έως 0.99	Κανονικές συνθήκες - Υγρό
0 έως -0.99	Κανονικές συνθήκες - Ξηρό
-1.00 έως -1.49	Μέτρια ξηρό
-1.50 έως -1.99	Έντονα ξηρό
< -2	Εξαιρετικά ξηρό

Παρατήρηση: Οι τιμές μεταξύ -0.50 και -0.99 αποτελούν ιδιαίτερη κλάση που χαρακτηρίζει την ήπια ξηρασία (Tsakiris et al., 2007a)

Εφόσον είναι γνωστή η σχέση μεταξύ του a_k και του RDI_{st} για μία συγκεκριμένη περιοχή και περίοδο, μπορούν να προσδιοριστούν δύο συντελεστές (c και b), από τους οποίους μπορεί να υπολογιστεί ο RDI_{st} για την αντίστοιχη περίοδο, σύμφωνα με τη σχέση:

$$RDI_{st}(k) = c \cdot \ln(a_k) + b \quad (4)$$

3. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Παρότι ο RDI είναι ένας γενικός δείκτης, ο οποίος εκφράζει κυρίως τη μετεωρολογική ξηρασία, η μορφή του επιτρέπει την εφαρμογή του για την εκτίμηση παραμέτρων που σχετίζονται με τη γεωργική παραγωγή, κυρίως όσον αφορά τις μη αρδευόμενες καλλιέργειες. Αυτό οφείλεται στο ότι σε αρκετές συναρτήσεις παραγωγής υπεισέρχεται ως ανεξάρτητη μεταβλητή η σχέση της πραγματικής προς τη δυνητική εξατμισοδιαπνοή (ET/PET). Υπάρχουν πολλά μοντέλα και μέθοδοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση του λόγου ET/PET με βάση τον RDI. Ένα από αυτά είναι των Zhang et al. (2004):

$$\frac{ET}{PET} = 1 + \frac{P}{PET} - \left[1 + \left(\frac{P}{PET} \right)^w \right]^{1/w} \quad (5)$$

όπου ET η πραγματική εξατμισοδιαπνοή, PET η δυνητική εξατμισοδιαπνοή και P η βροχόπτωση, για μια συγκεκριμένη περίοδο. Ο συντελεστής w εξαρτάται από την

εδαφοκάλυψη της περιοχής και ενδεικτικά παίρνει τις τιμές 2.84 για δενδρώδεις περιοχές και 2.55 για περιοχές με χαμηλή βλάστηση.

Έστω ότι αναφερόμαστε σε μία περίοδο k μηνών ενός υδρολογικού έτους, τότε χρησιμοποιώντας την εξίσωση (1) που περιγράφει την αρχική έκφραση του δείκτη RDI και για a_k μεγαλύτερο της μονάδας, η εξίσωση (5) παίρνει τη μορφή:

$$\frac{ET}{PET} = 1 + a_k - \left[1 + (a_k)^w \right]^{1/w} \quad (6)$$

Μία αδρομερής εκτίμηση των απωλειών της γεωργικής παραγωγής μπορεί να γίνει με την απλή γραμμική συνάρτηση παραγωγής που εκφράζεται με τη σχέση:

$$\frac{y}{y_0} = k_y \cdot \frac{ET}{PET} + (1 - k_y) \quad (7)$$

όπου y/y_0 είναι ο λόγος της πραγματικής προς τη μέγιστη παραγωγή και k_y είναι συντελεστής που εξαρτάται από το είδος της καλλιέργειας (π.χ. Doorenbos and Kassam, 1979).

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση (6), η εξίσωση (7) παίρνει τη μορφή:

$$\frac{y}{y_0} = k_y \cdot \left(a_k - \left[1 + (a_k)^w \right]^{1/w} \right) + 1 \quad (8)$$

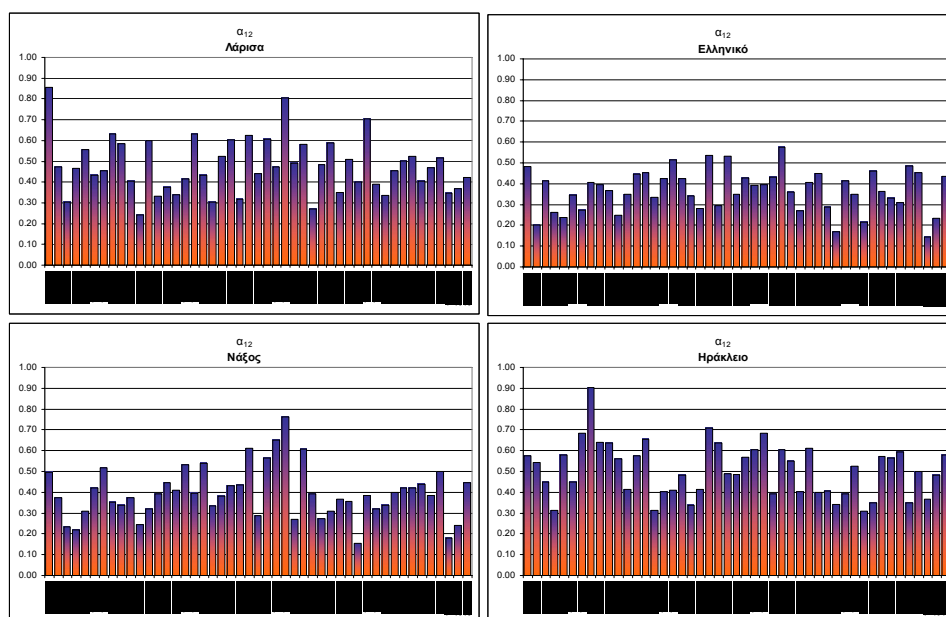
Η παραπάνω σχέση δίνει μια αδρομερή εκτίμηση των απωλειών της παραγωγής, εάν γνωρίζουμε την τιμή a_k του δείκτη RDI. Η εκτίμηση μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας ετήσιες τιμές του δείκτη ($k=12$), αλλά είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν και μικρότερες περίοδοι, οι οποίες να αντιστοιχούν στην περίοδο ανάπτυξης της καλλιέργειας.

4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ

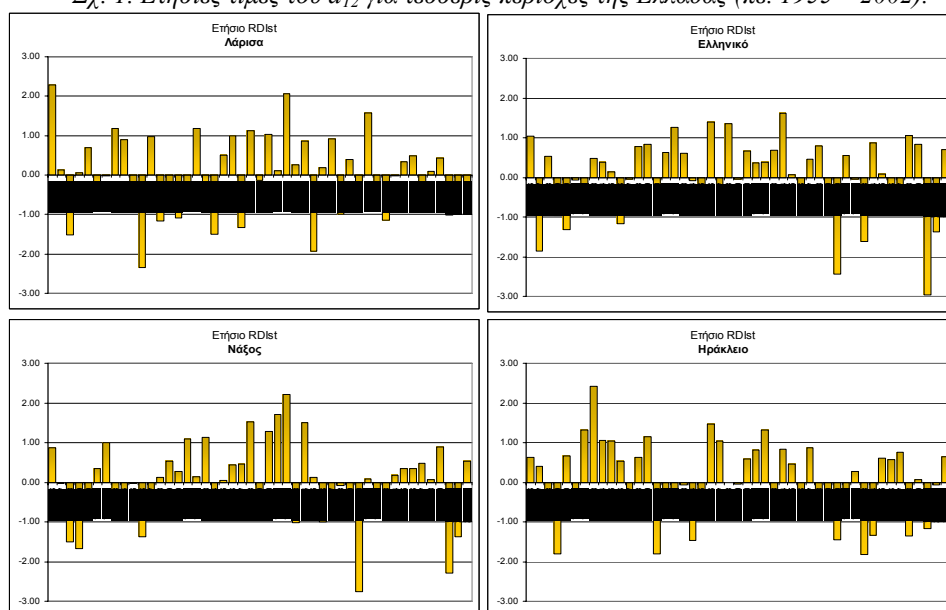
4.1 Εκτίμηση ξηρασίας σε περιοχές της Ελλάδας

Για τον προσδιορισμό των διαχρονικών συνθηκών ξηρασίας σε διάφορες περιοχές της Ελλάδας χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από τέσσερις μετεωρολογικούς σταθμούς της Ε.Μ.Υ.: στη Λάρισα, το Ελληνικό (Αθήνα), τη Νάξο και το Ηράκλειο.

Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα βροχόπτωσης των παραπάνω σταθμών, καθώς και δεδομένα μέσης θερμοκρασίας, από τα οποία προσδιορίστηκε η δυνητική εξατμισοδιαπνοή μέσω της μεθόδου Thornthwaite. Βάσει των στοιχείων αυτών υπολογίστηκαν οι τιμές του RDI για περίοδο 47 υδρολογικών ετών (1955 – 2002). Οι υπολογισμοί έγιναν με το λογισμικό *DrinC* (Tsakiris et al., 2007b) που έχει αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Εγγειοβελτιωτικών Έργων & Διαχείρισης Υδατικών Πόρων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τις ετήσιες τιμές του RDI (a_{12} και RDI_{st}) παρουσιάζονται στα Σχήματα 1 και 2.



Σχ. 1. Ετήσιες τιμές του a_{12} για τέσσερις περιοχές της Ελλάδας (πε. 1955 – 2002).



Σχήμα 2. Ετήσιες τιμές του RDI_{st} για τέσσερις περιοχές της Ελλάδας (περίοδος 1955 – 2002).

Από τα παραπάνω αποτελέσματα προσδιορίστηκαν οι συντελεστές c και b της εξίσωσης (4) όπως φαίνονται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2. Τιμές συντελεστών για τον υπολογισμό του RDI_{st} (για την περίοδο 1955 – 2002).

	k=3		k=4		k=5		k=6		k=7	
	c	b	c	b	c	b	c	b	c	b
Ελληνικό	2.3500	-0.3362	2.7163	-0.7530	3.0390	-1.0562	2.8501	-0.9759	3.0259	-0.5926
Ηράκλειο	2.4170	-0.0245	2.7439	-0.3234	3.0467	-0.5351	4.0078	-2.1648	3.6203	-1.4017
Λάρισα	2.3058	-1.0183	2.5689	-1.4435	2.8467	-1.7932	2.7353	-1.5847	2.9944	-1.1704
Νάξος	2.4857	0.1231	2.7372	-0.4350	2.9717	-0.7425	3.1468	-0.7760	3.0477	-0.2579
	k=8		k=9		k=10		k=11		k=12	
	c	b	c	b	c	b	c	b	c	b
Ελληνικό	3.151	0.3131	3.2739	1.4155	3.1930	2.3601	3.1772	3.0138	3.3020	3.4461
Ηράκλειο	3.7092	-0.4872	3.8481	0.6114	3.8816	1.6693	3.8644	2.4330	3.4264	3.4402
Λάρισα	3.1317	-0.2723	3.3969	0.8776	3.5470	1.9411	3.4415	2.5474	3.6594	2.8561
Νάξος	3.0959	0.4903	3.1391	1.3637	3.1422	2.1679	3.1408	2.7510	3.1335	3.0601

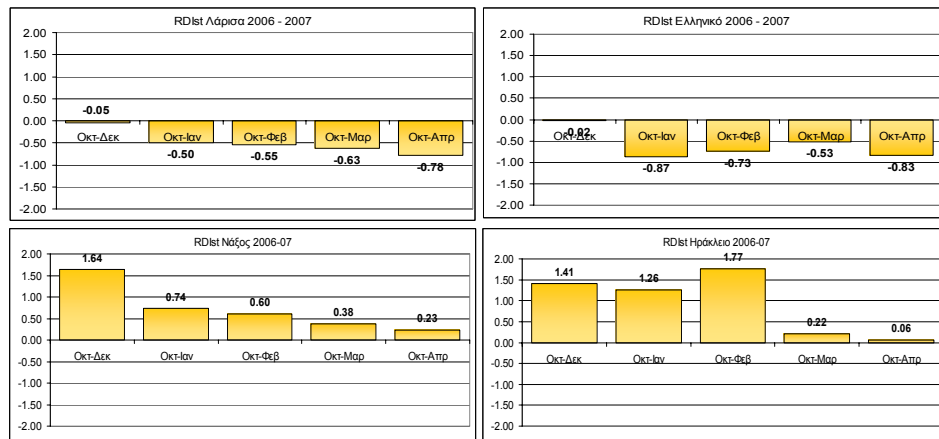
Χρησιμοποιώντας τα παραπάνω στοιχεία υπολογίστηκε ο RDI_{st} στις τέσσερις υπό μελέτη περιοχές, για το πρώτο 3-μηνο, 4-μηνο, 5-μηνο 6-μηνο και 7-μηνο του υδρολογικού έτους 2006 – 2007 (Σχήμα 3).

4.2 Εκτίμηση απωλειών παραγωγής λόγω της ξηρασίας

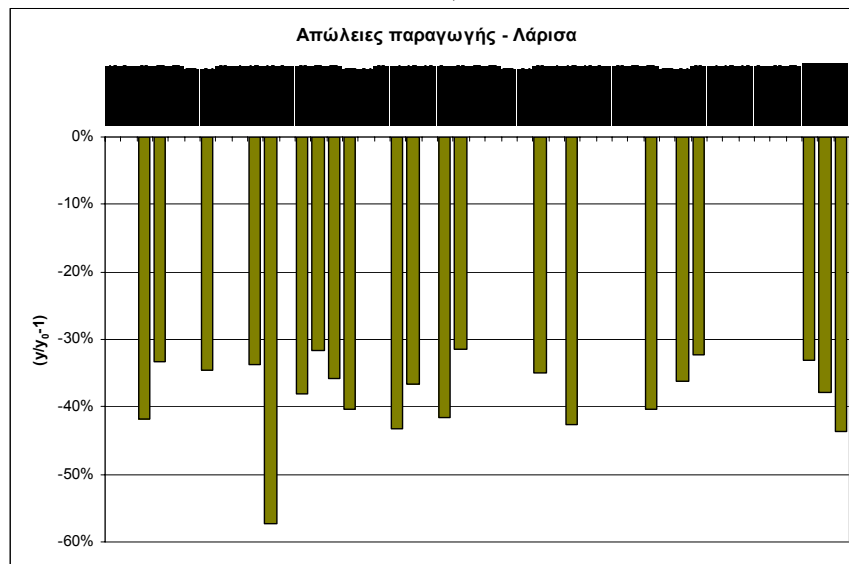
Στη συγκεκριμένη εφαρμογή χρησιμοποιήθηκαν τα μετεωρολογικά δεδομένα από την περιοχή της Λάρισας για την περίοδο 1955 – 2002 και εξετάστηκαν οι απώλειες παραγωγής καλλιέργειας χειμερινών σιτηρών ($k_y = 1.0$). Ως περίοδος αναφοράς θεωρήθηκε το πρώτο 8-μηνο κάθε υδρολογικού έτους (Οκτώβριος – Μάιος), δηλαδή k=8.

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση (8) προκύπτουν οι απώλειες της παραγωγής για κάθε έτος (Σχήμα 4). Όπως φαίνεται από το Σχήμα 4 σημαντικότερες απώλειες παραγωγής παρουσιάζονται κατά το έτος 1965 – 66 και φτάνουν το 57%, ενώ υπάρχουν ακόμα 7 έτη με απώλειες μεγαλύτερες του 40% για την εξεταζόμενη περίοδο.

Οι απώλειες παραγωγής που παρουσιάζονται αναφέρονται σε σύγκριση με τη μέγιστη παραγωγή που θα επιτυγχανόταν υπό ιδανικές συνθήκες. Η πραγματική αναμενόμενη παραγωγή υπό φυσιολογικές συνθήκες, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη άλλοι παράγοντες (ασθένειες φυτών, παγετός κτλ), θα είναι αυτή που επιτυγχάνεται όταν ο RDI_{st} παίρνει τιμές που κυμαίνονται στις κανονικές – υγρές συνθήκες (0.0 – 1.0). Για την εξεταζόμενη περιοχή η παραγωγή αυτή αντιστοιχεί περίπου στο 80% της μέγιστης παραγωγής.



Σχήμα 3. Τιμές του RDI_{st} για τέσσερις περιοχές της Ελλάδας (υδρολογικό έτος 2006 – 2007).



Σχήμα 4. Ποσοστό απωλειών παραγωγής (1955 – 2002).

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή παρουσιάστηκε ο δείκτης ξηρασίας RDI που στηρίζεται σε δύο μεταβλητές, την αθροιστική βροχόπτωση και την αθροιστική δυνητική εξατμισοδιαπνοή. Ο δείκτης RDI χρησιμοποιήθηκε για την αποτύπωση της κατάστασης ξηρασίας σε τέσσερις περιοχές της χώρας (σταθμοί Λάρισα, Ελληνικού, Νάξου και Ηρακλείου), για την περίοδο 1955- 2002. Επίσης, έγινε προσπάθεια παρακολούθησης της εξέλιξης της ξηρασίας για την περίοδο 2006 – 2007 στις περιοχές αυτές, βάσει των συντελεστών που προέκυψαν από τη μελέτη του ιστορικού δείγματος.

Η εργασία τέλος υποδεικνύει μια απλή μεθοδολογία για την αδρομερή εκτίμηση των απωλειών της γεωργικής παραγωγής με την εκτίμηση του λόγου ET/PET, χρησιμοποιώντας τον δείκτη RDI και την αντίστοιχη συνάρτηση παραγωγής.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εργασία αυτή πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος PRODIM (Proactive Management of Water Systems to Face Drought and Water Scarcity in Islands and Coastal Areas of the Mediterranean) - INTERREG III B ARCHIMED, που συγχρηματοδοτείται από κοινοτικούς και εθνικούς πόρους.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Doorenbos, J. and Kassam, A.H. (1979). Yield response to water, FAO, Irr. and Drain. Paper 33, Rome.
- Rossi, G., 2000, Drought mitigation measures: a comprehensive framework. In ‘Drought and Drought Mitigation in Europe’. J. Voght and F. Somma (Eds), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Rossi, G., Benedini, M., Tsakiris, G., Giakoumakis S., 1992. On regional drought estimation and analysis. *Water Resources Management* 6:249-277.
- Tsakiris G., Pangalou D., Vangelis H., 2007a. Regional drought assessment based on the Reconnaissance Drought Index (RDI). *Water Resources Management* 21:821-833
- Tsakiris G., Tigkas D., 2007. Drought Risk in Agriculture in Mediterranean Regions. Case Study: Eastern Crete. In Rossi et al. (eds.) ‘Methods and Tools for Drought Analysis and Management’ 399-414. Springer, The Netherlands
- Tsakiris G., Tigkas D., Vangelis H., Pangalou D., 2007b. Regional Drought Identification and Assessment – Case Study in Crete. In Rossi et al. (eds.) ‘Methods and Tools for Drought Analysis and Management’ 169-191. Springer, The Netherlands
- Tsakiris G., Vangelis H., 2005. Establishing a Drought Index Incorporating Evapotranspiration. *European Water*, 9-10: 3-11
- UNEP, 1992. World Atlas of Desertification. Edward Arnold, London.
- Zhang L, Hickel K, Dawes WR, Chiew F, Western A., 2004. A rational function approach for estimating mean annual evapotranspiration. *Water Resources Research*, 40, W02502, doi:10.1029/2003WR002710