ΕΤΑΙΡΕΙΑ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΛΛΑΔΑΣ

(Ε.Γ.Μ.Ε.)

ΠΡΑΚΤΙΚΑ

3ο ΠΑΝΕΛΛΗΝΙΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

Επιμέλεια Έκδοσης

Β. Αντωνόπουλος,

Κ. Ακριτίδης και Κ. Τσατσαρέλης

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ

29-31 Μαΐου 2003

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η Εταιρεία Γεωργικών Μηχανικών Ελλάδος (Ε.ΓΜ.Ε.) ιδρύθηκε τον Ιούλιο του 1993 με έδρα την Αθήνα και είναι μέλος της Ευρωπαϊκής Ένωσης Γεωργικών Μηχανικών (EurAgEng). Η επωνυμία της αποδίδεται στην αγγλική ως "Hellenic Society of Agricultural Engineers" (HelAgEng). Τα μέλη της σήμερα φθάνουν τα 140.

Το παρόν τεύχος των πρακτικών περιέχει 60 επιστημονικές ανακοινώσεις που παρουσιάστηκαν στο 3^{ο} Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωργικής Μηχανικής, το οποίο έλαβε χώρα στη Θεσσαλονίκη από 29-31 Μαΐου 2003. Όλες οι εργασίες κρίθηκαν από μέλη της Επιστημονικής Επιτροπής και άλλους ειδικούς επιστήμονες. Το συνέδριο οργανώθηκε υπό την αιγίδα του Τμήματος Γεωπονίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης.

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

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

Προς την Πρυτανεία, την Επιτροπή Ερευνών του Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, το Υπουργείο Πολιτισμού, την Asprofos καθώς και τους άλλους χορηγούς και εκθέτες απευθύνονται ειλικρινείς ευχαριστίες για την οικονομική ενίσχυση που προσέφεραν ώστε να πραγματοποιηθεί με επιτυχία το παρόν συνέδριο.

Θεσσαλονίκη, Μάιος 2003

Καθηγητής, Κων/νος Β. Ακριτίδης
Πρόεδρος Οργανωτικής Επιτροπής

Οργανωτική Επιτροπή Συνεδρίου

Ακριτίδης Κ., Καθηγητής Α.Π.Θ., Πρόεδρος ΕΓΜΕ

Αντωνόπουλος Β., Καθηγητής Α.Π.Θ.
Γεωργίου Π., Γεωπόνος Α.Π.Θ.
Γιαννόπουλος Σ., Καθηγητής Α.Π.Θ.
Μήτσιου Κ., Γεωπόνος Δημ. Υπ.
Μπαλουκτσής Σ., Πρόεδρος Ε.Κ.Γ.Μ.Β.Ε.
Παυλάτου-Βε Α., Επ. Καθηγήτρια Α.Π.Θ.
Σακελλαρίου Μακραντωνάκη Μ., Καθηγήτρια Π.Θ.
Τσατσαρέλης Κ., Καθηγητής Α.Π.Θ., ΔΣ ΕΓΜΕ
Κωνσταντινίδου Μ. γραμματέας συνεδρίου

Επιστημονική Επιτροπή

Ακριτίδης Κ., Καθηγητής Α.Π.Θ.
Αναστασιάδου-Παρθενίου Ε., Καθηγήτρια Α.Π.Θ.
Αντωνόπουλος Β., Καθηγητής Α.Π.Θ.
Γέμτος Θ., Καθηγητής Π.Θ.
Γιαννόπουλος Στ., Καθηγητής Α.Π.Θ.
Ζήσης Θ., Καθηγητής Α.Π.Θ.
Καραμούζης Δ., Καθηγητής Α.Π.Θ.
Κίττας Κ., Καθηγητής Π.Θ.
Κυρίτσης Σ., Ομ. Καθηγητής Γ.Π.Α.
Μαρτζόπουλος Γ., Καθηγητής Α.Π.Θ.
Μισοπολινός Ν., Καθηγητής Α.Π.Θ.
Μπαμπατζιμόπουλος Χ., Καθηγητής Α.Π.Θ.
Μπριασούλης Δ., Καθηγητής Γ.Π.Α.
Νικήτα-Μαρτζοπούλου Χ., Καθηγήτρια Α.Π.Θ.
Παναγιωτόπουλος Κ., Καθηγητής Α.Π.Θ.
Παπαδάκης Γ., Επ. Καθηγητής Γ.Π.Α.
Παπαμιχαήλ Δ., Καθηγητής Α.Π.Θ.
Παρισόπουλος Γ., ΕΘ.Ι.ΑΓ.Ε.
Παυλάτου-Βε Α., Επ. Καθηγήτρια Α.Π.Θ.
Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη Μ., Καθηγήτρια Π.Θ.
Συγριμής Ν., Καθηγητής Γ.Π.Α.
Τερζίδης Γ., Ομότιμος Καθηγητής Α.Π.Θ.
Τζιμόπουλος Χ., Καθηγητής Α.Π.Θ.
Τσατσαρέλης Κ., Καθηγητής Α.Π.Θ.

Κριτές Επιστημονικών Εργασιών

Ακριτίδης Κων/νος, Αντωνόπουλος Βασίλης, Βουγιούκας Σταύρος, Γαλανοπούλου Στέλλα, Γέμτος Θεοφάνης, Γεωργακάκης Δημήτριος, Γιαννόπουλος Σταύρος, Δαλέζιος Νικόλαος, Δαναλάτος Νικόλαος, Ζήσης Θωμάς, Καραμούζης Διαμαντής, Κερκίδης Πέτρος, Κίττας Κων/νος, Κυρίτσης Σπύρος, Κωστοπούλου Σοφία, Ελευθεροχωρινός Ηλίας, Λαζαρίδης Χαράλαμπος, Λαμπρινός Γεώργιος, Μαρτζόπουλος Γεράσιμος, Μαυρογιαννόπουλος Γεώργιος, Μαντόγλου Αριστοτέλης, Μισοπολινός Νικόλαος, Μπαλτάς Ευάγγελος, Μπαμπατζιμόπουλος Χρήστος, Μπαρμπαγιάννης Νικόλαος, Μπριασούλης Δημήτρης, Νάνος Γεώργιος, Νικήτα-Μαρτζοπούλου Χρυσούλα, Οικονόμου Αθανάσιος, Παναγιωτόπουλος Κυριάκος, Πανώρας Αθανάσιος, Παπαδάκης Γεώργιος, Παπαμιχαήλ Δημήτριος, Παπουτσή-Ψυχουδάκη Σοφία, Παυλάτου-Βε Αθηνά, Πιτσικής Ιωάννης, Σακελλαρίου - Μακραντωνάκη Μαρία, Συλλαίος Νικόλαος, Σφακιωτάκης Ευάγγελος, Τερζίδης Γεώργιος, Τζιμόπουλος Χρήστος, Τσατσαρέλης Κων/νος, Τσιούρης Σωτήρης, Ψυχουδάκης Ασημάκης

Επικοινωνία - αλληλογραφία – πληροφορίες

Αντωνόπουλος Βασίλης
Καθηγητής Α.Π.Θ.
Τμήμα Γεωπονίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
54124 Θεσσαλονίκη
Τηλ. 2310 998745, 2310 998743, 2310 998744
Fax: 2310 998767
E-mail: vasanton@agro.auth.gr
Internet: www.egme.gr
EurAgEng: www.eurageng

ΧΟΡΗΓΟΙ

(Μέχρι 15 Απριλίου 2003)

Θερμές ευχαριστίες εκφράζονται από μέρους της Οργανωτικής Επιτροπής του Συνεδρίου στους χορηγούς και τους εκθέτες που βοήθησαν στην υλοποίησή του.

- Ασπροφός Α.Ε.
- Υπουργείο Πολιτισμού
- Αριστοτέλειο Παν/μιο Θεσσαλονίκης – Επιτροπή Ερευνών

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Υδατικοί Πόροι - Υδρολογία

Σελ

«Η πλήρης ανάκτηση κόστους για τις υπηρεσίες ύδατος στην οδηγία 2000/60 για τα νερά»
Σ. Γιαννόπουλος, Χ. Τζιμόπουλος 3

«Συγκριτική ανάλυση των εκτιμήσεων των αιχμών απορροής με συνθετικά μοναδιαία υδρογραφήματα και με εμπειρικές σχέσεις»
Π. Ε. Γεωργίου, Δ. Μ. Παπαμιχαήλ, Δ. Ν. Καραμούζης 11

«Εκτίμηση καμπυλών διάρκειας παροχών στον ποταμό Αλιάκμονα»
Ε.Α. Μπαλτάς 20

«Εμπειρίες από την ανάλυση τεσσάρων ισχυρών επεισοδίων βροχής στην Αττική την περίοδο Μαΐου-Νοεμβρίου 2002»
Ε.Α. Μπαλτάς, 29

«Μοντέλο Νευρωνικού Δικτύου για την εκτίμηση της μέσης ετήσιας στάθμης της λίμνης Βεγορίτιδος»
Α. Σπυρίδης, Β. Κουτάλου, Ν. Γκιτσάκης 36

«Δυνατότητες εκμετάλλευσης του καρστικού υδροφορέα Κρανιάς Ελασσόνας, Θεσσαλία»
Α. Κ. Μανάκος, Γ. Χ. Δημόπουλος 43

Υδατικοί Πόροι - Αρδεύσεις

«Εκτίμηση της ειδικής παροχής άρδευσης σε ένα προτεινόμενο σχέδιο διαχείρισης των ταμιευτήρων Ολυνθίου, Χαβρία και Πετρένια Χαλκιδικής»
Δ. Μ. Παπαμιχαήλ, Π. Ε. Γεωργίου, Δ. Ν. Καραμούζης 53

«Επίδραση της συχνότητας άρδευσης με σταγόνες στην απόδοση βιομάζας αραβοσίτου»
Θ. Λέλλης, Π. Ντιούδης, Αγ. Φιλίντας, Γ. Μαρτζόπουλος 61

«Παραγωγικότητα καλλιέργειας αραβοσίτου συναρτήσει του εύρους άρδευσης με σύστημα στάγδην»
Π. Ντιούδης, Αγ. Φιλίντας, Θ. Λέλλης, Μ. Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη 69

«Σχέσεις νερού και ποιοτικών χαρακτηριστικών βαμβακιού»
Δ. Καλφούντζος, Ι. Αλεξίου, Π. Βύρλας, Σ. Κωτσόπουλος, Γ. Ζέρβα 77

Γεωργικά Μηχανήματα

«Ανάπτυξη βαμβακιού κάτω από κατεργασία υπεδαφοκαλλιεργητή με αβαθή στελέχη»
Ι. Παπαθανασίου, Χρ. Καραμούτης, Χρ. Καβαλάρης, Δ. Παπαμιχαήλ, Θ. Γέμτος 87

«Ελαχιστοποίηση της καταναλισκόμενης ενέργειας υπεδαφοκαλλιεργητή με προσθήκη υνίων για αβαθή κατεργασία»
Ι. Παπαθανασίου, Χρ. Καραμούτης, Χρ. Καβαλάρης, Θ.Α. Γέμτος 95

«Αυτοκινούμενα οχήματα στη γεωργία»
Σ. Φουντάς, Θ.Γέμτος, S. Blackmore 103

«Πειραματική μελέτη του μηχανικού εξοπλισμού για σπορά βαμβακιού υπό κάλυψη»
Θ. Σταθάκος και Θ. Γέμτος 111

«Επίδραση καλλιεργητικών τεχνικών στην απόδοση και το ενεργειακό κόστος επίσπορου αραβοσίτου»
Α.Σ. Λιθουργίδης, Κ.Α. Τσατσαρέλης 119

«Ελκυστήρες με σύγχρονο εξοπλισμό σε εργασίες κατασκευής δασικών δρόμων και μετατόπισης ξύλου»
Πλ. Καραρίζος, Ε. Καραγιάννης, Π. Εσκίογλου 127

«Μελέτη των φθορών δασικών δρόμων που προκαλούνται από μέσα μεταφοράς»
Π. Εσκίογλου, Ε. Καραγιάννης, Πλ. Καραρίζος 136

«Αριστος χρόνος αντικατάστασης βαμβακοσυλλεκτικών μηχανών»
Ε. Μυγδάκος, Γ. Κιτσοπανίδης, Θ.Α. Γέμτος 144

Επεξεργασία Γεωργικών Προϊόντων

«Μέτρηση της αναπνοής οπωροκηπευτικών συντηρουμένων με τροποποιημένη ατμόσφαιρα. Εφαρμογή στο μανιτάρι»
Δ. Γεωργακοπούλου, Π. Δημαρέλη, Γ. Λαμπρινός, Ε. Μανωλοπούλου, Δ. Μητρόπουλος 153

«Επίδραση της θερμοκρασίας και της τροποποιημένης ατμόσφαιρας στην ποιότητα της πιπεριάς»
Σ. Χαρίτση, Ι. Μαρίτσα, Ν. Παυλίκου, Ε. Μανωλοπούλου 159

«Επίδραση της θερμοκρασίας συντήρησης στο ρυθμό και στη θερμότητα αναπνοής καλλιεργουμένων μανιταριών»
Π. Δημαρέλη, Γ. Βαρζακάκος, Γ. Λαμπρινός, Ε. Μανωλοπούλου 167

«Μεταβολή του ρυθμού και της θερμότητας αναπνοής με τη θερμοκρασία συντήρησης δύο ποικιλιών μήλων»
Μ. Κανάκη, Γ. Λαμπρινός, Δ. Μητρόπουλος, Ε. Μανωλοπούλου 174

«Επίδραση της τροποποιημένης ατμόσφαιρας στην αναπνευστική δραστηριότητα μήλων Pilafa Delicious»
Ι. Καμβύση. Γ. Λαμπρινός, Ε. Μανωλοπούλου, Δ. Μητρόπουλος 180

«Συγκριτική διερεύνηση της παραγωγικότητας καλλιέργειας τρανταφυλλιάς σε ανοικτό και κλειστό υδροπονικό σύστημα»
Α. Μπιμπή, Χ. Λύκας, Γ. Νάνος, Κ. Κίττας 188

Νέες Τεχνολογίες στη Γεωργία

«Σχεδιασμός ενός αυτόνομου συστήματος αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης με ανεμογεννήτρια και Φωτοβολταϊκά»
Ε. Mohamed, Γ. Παπαδάκης 199

«Τεχνική εισαγωγής λάθους στο λογισμικό ελέγχου του ρυθμιστή στροφών των γεωργικών ελκυστήρων
Ι. Γράβαλος 207

«Ανάπτυξη ενός φωτοβολταϊκού αντλητικού συγκροτήματος με κινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος χωρίς συσσωρευτές»
Μ. Predescu, A. Cracinescu, Λ. Καλλιβρούσης, Γ. Παπαδάκης 214

«Γεωργία ακριβείας στο βαμβάκι: Συσχέτιση χαρτών παραγωγής και ηλεκτρικής αγωγιμότητας»
Αθ. Μαρκινός, Θ. Γέμτος, Λ. Τούλιος, Δ. Πατέρας, Γ. Ζέρβα, Μ. Παπαοικονόμου 222

«Γεωργία ακριβείας: Προοπτικές εφαρμογής στην Ελλάδα και στην Νότια Ευρώπη»
Θ.Α. Γέμτος, Σπ. Φουντάς, Α. Μαρκινός, S. Blackmore 230

«Τράπεζα δοκιμών για τον καθορισμό της ευστάθειας γεωργικών μηχανημάτων»
Θ. Γιαλαμάς, Ζ. Κουτσοφίτης, Αγ. Φιλίντας 238

Γεωργία και Περιβάλλον

«Σύγκριση της απόδοσης δεξαμενών σταθεροποίησης και συμβατικής δευτεροβάθμιας επεξεργασίας υγρών αστικών αποβλήτων»
Α. Παπαδόπουλος, Γ. Παρισσόπουλος, Φ. Παπαδόπουλος 249

«Ορισμένα στοιχεία της λειτουργίας του συστήματος Remos στο Δέλτα του Νέστου για τον ποσοτικό και ποιοτικό έλεγχο των υδατικών πόρων μετά τη λειτουργία των υδροηλεκτρικών έργων»
Α. Ψιλοβίκος, Κ. Αλμπανάκης, Σ. Μαργώνη, Αρ. Ψιλοβίκος, Χ. Μακρυγιώργος 257

«Αρδευση πρασίνου με επεξεργασμένα υγρά αστικά απόβλητα»
Μ. Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, Ι. Τέντας, Α. Κολιού, Δ. Καλφούντζος, Ν. Παπανίκος. 265

«Παράμετροι ποιότητας νερού των υγροτόπων Ν. Φώκαιας Χαλκιδικής»
Σ. Καλπάκης, Σ.Ε. Τσιούρης 273

«Η επίδραση κομπόστας (φυτικής προέλευσης) στην ανάπτυξη του ριζικού συστήματος καλαμποκιού (Zea mays L)»
Β. Ντούπη, Α. Παυλάτου-Βε, Σ. Σακελλαριάδης 282

«Επίδραση τρόπου – χρόνου κατεργασίας του εδάφους και εφαρμογής ζιζανιοκτόνων στην εμφάνιση των ζιζανίων»
Σ. Δ. Σουΐπας, Π. Χ. Λόλας, Θ. Α. Γέμτος 290

Μαθηματικά μοντέλα στη Γεωργία

«Προσομοίωση του νερού και της θερμοκρασίας με το μοντέλο WANISIM, σε έδαφος με φυτά»
Β.Ζ. Αντωνόπουλος, Δ.Δ. Μιχαηλίδου 301

«Μελέτη ενός εκθετικού μοντέλου πρόσληψης νερού από το ριζικό σύστημα των φυτών»
Χ. Γεωργούσης, Χ. Μπαμπατζιμόπουλος 309

«Συμπεριφορά φυτοφαρμάκων μετά την εφαρμογή τους στο έδαφος»
Π. Κερκίδης, Ι. Αργυροκαστρίτης, W.O. Ochola 318

«Διακοπτικός ελεγκτής εδαφικής υγρασίας»
Ι. Γράβαλος 327

Αγροτικές κατασκευές

«Η χιονοφόρτιση των θερμοκηπιακών κατασκευών σύμφωνα με τους ευρωκώδικες»
Μ. Θεοχάρης 337

«Μελέτη ολοκληρωμένου προγράμματος διαχείρισης θερμοκηπίων»
Θ. Κωτσόπουλος, Γ. Μαρτζόπουλος, Χ. Νικήτα-Μαρτζοπούλου 345

«Επίδραση δύο νέων φωτοεκλεκτικών υλικών κάλυψης θερμοκηπίων στο περιβάλλον και στην καλλιέργεια τομάτας»
Χ. Παπαϊωάννου, D. Obeid, Ν. Κατσούλας, Κ. Κίττας 354

«Επίδραση φύλλων κάλυψης θερμοκηπίου απορροφητικών στη UV ακτινοβολία στη δραστηριότητα εντόμων σε καλλιέργεια τομάτας»
Α. Βατσανίδου, Ι. Μαργαριτόπουλος, Χ. Παπαϊωάννου, Ι.Α. Τσιτσιπής, Κ. Κίττας 362

«Αριθμητική και πειραματική διερεύνηση του φυσικού αερισμού θερμοκηπίου»
Θ. Μπαρτζάνας, Κ.Κίττας. 370

«Διερεύνηση της κατανομής θερμοκρασίας και υγρασίας σε μερικά σκιασμένο θερμοκήπιο εξοπλισμένο με σύστημα υγρής παρειάς»
Κ.Κίττας, Α. Κοντές, Θ. Μπαρτζάνας 379

«Επίδραση διάφορων τεχνικών ελέγχου των υπερθερμάνσεων στο μικροκλίμα του θερμοκηπίου»
Κ. Κίττας, Ν. Κατσούλας. 387

«Συγκριτική μελέτη της επίδρασης του αερισμού, της σκίασης και του δροσισμού των θερμοκηπίων σε καλλιέργεια τριανταφυλλιάς»
Ν. Κατσούλας, Κ. Κίττας 395

«Θέρμανση θερμοκηπίων με γεωθερμική ενέργεια: Επιλογή του κατάλληλου συστήματος θέρμανσης»
Ι. Χοτζακιάνης, Γ. Μαρτζόπουλος, Χ. Νικήτα-Μαρτζοπούλου 403

«Εμπλουτισμός θερμοκηπίων με CO_2 σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών για εξοικονόμηση ενέργειας»
Δ. Βαφειάδης, Χ. Νικήτα-Μαρτζοπούλου, Γ. Μαρτζόπουλος 413

«Διερεύνηση της δυνατότητας χρήσης της αντλίας θερμότητας στο χοιροστάσιο»
Ν. Οικονόμου, Γ. Λαμπρινός 421

Ενέργεια στη Γεωργία

«Δυναμικό μοντέλο και έλεγχος συστήματος ανάκτησης ενέργειας σε διεργασίες ξήρανσης»
Σ. Βουγιούκας, Α. Δημητριάδης, Κ. Ακριτίδης 431

«Υπολείμματα καλλιέργειας βαμβάκος και παραγωγή βιομάζας στο Νομό Καρδίτσας»
Θ. Λέλλης, Γ. Μαρτζόπουλος, Π. Ντιούδης, Αγ. Φιλίντας, Αν. Μπλούκα, Μ. Λιναρδοπούλου 441

«Ενεργειακό και θρεπτικό δυναμικό των Ζωϊκών Αποβλήτων στην Ελλάδα»
Μ. Μαρδίκης 449

«Δυναμικό γεωργικών υπολειμμάτων για παραγωγή ενέργειας στην Ελλάδα»
Α. Νικολάου, Ι. Παπαμιχαήλ, Β. Λυχναράς, Κ. Πανούτσου 457

«Ενεργειακό ισοζύγιο συμβατικής και ολοκληρωμένης διαχείρισης της μηλοκαλλιέργειας»

Α. Στραπάτσα, Γ.Δ. Νάνος, Ν. Σκρέτα, Ι. Πέτκου, Η. Παπακωνσταντίνου, Ε.Μ. Σφακιωτάκης, Κ.Α. Τσατσαρέλης 465

«Προοπτικές εξοικονόμησης ενέργειας κατά την εφαρμογή μειωμένης κατεργασίας του εδάφους στο σιτάρι»
Χρ. Καβαλάρης, Χ. Καραμούτης, Ι. Παπαθανασίου, Θ.Α. Γέμτος 473

«Υπολογισμός συνολικών εισροών και εκροών ενέργειας στα ζαχαρότευτλα για 5 μεθόδους κατεργασίας εδάφους»
Χρ. Καβαλάρης, Θ.Α. Γέμτος 481

«Ελαιοκράμβη (Brassica sp.) μία υποσχόμενη καλλιέργεια για την παραγωγή βιοντήζελ στην Ελλάδα»
Ε.Νάματοβ, Α. Νικολάου, Μ. Μαρδίκης, Κ. Πανούτσου 489

«Τα πολυμέσα Η/Υ ως εργαλείο ενίσχυσης της εκπαιδευτικής διαδικασίας στη γεωργική μηχανική»
Αγ. Φιλίντας, Κ. Δούκας, Θ. Γιαλαμάς, Β. Στανιός 497

«Απλή και ακριβής μέθοδος σταθερής στράγγισης διαστρωμένων εδαφών»

Γ.Τερζίδης 505

Ευρετήριο συγγραφέων 515

Μαθηματικά Μοντέλα στη Γεωργία

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ, ΜΕ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ WANISIM, ΣΕ ΕΔΑΦΟΣ ΜΕ ΦΥΤΑ

Β. Ζ. Αντωνόπουλος και Δ. Δ. Μιχαηλίδου
Τομέας Εγγείων Βελτιώσεων, Εδαφολογίας και Γεωργικής Μηχανικής,
Τμήμα Γεωπονίας, Α.Π.Θ., 54124 Θεσσαλονίκη.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η θερμοκρασία του εδάφους αποτελεί σημαντικό παράγοντα που επηρεάζει τις περισσότερες διαδικασίες, που συμβαίνουν στην ακόρεστη ζώνη. Στην εργασία παρουσιάζεται η ανάπτυξη ενός μαθηματικού μοντέλου της μεταφοράς θερμότητας στο έδαφος με βάση την επίλυση της αντίστοιχης εξίσωσης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Το μοντέλο αυτό συνδυάζεται με το μοντέλο WANISIM, που περιγράφει την κίνηση του νερού και τη μεταφορά μάζας και τους μετασχηματισμούς του αζώτου στο έδαφος. Η εφαρμογή του μοντέλου γίνεται σε ένα έδαφος καλυμμένο με γρασίδι υπό συνθήκες αγρού για μία χρονική περίοδο 10 μηνών. Τα αποτελέσματα της κατανομής της εδαφικής υγρασίας και της θερμοκρασίας συγκρίνονται με αντίστοιχες μετρημένες τιμές κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.

Λέξεις κλειδιά:μεταφορά θερμότητας,θερμοκρασία, εδαφικό νερό, μοντέλο WANISIM

SIMULATION OF SOIL WATER AND TEMPERATURE IN A SOIL WITH PLANTS USING WANISIM MODEL

V.Z. Antonopoulos and D.D. Michailidou
Department of Hydraulics, Soil Science and Agricultural Engineering
School of Agriculture, Aristotle University, 54124 Thessaloniki, Greece.

ABSTRACT

Soil temperature is an important factor that affects most processes and reactions occurring in the unsaturated zone. In this paper, a mathematical model based on the solution of heat transport in the soil equation with the finite element method, is presented. The heat transport model has been incorporated as part of the integrated WANISIM model which describes the soil water movement and the nitrogen transport and transformations in the soil. Data from a soil covered by grass for a time period of ten months are used for the application and checking of the model. A significant agreement was observed between the simulation results and the measurements of water content and soil temperature.

Keywords: Heat transport, soil temperature, soil water, WANISIM model

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η θερμοκρασία του εδάφους είναι μία σημαντική παράμετρος που επηρεάζει πολλά και σημαντικά φαινόμενα και διαδικασίες που συμβαίνουν στην ακόρεστη ζώνη του εδάφους. Επηρεάζει την δραστηριότητα των μικροοργανισμών, τη βλάστηση των σπόρων, την ανάπτυξη των ριζών και την κατανομή τους και τις χημικές και βιοχημικές αντιδράσεις στο έδαφος. Επειδή η θερμοκρασία μεταβάλλεται με το βάθος οι βιολογικές και χημικές αντιδράσεις επηρεάζονται ανάλογα με την κατανομή της.

Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν γίνει πολλές σημαντικές προσπάθειες για να περιγραφούν τόσο η ροή του νερού όσο και η θερμοκρασία μέσα στο έδαφος. Τα δύο φαινόμενα αντιμετωπίζονται ταυτόχρονα. Στα περισσότερα από τα μαθηματικά μοντέλα που περιγράφουν τη ροή του νερού, τη μεταφορά μάζας και τους μετασχηματισμούς του αζώτου και των φυτοφαρμάκων στο έδαφος υπό συνθήκες αγρού συμπεριλαμβάνεται και η περιγραφή της ροής θερμότητας. Τα μοντέλα WAVE (Vanclooster, 1994), SOIL (Jansson, 1998), SIMULAT (Diekkrueger et al. 1991), MACRO (Jarvis, 1994) είναι μεταξύ των πιο γνωστών μοντέλων της κατηγορίας αυτής. Τα τελευταία χρόνια ιδιαίτερη σημασία έχει αποκτήσει η περιγραφή της ροής θερμότητας στην ακόρεστη ζώνη του εδάφους μετά τη διαπίστωση της μεγάλης σημασίας που έχει η ζώνη αυτή ως ο συνδετικός κρίκος μεταξύ ατμόσφαιρας και υπόγειων νερών (Sung et al. 2002).

Στην εργασία επιλύεται η μονοδιάστατη εξίσωση μεταφοράς θερμότητας με αγωγή και συναγωγή, σε εδάφη μεταβαλλόμενης περιεχόμενης υγρασίας, λόγω ακόρεστων συνθηκών. Η επίλυση της εξίσωσης μεταφοράς της θερμότητας γίνεται με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Η επίλυση αυτή ενσωματώνεται και αποτελεί μέρος του μαθηματικού μοντέλου WANISIM προσομοίωσης της δυναμικής του νερού και του αζώτου στο έδαφος (Αντωνόπουλος, 1998). Το μοντέλο ελέγχεται για την ακρίβειά του με συγκρίσεις των αποτελεσμάτων με αναλυτικές λύσεις και με μετρήσεις της θερμοκρασίας σε πειραματικό αγρό.

2. ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Η μονοδιάστατη κατακόρυφη ροή του νερού σε ένα κορεσμένο-ακόρεστο έδαφος, με πρόσληψη νερού από τις ρίζες των φυτών, περιγράφεται από την εξίσωση του Richards (Αντωνόπουλος, 1998, 1999α):

$$C_h \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left(K(h)\frac{\partial h}{\partial z} - K(h) \right) \pm S_W \qquad (1)$$

όπου h είναι το ύψος πίεσης (cm), K είναι η υδραυλική αγωγιμότητα (cm/d), C_h είναι η υδραυλική χωρητικότητα του εδάφους (1/d), S_w είναι ο όρος για την πρόσληψη νερού από τις ρίζες (1/d), z είναι η κατακόρυφη απόσταση (θετική προς τα κάτω) και t ο χρόνος. Η πρόσληψη του νερού από τα φυτά, περιγράφεται από την εξίσωση των Belmans et al. (1983).

$$S_w(z,h) = \alpha(h)S_{max}(z) \quad (2)$$

όπου $S_{max}(z)$ είναι η κατανομή της μέγιστης πρόσληψης νερού από τα φυτά με το βάθος του ριζοστρώματος, α(h) είναι μια παράμετρος που εξαρτάται από το ύψος πιέσεως και καθορίζει τη δυσκολία πρόσληψης του νερού από το ριζικό σύστημα. Ο περιορισμός για την πρόσληψη του νερού είναι η δυναμική διαπνοή (T_p) που εκφράζεται από τη σχέση

$$\int_o^d S_w(h,z)dz \le T_p \quad (3)$$

όπου d είναι το βάθος του ριζοστρώματος.

Η ροή θερμότητας στην ακόρεστη ζώνη του εδάφους αποτελείται από το άθροισμα της ροής με αγωγή (conduction) και συναγωγή (convection) και εκφράζεται από τη μονοδιάστατη διαφορική εξίσωση της μορφής :

$$C_s(\theta)\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda(\theta)\frac{\partial T}{\partial z}\right) - C_w q\frac{\partial T}{\partial z} \quad (4)$$

όπου T είναι η θερμοκρασία του εδάφους (^oC), λ(θ) είναι η φαινομενική θερμική αγωγιμότητα του εδάφους (W/m-^{o}K), $C_s(\theta)$ και C_w είναι οι κατ' όγκο θερμοχωρητικότητες (J/m^3-^{o}K) του πορώδους μέσου και της υγρής φάσης, αντίστοιχα και q είναι η ταχύτητα Darcy (m/d). Ο πρώτος όρος στο δεξιό μέρος της εξίσωσης εκφράζει τη ροή θερμότητας με αγωγή και ο δεύτερος όρος τη θερμότητα που μεταφέρεται με την κίνηση του νερού.

Η κατ' όγκο θερμοχωρητικότητα $C_s(\theta)$ εκτιμάται από τη σχέση (De Vries, 1963):

$$C_s = (1-\theta_s)x1.92\times10^6 + 4.18\times10^6\theta \quad (5)$$

όπου θ_s είναι η εδαφική υγρασία στον κορεσμό (cm^3/cm^3) και θ είναι η εδαφική υγρασία (cm^3/cm^3).

Η φαινομενική θερμική αγωγιμότητα του εδάφους λ(θ) εκτιμάται ως συνάρτηση της εδαφικής υγρασίας από την εξίσωση (Horton and Chung, 1991):

$$\lambda=\beta_1+\beta_2\theta+\beta_3\theta^{0.5} \quad (6)$$

όπου β_1, β_2 και β_3 εμπειρικές παράμετροι που καθορίζονται για τους τρεις βασικούς τύπους εδαφών (ελαφρύ, μέσο ή βαρύ).

Οι οριακές συνθήκες καθορίζονται με τη βοήθεια των εξισώσεων

$$T(0,t) = \left(\frac{T_{max}+T_{min}}{2}\right) + \left[\left(\frac{T_{max}-T_{min}}{2}\right)\cos\left(2\pi\left(\frac{t^*-15}{24}\right)\right)\right] \quad (7)$$

T(d,t)=

$$\left(\frac{T_{\alpha max}+T_{\alpha min}}{2}\right) + \left[\left(\frac{T_{\alpha max}-T_{\alpha min}}{2}\right)\exp\left(-\frac{z}{D_\alpha}\right)\cos\left(2\pi\left(\frac{t^*-15}{24}\right)-\left(\frac{z}{D_\alpha}\right)\right)\right] \quad (8)$$

όπου T_{max} και T_{min} είναι η μέγιστη και ελάχιστη ημερήσια θερμοκρασία αέρα, και $T_{\alpha max}$ και $T_{\alpha min}$ είναι η μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία των μηνιαίων τιμών, D_α είναι το βάθος μετριασμού και t^* είναι ο χρόνος κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Η επίλυση των διαφορικών εξισώσεων (1) και (4) γίνεται με τη μέθοδο των

πεπερασμένων στοιχείων (Antonopoulos, 1999α). Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, η εξαρτημένη μεταβλητή κάθε εξίσωσης (y=h,T) προσεγγίζεται με μία πεπερασμένη σειρά ως συνάρτηση των κομβικών τιμών της εξαρτημένης μεταβλητής και των συναρτήσεων μορφής. Η ελαχιστοποίηση των αποκλίσεων μεταξύ προσεγγιστικής και ακριβούς λύσης γίνεται με τη βοήθεια του κριτηρίου Galerkin. Η προσέγγιση των χρονικών παραγώγων γίνεται με μία δεύτερης τάξης προσέγγιση στο χρόνο (τύπου Crank-Nicolson), που τελικά οδηγεί σε αλγεβρικά συστήματα με τριδιαγωνικά μητρώα των συντελεστών των αγνώστων, που λύνονται με τις μεθόδους της αριθμητικής ανάλυσης.

3. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Το μαθηματικό μοντέλο χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της εδαφικής υγρασίας και της θερμοκρασίας σε έναν αδιατάρακτο αγρό με ryegrass στο Acklington της Αγγλίας (Antonopoulos and Wyseure, 1998, Αντωνόπουλος, 1999β). Το έδαφος αποτελείται από ορίζοντες αργιλοπηλώδους εδάφους (clay loam). Οι συναρτήσεις της χαρακτηριστικής καμπύλης θ(h), για κάθε στρώση προσδιορίστηκαν από πειραματικά δεδομένα τιμών της εδαφικής υγρασίας και του ύψους πίεσης, στα οποία προσαρμόστηκαν οι συναρτήσεις θ(h) του 'van Genuchten' [Van Genuchten, 1980]. Για τη συνάρτηση της υδραυλικής αγωγιμότητας K(h) χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο του Gardner (1958). Η υδραυλική αγωγιμότητα κορεσμού προσδιορίστηκε από δεδομένα διήθησης και οι παράμετροι του μοντέλου Gardner από pedotransfer functions (Αντωνόπουλος, 1999α). Οι παράμετροι των συναρτήσεων θ(h) και K(h) για κάθε στρώση του εδάφους δίνονται στον πίνακα 1. Κατά την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν τα ημερήσια μετεωρολογικά δεδομένα και οι ημερήσιες τιμές της θερμοκρασίας του εδάφους σε διάφορα βάθη, της ίδιας χρονικής περιόδου, του μετεωρολογικού σταθμού του Acklington.

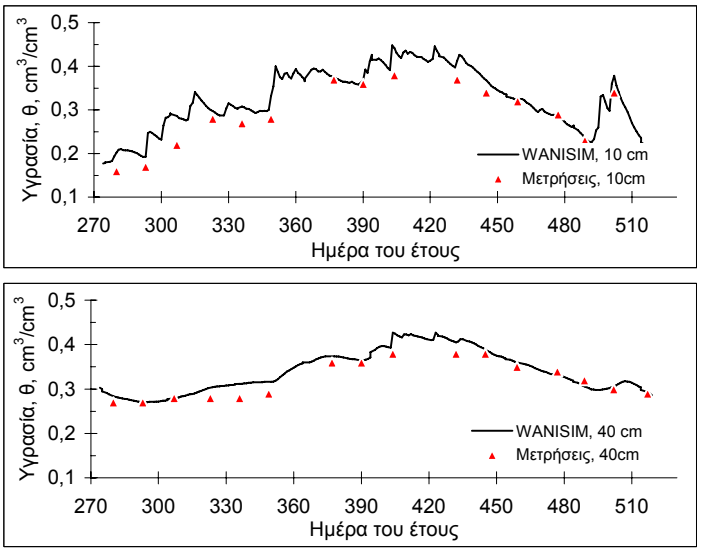
Πίνακας 1. Παράμετροι της χαρακτηριστικής καμπύλης και υδραυλικής αγωγιμότητας στις στρώσεις του αργιλοπηλώδους εδάφους*.

Βάθος (cm)	ρ Mg/m^3	θ_r cm^3/cm^3	θ_s cm^3/cm^3	α 1/cm	n	m	Ks cm/d	B	λ
0-5	1.2	0.15	0.47	0.00267	0.714	1.0	27	0.89	1.51
5-15	1.2	0.15	0.47	0.00267	0.714	1.0	27	0.89	1.51
15-30	1.2	0.18	0.47	0.00267	0.714	1.0	27	0.89	1.51
30-50	1.5	0.24	0.44	0.00267	0.714	1.0	15	0.89	1.51
50-100	1.5	0.27	0.44	0.00339	0.667	1.0	5	0.89	1.51

* Van Genuchten model: $\theta(h)= \theta_r +(\theta_s - \theta_r)/[1+(a|h|)^n]^m$,

Gardner model: $K(h)=K_s/[1+(Bh)^\lambda]$

Τα αποτελέσματα της περιεχόμενης εδαφικής υγρασίας συγκρίθηκαν με τις μετρήσεις στο εδαφικό προφιλ. Στο Σχήμα 1 παρουσιάζονται οι υπολογισμένες και οι μετρημένες τιμές της εδαφικής υγρασίας στα 10 και 40 cm κατά τη διάρκεια της περιόδου προσομοίωσης. Από το σχήμα προκύπτει ότι αν και υπάρχει η τάση να περιγράφεται η διακύμανση της εδαφικής υγρασίας και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης να βρίσκονται πολύ κοντά στις μετρήσεις, το μοντέλο προβλέπει μεγαλύτερες τιμές για την υγρασία στο επιφανειακό στρώμα εδάφους (0-30 cm) κατά την υγρή περίοδο του χειμώνα. Υπάρχει πολύ καλή συμφωνία αποτελεσμάτων και μετρήσεων στα βαθύτερα στρώματα του εδάφους (>30 cm). Μια πιθανή εξήγηση για αυτές τις αποκλίσεις είναι η παρουσία μακροπόρων, η ροή δια μέσου των οποίων δεν περιλαμβάνεται στο μοντέλο.



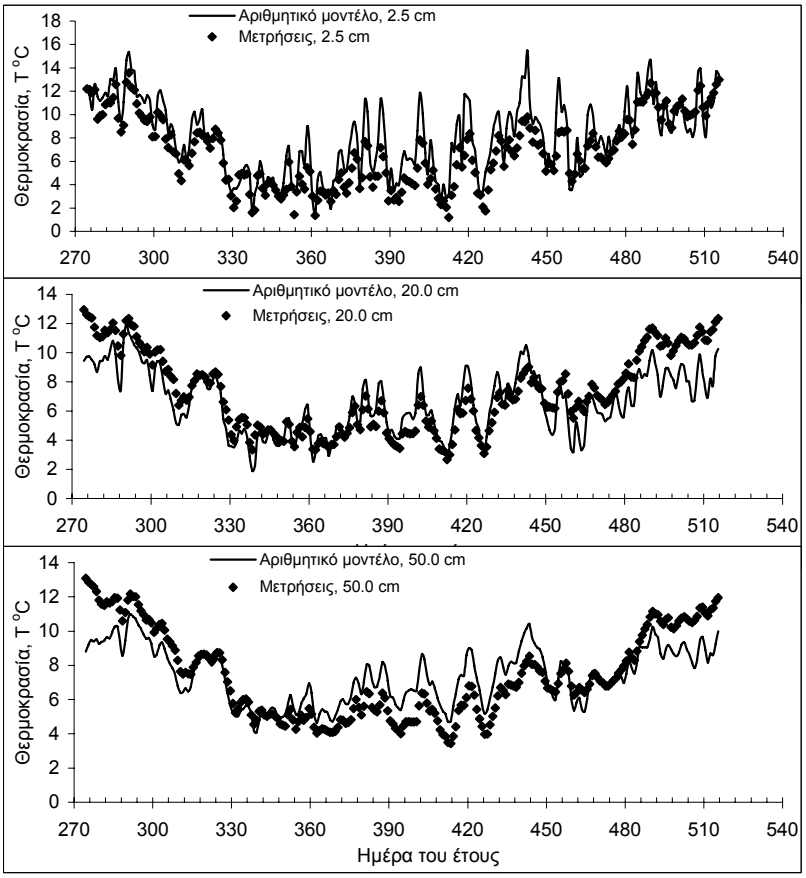
Σχήμα 1. Σύγκριση των υπολογισμένων και μετρημένων τιμών της εδαφικής υγρασίας στα βάθη α) 10 και β) 40 cm στο έδαφος.

Στο Σχήμα 2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και συγκρίνονται με τις μετρήσεις που αφορούν την κατανομή της θερμοκρασίας σε τρία διαφορετικά βάθη (2.5, 20 και 50 cm) κατά τη διάρκεια της περιόδου προσομοίωσης.

Από τα σχήματα προκύπτει ότι η διακύμανση της θερμοκρασίας των επιφανειακών στρωμάτων είναι πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με την αντίστοιχη των κατώτερων εδαφικών στρώσεων. Ειδικότερα στο βάθος των 2.5 cm, το θερμομετρικό εύρος είναι 14 ^{o}C, στο βάθος των 20 cm ελαττώνεται στους 10 ^{o}C και στο βάθος των 50 cm ελαττώνεται ακόμη περισσότερο και φτάνει τους 7 ^{o}C. Ακόμη παρατηρείται ότι στη διάρκεια του χειμώνα, η μέση θερμοκρασία των βαθύτερων στρωμάτων είναι μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία των στρωμάτων που βρίσκονται σε μικρότερα βάθη. Αυτό σημαίνει ότι κατά τη

διάρκεια του χειμώνα η μεταφορά θερμότητας γίνεται από τα βαθύτερα στρώματα προς την επιφάνεια του εδάφους, ενώ κατά τους θερινούς μήνες συμβαίνει το αντίθετο.

Από τη σύγκριση των μετρημένων και υπολογισμένων τιμών της θερμοκρασίας (Σχ. 2), προκύπτει ότι το μοντέλο περιγράφει ικανοποιητικά την πραγματικότητα. Η αξιολόγηση του μοντέλου και ο έλεγχος της αξιοπιστίας του γίνεται με τη βοήθεια στατιστικών μεθόδων. Τα στατιστικά κριτήρια που χρησιμοποιούνται είναι το τυπικό σφάλμα (root mean square, RMS), το σφάλμα του τετραγώνου των αποκλίσεων (root mean square error, RMSE), η αποδοτικότητα του μοντέλου (model efficiency, EF) και ο συντελεστής ελλείμματος μάζας (coefficient of residual mass, CRM) (Antonopoulos, 2001). Στον Πίνακα 2 δίνονται οι τιμές των στατιστικών αυτών κριτηρίων μεταξύ μετρημένων και υπολογισμένων τιμών της θερμοκρασίας για τα τρία διαφορετικά βάθη.



Σχήμα 2. Σύγκριση των υπολογισμένων και μετρημένων τιμών της θερμοκρασίας εδάφους στα βάθη α) 2.5, β) 20 και γ) 50 cm.

Πίνακας 2. Τιμές στατιστικών κριτηρίων μεταξύ των μετρήσεων και των υπολογισμένων τιμών της θερμοκρασίας για τα βάθη των 2.5, 20 και 50 cm.

Κριτήριο \ Βάθος	2.5 cm	20 cm	50 cm
RMS	1.80	1.47	1.41
RMSE	26.22	20.41	19.02
EF	0.9997	0.9998	0.9998
CRM	-0.19	0.07	-0.01

Οι αρνητικές τιμές του CRM δείχνουν μία γενική υπερεκτίμηση από το μοντέλο, όπως εξάλλου φαίνεται και από το Σχήμα 2, στα βάθη των 2.5 και των 50 cm. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο ότι η θερμοκρασία στην επιφάνεια του εδάφους, όπως και στο κάτω όριο, θεωρείται συνάρτηση μόνο της θερμοκρασίας του αέρα και δεν λαμβάνεται υπόψη η επίδραση των υπολοίπων μετεωρολογικών παραγόντων. Το μοντέλο περιγράφει καλύτερα και προβλέπει με μεγαλύτερη ακρίβεια τις τιμές της θερμοκρασίας στα κατώτερα στρώματα του εδάφους. Οι μεγαλύτερες αποκλίσεις που παρατηρούνται μεταξύ των μετρημένων και των υπολογισμένων τιμών στην επιφάνεια του εδάφους οφείλονται μάλλον στον μη ακριβή καθορισμό της πάνω οριακής συνθήκης. Γενικότερα, οι αποκλίσεις που παρατηρούνται μπορεί να οφείλονται στη μη ακριβή εκτίμηση των παραμέτρων, όπως του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, εξαιτίας της έλλειψης πειραματικών εδαφολογικών δεδομένων και στο ότι τόσο οι μετρημένες όσο και οι υπολογισμένες τιμές της θερμοκρασίας του εδάφους στα τρία βάθη δεν αποτελούν μάλλον μέσες ημερήσιες τιμές αλλά αντιπροσωπεύουν τη θερμοκρασία του εδάφους σε μία δεδομένη χρονική στιγμή η οποία μπορεί να είναι διαφορετική για τις μετρημένες και διαφορετική για τις υπολογισμένες τιμές.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το μαθηματικό μοντέλο WANISIM που περιγράφει τη ροή του εδαφικού νερού, τη μεταφορά μάζας των ανόργανων μορφών του αζώτου και τους μετασχηματισμούς τους σε συνθήκες αγρού επεκτάθηκε για να περιλάβει το υπομοντέλο της ροής θερμότητας στο έδαφος. Οι εξισώσεις του Richards και μεταφοράς μάζας αζώτου και θερμότητας επιλύονται με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Η οριακή συνθήκη της εξίσωσης θερμότητας στην επιφάνεια του εδάφους αντιμετωπίζεται με μία τριγωνομετρική συνάρτηση της ημερήσιας διακύμανσης της θερμοκρασίας που λαμβάνει υπόψη τη μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία της ημέρας στην επιφάνεια του εδάφους. Μία παρόμοια εξίσωση χρησιμοποιείται και για την κατάντη οριακή συνθήκη.

Η εφαρμογή του μοντέλου έγινε σε ένα αδιατάρακτο έδαφος της περιοχής του Acklington της Αγγλίας για τα έτη 1989 και 1990. Ο έλεγχος της ακρίβειας, της εφαρμοσιμότητας καθώς και η επιβεβαίωση του μαθηματικού μοντέλου πραγματοποιήθηκε με τη σύγκριση των αποτελεσμάτων του, ως προς τη διακύμανση της εδαφικής υγρασίας και της θερμοκρασίας σε διαφορετικά βάθη και κατά τη διάρκεια της περιόδου της προσομοίωσης, με αντίστοιχες

μετρημένες τιμές. Επίσης χρησιμοποιήθηκαν τα στατιστικά κριτήρια του τυπικού σφάλματος, του σφάλματος του τετραγώνου των αποκλίσεων, του συντελεστή αποδοτικότητας και του συντελεστή ελλείμματος μάζας. Οι τιμές των κριτηρίων αυτών δείχνουν ικανοποιητική προσέγγιση της διακύμανσης της εδαφικής υγρασίας και της θερμοκρασίας εδάφους.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1 Αντωνόπουλος Β.Ζ., 1999α. *Υδρολογία της Ακόρεστης Ζώνης του Εδάφους*. Έκδοση της Υπηρεσίας Δημοσιευμάτων Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, σελ. 270.

2. Αντωνόπουλος Β.Ζ., 1999β. Ισοζύγιο νερού σε αποκατεστημένο, μετά την εξόρυξη άνθρακα, έδαφος με το μοντέλο WANISIM. *Τεχνικά Χρονικά*, Επιστημονική έκδοση ΤΕΕ, Ι, τεύχος 1-2, σελ.: 75-85.
3. Αντωνόπουλος, Β., 1998. *WANISIM-Μονοδιάστατο μοντέλο προσομοίωσης της δυναμικής του νερού και του αζώτου στο έδαφος*, Τμήμα Γεωπονίας Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, Μονογραφία, σελ 80.
4. Antonopoulos, V., 2001. Simulation of water and nitrogen balances of irrigated and fertilized corn-crop soil. *J. Irrig. and Drain. Engng*., ASCE 127 (2), 77 - 83.
5. Antonopoulos V. Z. and G. C. L. Wyseure, 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. Belmans, C., Wesseling, J. G., and Feddes, R. A. 1983. Simulation model of the water balance of a cropped soil: SWATRE. *J. Hydro*., Amsterdam, 63, 271-286.
7. De Vries, D. A., 1963. *Thermal properties in soils*. In Physics of Plant Environment. John Wiley and Sons, New York.
8. Diekkrueger B., O. Richter and P. Noertershaeuser, 1991. *SIMULAT: transport of water and heat in soils*. Modeling of Geo – Biosphere, Processes 1.
9. Gardner, W.R., 1958. Some steady state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application from a water table. *Soil Science*, 85: 228-232.
10. Horton R. and S.O. Chung, 1991. *Soil heat flow*. In Modeling plant and soil systems. Agronomy Monograph no. 31, ASA-CSSA-SSSA, Madison, pp 397-438.
11. Jansson, P.-E., 1998. *Simulation model for soil water and heat conditions*. Tech. rep., Departement of Soil Sciences, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Sweeden.
12. Jarvis, N., 1994. *The MACRO Model* (Version 3.1) Technical description and samples simulations. Depart. of Soil Sciences, Report and Dissertations No 19, Uppsala, Sweeden.
13. Sung, K., C.M. Yavuz and M.C. Drew, 2002. Heat and mass transfer in the vadose zone with plants roots*, J. of Contaminant Hydrology*, 57: 99-127.
14. Vanclooster, M., Viaene, P., Diels, J., and Christiaens, K. 1994. *WAVE: A mathematical model for simulating water and agrochemicals in the soil and Vadose enviroment-reference* and user's manual (release 2.0). Institute for Land and Water Management, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium.
15. Van Genuchten M.Th., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils*. Soil Sci. Soc. Am. J*., 44: 892-898.

ΜΕΛΕΤΗ ΕΝΟΣ ΕΚΘΕΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΛΗΨΗΣ ΝΕΡΟΥ ΑΠΟ ΤΟ ΡΙΖΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΤΩΝ ΦΥΤΩΝ

Χ. Γεωργούσης και Χ. Μπαμπατζιμόπουλος
Τομέας Εγγείων Βελτιώσεων, Εδαφολογίας και Γεωργικής Μηχανικής
Εργαστήριο Γενικής και Γεωργικής Υδραυλικής και Βελτιώσεων, Τμήμα Γεωπονίας, Α.Π.Θ.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία το μοντέλο πρόσληψης νερού από το ριζικό σύστημα των φυτών, των Li et al. (2001), το οποίο λαμβάνει υπόψη του την κατανομή των ριζών στο ριζόστρωμα, συγκρίνεται με τα ήδη γνωστά μοντέλα των Feddes et al. (1978) και Prasad (1988). Η συγκριτική αξιολόγηση πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του μοντέλου SWBACROS και πειραματικά δεδομένα που αφορούσαν μια καλλιέργεια βαμβακιού στη Σίνδο Θεσ/νίκης. Από τα αποτελέσματα προκύπτει πως με τα συγκεκριμένα δεδομένα, το εκθετικό μοντέλο είναι ισοδύναμο αυτού του Feddes, ενώ απαιτεί περισσότερες πληροφορίες σχετικά με το ριζικό σύστημα των καλλιεργειών. Συνεπώς η επιλογή μοντέλου πρόσληψης νερού από το ριζικό σύστημα των φυτών πρέπει να γίνεται με προσοχή

Λέξεις κλειδιά: πρόσληψη νερού, ριζικό σύστημα, εκθετικό μοντέλο, βαμβάκι, SWBACROS

STUDY OF AN EXPONENTIAL ROOT–WATER–UPTAKE MODEL

H. Georgoussis and Ch. Babajimopoulos
Department of Hydraulics, Soil Science and Agricultural Engineering, School of Agriculture, Aristotle University, Thessaloniki 540 06, Greece

ABSTRACT

In this paper a recently presented by Li et al.(2001) exponential root water uptake model is compared to the well known models of Feddes et al. (1978) and Prasad (1988). For this reason the SWBACROS model is used to simulate the soil water balance of a cotton field in the area of Sindos. It is concluded that, under the existing data the exponential model is almost equivalent to the Feddes model. Since the exponential model requires difficult to obtain root density data its use should be examined very carefully.

Keywords: root water uptake, root density, exponential model, cotton, SWBACROS

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η προσομοίωση της κίνησης του νερού στην ακόρεστη ζώνη ενός καλλιεργούμενου εδάφους, απαιτεί μεταξύ άλλων την περιγραφή της διαδικασίας πρόσληψης του από το ριζικό σύστημα των φυτών (root water uptake). Για το λόγο αυτό, στη γνωστή εξίσωση Richards (Richards, 1931) εισάγεται ένας όρος πρόσληψης (sink term) S:

$$C(h)\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left[K(h)\left(\frac{\partial h}{\partial z} - 1\right)\right] - S(h,z) \tag{1}$$

Στην εξίσωση αυτή πέραν του όρου S, h είναι το ύψος πίεσης, t ο χρόνος, C(h) η υδραυλική χωρητικότητα του εδάφους, z η κατακόρυφη συντεταγμένη με θετική φορά προς τα κάτω και K(h) η ακόρεστη υδραυλική αγωγιμότητα.

Ο όρος πρόσληψης αποτελεί συνάρτηση πληθώρας παραγόντων, όπως το είδος, η ποικιλία και η φυσιολογία του φυτού, η μηχανική σύσταση του εδάφους, το υγρασιακό καθεστώς του ριζοστρώματος κ.α.

Η διαδικασία της πρόσληψης νερού από το φυτό, είναι αρκετά σύνθετη και για τη διερεύνηση της ακολουθούνται δυο διαφορετικές προσεγγίσεις από τους ερευνητές.

Η «**μικροσκοπική**» προσέγγιση επικεντρώνεται στη μελέτη της ακτινικής ροής του νερού γύρω από μια υποθετική ρίζα κυλινδρικής μορφής. Η εφαρμογή αυτής της προσέγγισης σε συνθήκες αγρού είναι εξαιρετικά δύσκολη, καθώς απαιτεί εξειδικευμένο εξοπλισμό, εξειδικευμένο προσωπικό, χρονοβόρο πειραματισμό και υψηλά χρηματικά ποσά.

Η «**μακροσκοπική**» προσέγγιση από την άλλη μεριά, εξετάζει την πρόσληψη του νερού από ένα ορισμένο όγκο εδάφους, χωρίς να λαμβάνει υπόψη τη δράση των επιμέρους ριζών. Η μακροσκοπική προσέγγιση είναι καταλληλότερη για την ενσωμάτωσή της σε μαθηματικά μοντέλα και τυγχάνει ευρείας χρήσης.

Η ποσότητα του νερού που θα προσληφθεί από το ριζικό σύστημα του φυτού, θα εγκαταλείψει το ριζόστρωμα μέσω της διαδικασίας της διαπνοής. Έτσι λοιπόν ο μέγιστος ρυθμός πρόσληψης (S_{max}) από το σύνολο του ριζικού συστήματος (που εκτείνεται σε βάθος L) θεωρείται ίσος με τη δυναμική διαπνοή (potential transpiration – T_p):

$$\int_0^L S_{\max}(z)\, dz = T_p \tag{2}$$

Η πραγματική ποσότητα νερού που προσλαμβάνεται (S) είναι ένα ποσοστό του S_{max}:

$$S(h,z) = \alpha(h) S_{\max}(z) \tag{3}$$

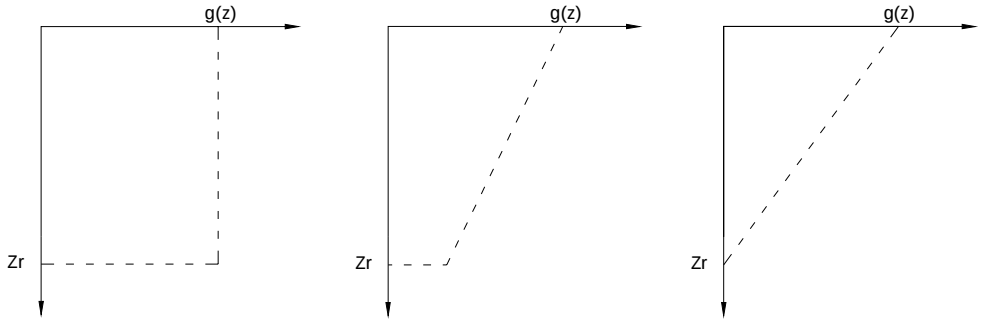
Ο όρος S_{max} εξαρτάται και από την κατανομή του ριζικού συστήματος στο έδαφος που εκφράζεται με τον όρο g(z) (Αντωνόπουλος, 1999):

$$S_{\max}(z) = T_p\, g(z) \text{ όπου } \int_0^L g(z)\, dz = 1 \tag{4}$$

Έτσι, η τελική μαθηματική έκφραση που περιγράφει την πρόσληψη του νερού από το ριζικό σύστημα των φυτών είναι η ακόλουθη (Αντωνόπουλος, 1999):

$$S(h,z) = \alpha(h) S_{\max}(z) = \alpha(h) T_p\, g(z) \tag{5}$$

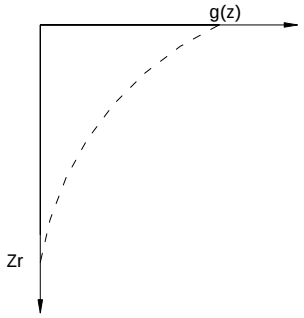
Οι γνωστότερες και ευρύτερα χρησιμοποιούμενες κατανομές των ριζών, είναι αυτές των Feddes et al. (1978), Hoogland and Belmans (1981) και Prasad (1988) (Σχήμα 1, α, β, γ αντίστοιχα).



(α) (β) (γ)

Σχήμα 1: Προταθείσες κατανομές ριζών από τους (α) Feddes et al. (1978), (β) Hoogland and Belmans (1981) και (γ) Prasad (1988).

Οι κατανομές αυτές των ριζών, μόνο ως απλουστευμένες μπορούν να χαρακτηριστούν. Πολλοί ερευνητές βρίσκουν πιο ρεαλιστικές τις προσεγγίσεις που θεωρούν μια εκθετική κατανομή των ριζών στο ριζόστρωμα (π.χ. Dwyer et al., 1988 ; Li et al., 1999 ; Lai and Katul, 2000). Βασιζόμενοι σε μετρημένες κατανομές του ριζικού συστήματος των Dwyer et al. (1988), οι Li et al. (1999) προτείνουν ένα νέο μοντέλο (Σχήμα 2) η μορφή του οποίου, είναι εκθετική.



Σχήμα 2:Θεωρητική εκθετική κατανομή ριζών

Παρά το γεγονός ότι κάθε ένα από τα παραπάνω προτεινόμενα μοντέλα (Feddes et al., 1978 ; Hoogland and Belmans, 1981 ; Prasad, 1988) κατανέμει τη δυναμική διαπνοή στο εδαφικό προφίλ με διαφορετικό τρόπο, κανενός η φιλοσοφία δεν επιτρέπει την πρόσληψη νερού από άλλες υγρότερες στρώσεις, όταν κάποια στρώση εμφανίζει έλλειψη νερού. Σε διάφορες όμως (Arya et al., 1975α ; Arya et al., 1975β ; Nnyamah and Black, 1977) έχει παρατηρηθεί μια τάση των φυτών να ικανοποιούν τις ανάγκες τους σε νερό, προσλαμβάνοντας νερό από βαθύτερες και υγρότερες εδαφικές στρώσεις, όταν οι επιφανειακές στερούνται επαρκούς υγρασίας.

2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΕΚΘΕΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Με σκοπό να περιγράψουν και αυτό το φαινόμενο, οι Li et al. (2001) τροποποιούν το μοντέλο που παρουσίασαν το 1999, διατηρώντας όμως την εκθετική μορφή του. Έτσι, προτείνουν τον ακόλουθο όρο, για να περιγράψουν την πρόσληψη του εδαφικού νερού από το ριζικό σύστημα του φυτού:

$$S_{\max} = \frac{\alpha_i F_i^{\lambda} T_p}{\Delta z_i \sum_{i=1}^{n} \alpha_i F_i^{\lambda}} \xrightarrow{S_i(h)=\alpha_i(h) S_{\max}} S_i = \frac{\alpha_i^2 F_i^{\lambda} T_p}{\Delta z_i \sum_{i=1}^{n} \alpha_i F_i^{\lambda}} \quad (6)$$

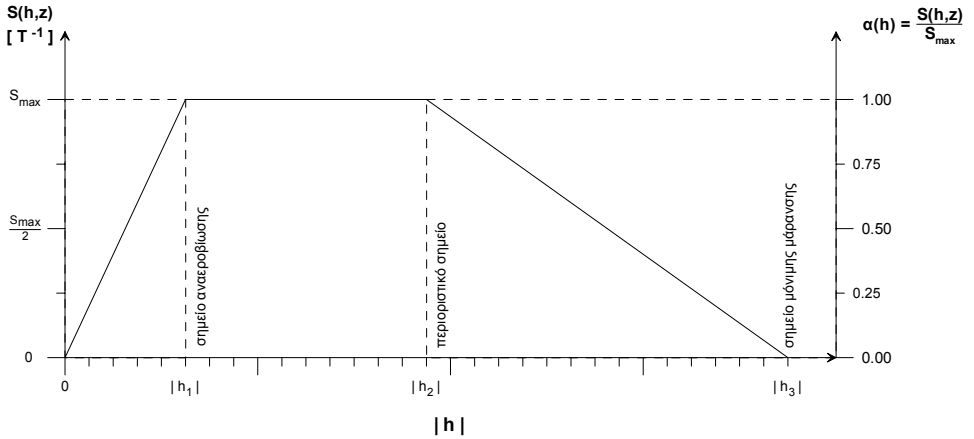
Οι παράμετροι που περιλαμβάνονται στην εξίσωση (6) είναι οι εξής:

S_i : πρόσληψη του νερού από τις ρίζες του φυτού στη στρώση i, $[T^{-1}]$

α_i : η αδιάστατη μεταβλητή του όρου πρόσληψης

F_i : το κλάσμα της πυκνότητας ριζικού συστήματος στη στρώση i, αδιάστατο
λ : μια παράμετρος προσαρμογής, αδιάστατο
T_p : δυναμική διαπνοή, $[LT^{-1}]$
Δz_i : το πάχος της στρώσης i, [L]

Η αδιάστατη μεταβλητή του όρου πρόσληψης α, μεταβάλλεται όπως στο Σχήμα 3:



Σχήμα 3: Η αδιάστατη μεταβλητή του όρου πρόσληψης α, σα συνάρτηση του ύψους πίεσης h.

Το κλάσμα της πυκνότητας του ριζικού συστήματος στη στρώση i, δίνεται από τη σχέση:

$$F_i = \frac{\ln\left[\left(1+e^{-bz_i}\right)/\left(1+e^{-bz_{i+1}}\right)\right] + \frac{1}{2}\left[e^{-bz_i} - e^{-bz_{i+1}}\right]}{\ln\left[2/\left(1+e^{-bz_r}\right)\right] + \frac{1}{2}\left[1-e^{-bz_r}\right]} \quad (7)$$

όπου: b : εμπειρική παράμετρος κατανομής ριζών $[L^{-1}]$
z_i : βάθος στο άνω όριο της κάθε στρώσης [L]
z_{i+1} : βάθος στο κάτω όριο της κάθε στρώσης [L]
z_r : το βάθος του ριζοστρώματος τη συγκεκριμένη ημέρα [L]

Η εμπειρική παράμετρος κατανομής ριζών b, υπολογίζεται από τη σχέση:

$$b = \frac{24.66\ F_{10}^{1.59}}{z_r} \quad (8)$$

όπου: F_{10} : το κλάσμα της πυκνότητας ριζικού συστήματος στο ανώτερο 10% του εδάφους
z_r : το βάθος του ριζοστρώματος τη συγκεκριμένη ημέρα

Με την εφαρμογή του εκθετικού αυτού μοντέλου, η πρόσληψη νερού από βαθύτερες εδαφικές στρώσεις όταν οι επιφανειακές είναι ξηρότερες, βρέθηκε (Li et al., 2001) να βελτιώνει την ακρίβεια προσομοίωσης του υγρασιακού περιεχομένου του εδάφους, ειδικότερα για τις στρώσεις με βάθος > 60cm.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι τόσο η διερεύνηση της ακρίβειας του μοντέλου των Li et al. (2001) στην περιγραφή της κίνησης του νερού στην ακόρεστη ζώνη του εδάφους, όσο και η σύγκρισή του με άλλα ευρέως χρησιμοποιούμενα, καλώς

τεκμηριωμένα μοντέλα όπως αυτά των Feddes (1978) και Prasad (1988). Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο SWBACROS (Babajimopoulos, 1995) στο οποίο ενσωματώθηκε το εκθετικό μοντέλο μαζί με τα μοντέλα των Feddes et al. και Prasad.

3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ

Η σύγκριση των μοντέλων έγινε με δεδομένα που συλλέχθηκαν στα πλαίσια ερευνητικού έργου που χρηματοδοτήθηκε από τη ΓΓΕΤ και εκπονήθηκε από το Εργαστήριο Γενικής και Γεωργικής Υδραυλικής και Βελτιώσεων και το Ινστιτούτο Εγγείων Βελτιώσεων σε αγρό καλλιεργούμενο με βαμβάκι (Μπαμπατζιμόπουλος, 1995 ; Babajimopoulos et al., 1996). Το έδαφος του αγρού στον οποίο έγινε η μελέτη αποτελείται από τρεις (3) στρώσεις: μια αργιλοπηλώδους σύστασης που εκτείνεται από 0-60cm, μια πηλώδους σύστασης μεταξύ 60-100cm και μια αμμοπηλώδους σύστασης από το βάθος των 100cm ως αυτό των 140cm.

Πίνακας 1: Μηχανική σύσταση και τιμές των υδραυλικών παραμέτρων των τριών στρώσεων του εδάφους του αγρού της εφαρμογής

Βάθος (cm)	Άμμος (%)	Ιλύς (%)	Άργιλος (%)	θ_s	θ_r	K_s (m/day)	α	n
0-60	24.7	39.0	36.3	0.434	0.049	0.2855	0.01155	1.1353
60-100	35.7	40.0	24.3	0.426	0.038	0.4230	0.01299	1.1926
100-140	59.7	28.4	11.8	0.421	0.025	0.5045	0.02972	1.2497

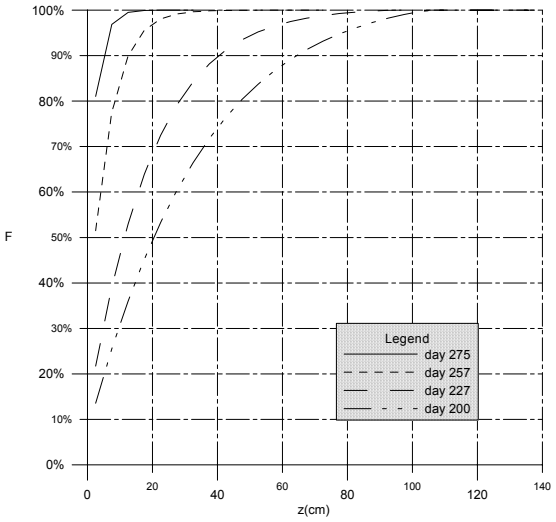
Η καταγραφή της εδαφικής υγρασίας γινόταν ανά τακτά χρονικά διαστήματα, σε διάφορα βάθη. Από τις μετρήσεις αυτές, λαμβανόταν η μέση τιμή για κάθε στρώση. Οι τιμές του ύψους πίεσης h_1, h_2 και h_3 του Σχήματος 3 ελήφθησαν ίσες με -1m, -6m και -150m αντίστοιχα. Για περισσότερες λεπτομέρειες πάνω στις τεχνικές μέτρησης των διαφόρων παραμέτρων, τα μετεωρολογικά και εδαφολογικά δεδομένα και τις καλλιεργητικές φροντίδες ο αναγνώστης παραπέμπεται στις παραπάνω αναφερόμενες εργασίες. Κατά την προσομοίωση λήφθηκε υπόψη ένα ποσοστό υδατοσυγκράτησης 10% και αποδοτικότητα άρδευσης με καταιονισμό 90%. Η μεταβολή της πυκνότητας του ριζικού συστήματος στο ανώτερο 10% του εδάφους με το χρόνο, προέκυψε από τον Σταυρίδη (1976) ο οποίος μελέτησε την ανάπτυξη του ριζικού συστήματος ζαχαρότευτλων, αραβοσίτου και βαμβακιού σε ποικιλία εδαφών της πεδιάδας Θεσ/νίκης. Η μεταβολή της πυκνότητας, βρέθηκε ότι μπορεί να περιγραφεί από τη σχέση:

$$F_{10}(t) = \begin{cases} 1 & 133 \le t \le 165 \\ 1.4318601 - 0.00001578185\ t^2 & 165 < t < 268 \\ 0.2956 & 268 \le t \end{cases}$$

όπου t ο χρόνος εκφρασμένος σε ημέρες μετά την 1η Ιανουαρίου 1994. Η περίοδος της προσομοίωσης αφορούσε το χρονικό διάστημα από την 13η Μαΐου 1994 (ημέρα 133) ως την 6η Οκτωβρίου 1994 (ημέρα 279)

4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η μεταβολή της πυκνότητας του ριζικού συστήματος με το βάθος, όπως αυτή περιγράφεται από τη σχέση (7) παρουσιάζεται για τέσσερις ενδεικτικές ημέρες, στο Σχήμα 4:

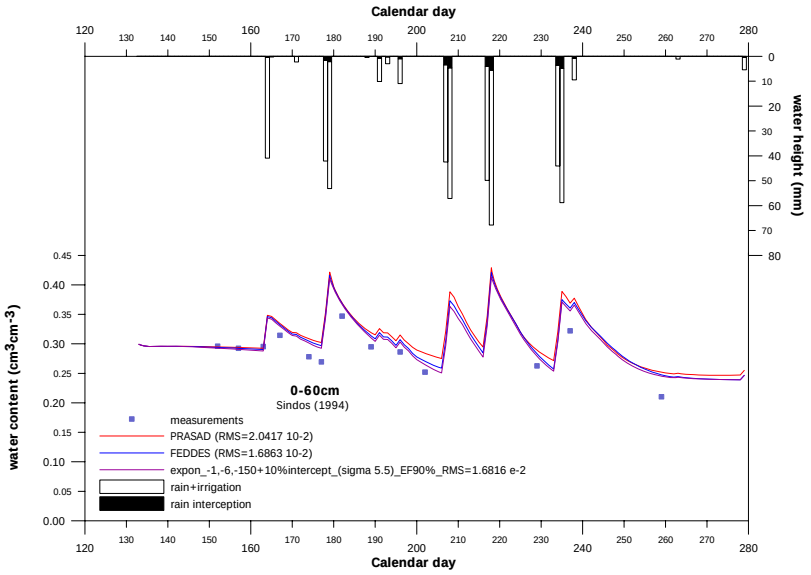


Σχήμα 4: Μεταβολή της αθροιστικής πυκνότητας του ριζικού συστήματος με το βάθος, σύμφωνα με τους Li et al. (2001)

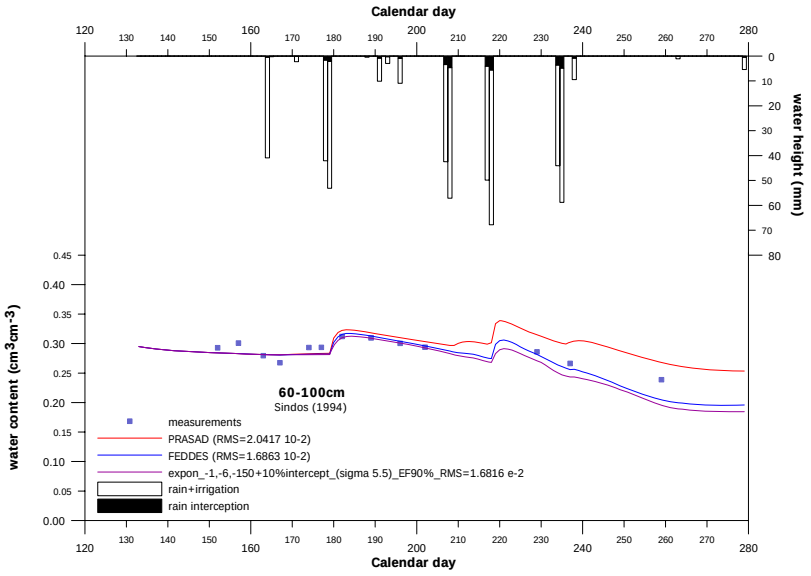
Στα Σχήματα 5(α), 5(β) και 5(γ): παρουσιάζονται οι προβλεπόμενες τιμές της εδαφικής υγρασίας στις τρεις εδαφικές στρώσεις του εδάφους, χρησιμοποιώντας τις τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις για την πρόσληψη του νερού από τα ριζικό σύστημα του φυτού. Η σύγκριση μεταξύ των τριών μοντέλων, έγινε χρησιμοποιώντας το τυπικό σφάλμα:

$$RMS = 100\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\frac{\left(P_i - O_i\right)^2}{n}}$$

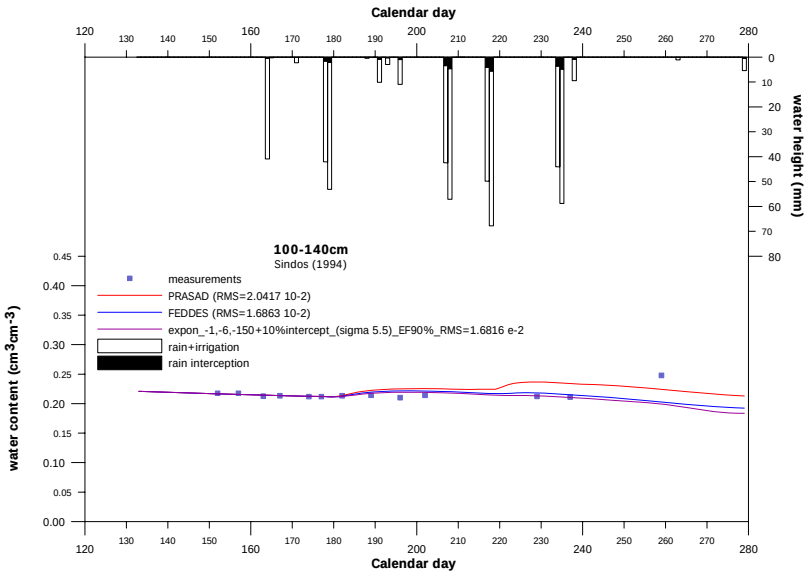
όπου: P_i: οι προσομοιωμένες τιμές υγρασίας
O_i: οι μετρημένες τιμές υγρασίας
n: το πλήθος των μετρημένων τιμών



5(α)



5(β)



5(γ)

Σχήμα 5: Προσομοίωση της μεταβολής της εδαφικής υγρασίας με το χρόνο.

Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται οι τιμές του RMS για τις τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις. Όπως προκύπτει από τον πίνακα αυτό, το εκθετικό μοντέλο, παρά την πολυπλοκότητά του δεν προσφέρει ουσιαστική βελτίωση στις προβλεπόμενες τιμές της εδαφικής υγρασίας σε σχέση με το μοντέλο του Feddes. Ωστόσο τα δυο αυτά μοντέλα σαφώς υπερτερούν από το μοντέλο του Prasad (βελτίωση περίπου 17%).

Πίνακας 2: Τιμές τυπικού σφάλματος για τα μοντέλα Feddes et al. (1978), Prasad (1988) και το εκθετικό (Li et al., 2001)

Feddes	Prasad	Εκθετικό
$1.686\ 10^{-2}$	$2.042\ 10^{-2}$	$1.682\ 10^{-2}$

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή μελετήθηκε το εκθετικό μοντέλο των Li et al. (2001) και συγκρίθηκε με αυτά των Feddes et al. (1978) και Prasad (1988). Από τις συγκρίσεις των μοντέλων με τα συγκεκριμένα πειραματικά δεδομένα που είχαμε στη διάθεσή μας, προέκυψε ότι και τα τρία μοντέλα περιγράφουν πολύ ικανοποιητικά το υδατικό ισοζύγιο του εδάφους. Από αυτά, το εκθετικό μοντέλο φαίνεται πως δεν αποτελεί ουσιαστική βελτίωση έναντι αυτού του Feddes αλλά υπερέχει σαφέστερα (≈ 17%) του μοντέλου του Prasad.

Η επιλογή ενός μοντέλου πρόσληψης επαφίεται στον ερευνητή γεωπόνο, ο οποίος πρέπει να βρει τη χρυσή τομή μεταξύ του κόστους πειραματισμού και της επιθυμητής ακρίβειας. Έτσι όσον αφορά το εκθετικό μοντέλο, αυτό συνυπολογίζει την περιγραφή της κατανομής των ριζών του φυτού στο ριζόστρωμα. Όμως για τη βελτιωμένη αυτή περιγραφή, απαιτούνται εξειδικευμένα πειραματικά δεδομένα, η απόκτηση των οποίων μπορεί να επέλθει μέσα από κοπιαστική και υψηλού κόστους εργασία πεδίου. Στον αντίποδα, το μοντέλο των Feddes et al. (1978) συνδυάζει την πολύ καλή ακρίβεια, με τη χρήση δεδομένων που μπορούν να αποκτηθούν εύκολα. Το συμπέρασμα αυτό, είναι σε συμφωνία με αποτελέσματα άλλων μελετών πάνω στις σχέσεις πρόσληψης του νερού (Γούκος και Μπαμπατζιμόπουλος, 2000) όπου συγκρίθηκαν το μοντέλο του Feddes με πληθώρα άλλων μοντέλων.

Τέλος, θα πρέπει να τονιστεί ότι η αξιολόγηση του εκθετικού μοντέλου πρέπει να συνεχιστεί, με εφαρμογές σε άλλα είδη καλλιεργειών και σε άλλους τύπους εδαφών, καθώς με τα συγκεκριμένα πειραματικά δεδομένα δε φαίνεται να συμβαδίζει το ορθό θεωρητικό του υπόβαθρο με την απόδοσή του στην περιγραφή του υδατικού ισοζυγίου ενός καλλιεργούμενου εδάφους.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Αντωνόπουλος, Β., 1999. *Υδρολογία της ακόρεστης ζώνης του εδάφους*. Α.Π.Θ. Υπηρεσία Δημοσιευμάτων.
2. Arya, L.M., Blake, G.R., and Farell, D.A., 1975α. A field study of soil water depletion patterns in presence of growing soybean roots: II. Effect of plant growth on soil water pressure and water loss patterns, *Soil Sci. Soc. Am. Proc*. 39, 430-436.
3. Arya, L.M., Blake, G.R., and Farell, D.A., 1975β. A field study of soil water depletion patterns in presence of growing soybean roots: III. Rooting characteristics and root extraction of soil water, *Soil Sci. Soc. Am. Proc*. 39, 437-444.
4. Babajimopoulos, C., A. Budina and D. Kalfountzos, 1995. S.W.BA.CRO.S: A model for the estimation of the water balance of a cropped soil, *Environmental Software*, Vol. 10 (3): 211–220.

5. Babajimopoulos, C., A. Panoras, I. Mavroudis and G. Bilas, 1996. The computation of the water balance and the modeling of the irrigation schedule of a cotton crop with the model S.W.BA.CRO.S., *In: Blain W.R. (ed) Hydraulic engineering software VI. Proc. Of the 6th Intern. Conf. On hydraulic engineering software (HYDROSOFT 96), 10-12 Sept. Penang, Malaysia.*
6. Γούκος, Δ. και Μπαμπατζιμόπουλος Χ., 1999. Διερεύνηση των σχέσεων πρόσληψης του νερού από το ριζικό σύστημα με μοντέλα υπολογισμού του υδατικού ισοζυγίου καλλιεργούμενων εδαφών, *Πρακτικά 8ου Συνεδ., Ε.Υ.Ε.,* σελ. 459-467.
7. Dwyer, L.M., Stewart, D.W. and Balchin, D., 1988. Rooting characteristics of corn, soybeans and barley as a function of available water and soil characteristics, *Can. J. Soil Sci.*, 68: 121-132.
8. Feddes, R.A., Bresler, E. and Neuman, S.P., 1974. Filed test of a modified numerical model for water uptake by root systems, *Water Resour. Res*., 10: 1199-1206.
9. Feddes, R.A., Kowalik, P.J. and Zaradny, H., 1978. *Simulation of field water use and crop yield.*, PUDOC, Wageningen.
10. Gerwitz, A. and Page, E.R., 1974. An empirical mathematical model to describe plant root systems, *J. Appl. Ecol.*, 11: 773-780.
11. Hoogland, J.C. and Belmans C., 1981. Root water uptake model depending on soil water pressure head and maximum extraction rate, *Acta Horticulture*, 119: 123-136.
12. Lai, C. – T., Katul, G., 2000. The dynamic role of root-water uptake in coupling potential to actual transpiration, *Adv. Water Resour.* 23, 427-439.
13. Li, K. Y., Boisvert, J.B. and De Jong, R., 1999. An exponential root-water-uptake model, *Can. J. Soil Sci.*, 79: 333-343.
14. Li, K. Y., De Jong, R., and Boisvert, J.B. 2001. An exponential root-water-uptake model with water stress compensation, *J. of Hydrololgy.*, 252: 189-204.
15. Μπαμπατζιμόπουλος, Χ. (επιστημονικά υπεύθυνος), 1995. Τελική έκθεση του ερευνητικού προγράμματος: «Προγραμματισμός των αρδεύσεων με τη χρήση μαθηματικών μοντέλων». Γ.Γ.Ε.Τ., Θεσσαλονίκη.
16. Nnyamah, J.U., Black, T.A., 1977. Rates and patterns of water uptake in a Douglas-fir forest. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 41, 929-979.
17. Novak, V., 1987. Estimation of soil-water extraction patterns by roots, *Agric. Water Mgmt*, 12(3),pp 271-278.
18. Prasad, R., 1988. A linear root water uptake model, *J. of Hydrology*, 99: 297-306.
19. Richards, L.A., 1931. Capillary conduction of liquids through porous medium. *Physics*, 1: 318-333.
20. Σταυρίδης, Κ. 1976. Έκθεσις περατωθείσης ερευνητικής εργασίας υποπρογράμματος: Προσδιορισμός βάθους ριζικού συστήματος αρδευομένων καλλιεργειών ετών 1972-1975. *Σταθμός Εγγείων Βελτιώσεων, Σίνδος Θεσ/νίκης.*

ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΦΥΤΟΦΑΡΜΑΚΩΝ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥΣ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ

Κερκίδης Π., Ι. Αργυροκαστρίτης, W. O. Ochola

Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών
Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων & Γεωργικής Μηχανικής,
Τομέας Διαχείρισης Υδατικών Πόρων.
Ιερά Οδός 75, Αθήνα 118 55
e-mail: lhyd2kep@aua.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία δεχόμαστε ότι το φυτοφάρμακο, μπορεί να υπάρχει και στις τρεις φάσεις του εδαφικού συστήματος. Η αναλογία με την οποία το φυτοφάρμακο διαχωρίζεται στις τρεις φάσεις εξαρτάται τόσο από τις χημικές ιδιότητές του όσο και από χαρακτηριστικά του εδάφους. Θεωρώντας συνθήκες κατατομής υγρασίας σταθερής κατάστασης στο έδαφος, εξετάζονται υπό ορισμένες παραδοχές και προϋποθέσεις η πυκνότητα ροής και η συγκέντρωση του φυτοφαρμάκου στο έδαφος, καθώς και το ενδεχόμενο διαφυγής του προς την ατμόσφαιρα υπό μορφήν ατμών. Η δυνατότητα αποικοδόμησης του φυτοφαρμάκου ενσωματώνεται στο μοντέλο διασποράς με κινητική αντίδραση πρώτης τάξης.
Λέξεις κλειδιά: Φυτοφάρμακα, συγκέντρωση, πυκνότητα ροής, πτητικότητα, αποικοδόμηση.

BEHAVIOR OF AGROCHEMICHALS AFTER THEIR INCORPORATION INTO THE SOIL

P. Kerkides, I. Argyrokastritis, W. O. Ochola

Agricultural University of Athens
Dept. of Natural Resources Management and Agricultural Engineering
Sect. of Water Resources Management
75, Iera Odos, 118 55 Athens
e-mail: lhyd2kep@aua.gr

ABSTRACT

The agrochemical is assumed to partition into all three phases of the soil system, depending on its own characteristics as well as on the characteristics of the soil. For steady state flow regime, surface volatilization flux and the profile concentration are calculated. Possible degradation of the agrochemical is incorporated into the model by an exponentially decaying process with a constant rate.
Key-words: Agrochemicals, concentration, flux density, volatilization, degradation.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παραγωγή και προώθηση στην αγροτική αγορά φυτοφαρμάκων για διάφορες χρήσεις είναι διαρκώς αυξανόμενη (Chapman and Kimstach, 1996). Η οικολογική συνείδηση, που μέχρι πρότινος βρισκόταν σε χαμηλό βαθμό εγρήγορσης, έχει αρχίσει τελευταία να αφυπνίζεται για ευνόητους λόγους. Αναδεικνύεται, ως εκ τούτου το πρόβλημα της «κατάλληλης» επιλογής φυτοφαρμάκων που αφ' ενός μεν οφείλουν να είναι αποτελεσματικά στην εξειδικευμένη αποστολή τους και αφ' ετέρου να επιβαρύνουν, όσο γίνεται λιγότερο το περιβάλλον. Η επινόηση «ιδεατών» πειραμάτων με τη χρήση αριθμητικών προτύπων αποτελεί μιά πρώτη, απλή και γρήγορη λύση με την οποία εύκολα μπορεί κανείς να διαγνώσει τη σημασία των αλληλοεμπλεκομένων παραγόντων εδάφους, συνθηκών ροής, περιβάλλοντος και χαρακτηριστικών φυτοφαρμάκων στην όλη συμπεριφορά των ουσιών αυτών (Αγγελάκης, 1987; Αντωνόπουλος, 2000, 2001; Antonopoulos and Papazafiriou, 1990a, 1990b; Moutsopoulos et al., 2001). Η παραπέρα επιλεκτική εκτέλεση πειραμάτων αγρού θα είναι λιγότερης έκτασης και θα έχει στόχο την επικύρωση των προβλέψεων των θεωρητικών σχημάτων και παραδοχών, που αναπόφευκτα γίνονται για την επίτευξη λύσεων.

Τα χημικά παρασκευάσματα παρουσιάζουν διαφορετική συμπεριφορά ανάλογα με το έδαφος, τον τρόπο μηχανικής επεξεργασίας του, την παρουσία οργανικής ουσίας σ΄αυτό, αλλά είναι δυνατόν να επηρεάζονται σημαντικά και από το καθεστώς της κίνησης του νερού και την παρουσία μακροπόρων και προτιμητέων διαδρομών ροής (White R.E., 1985). Με τη μεταφορά των φυτοφαρμάκων, όπως π.χ. atrazine, metolaclor, bromide, metribuzin, alachlor κ.ά. έχουν ασχοληθεί πολλοί ερευνητές, όπως π.χ. οι Azevedo et al. (1996), Heatwole et al. (1997), Clay et al. (1998), Carmichael et al. (1999), Gaynor et al. (2000) κ. ά., ενώ οι Van den Berg et al. (1999) μελέτησαν τη συμπεριφορά καπνογόνων απολυμαντικών εδάφους με το μοντέλο PESTLA (Pesticide Leaching and Accumulation). Γενικά το θέμα της ορθολογικής –(οικολογικής) χρήσης των αγροχημικών εξακολουθεί να μελετάται από τους επιστήμονες κάτω από διάφορες οπτικές γωνίες.

Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται απλουστευμένα μοντέλα διασποράς χημικών ουσιών στο έδαφος, όπου η ουσία είναι δυνατόν να συνυπάρχει και στις τρείς φάσεις του εδαφικού συστήματος και συγχρόνως να αποικοδομείται με σταθερό ρυθμό. Έτσι, με την εφαρμογή των μοντέλων αυτών διερευνάται η συμπεριφορά ορισμένων χημικών παρασκευασμάτων με συγκεκριμένες ιδιότητες στο εδαφικό περιβάλλον που ορίζουν οι βοηθητικές συνθήκες της αναλυτικής λύσης.

2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Η γενική διαφορική εξίσωση που διέπει την κίνηση ενός φυτοφαρμάκου, με αποικοδόμηση στο έδαφος, είναι:

$$\frac{\partial C_T}{\partial t} + \frac{\partial J_s}{\partial z} + \mu C_T = 0 \qquad (1)$$

Οπου C_T =η ολική συγκέντρωση ενός φυτοφαρμάκου στο έδαφος (μάζα φυτοφαρμάκου ανά μονάδα όγκου εδάφους) , J_s=η συνολική πυκνότητα ροής του φυτοφαρμάκου (διαστάσεις: μάζα/(επιφάνεια·χρόνο)) που αποτελείται από τις συνιστώσες J_g και J_ℓ δηλ. τις πυκνότητες ροής στην αέρια και στην υγρή φάση, μ= σταθερά ρυθμού αποικοδόμησης του φυτοφαρμάκου $\left(T^{-1}\right)$ $\left(M(t) = M(o)\exp[-\mu t]\right)$. Έτσι έχουμε :

$$J_s = J_g + J_\ell = -D_g^s \frac{dC_g}{dz} + \left(-D_\ell^s \frac{dC_\ell}{dz} + J_w C_\ell\right) \qquad (2)$$

όπου D_g^s=ο συντελεστής διάχυσης της αέριας φάσης του φυτοφαρμάκου στον εδαφικό αέρα και D_ℓ^s = ο συντελεστής διάχυσης της υγρής φάσης του φυτοφαρμάκου στο εδαφικό διάλυμα., J_w = πυκνότητα ροής του νερού στο έδαφος, όπως εκφράζεται από το νόμο του Darcy, C_ℓ = συγκέντρωση της ουσίας στην υγρή φάση του εδάφους $\left(M/L^3\right)$, C_g = συγκέντρωση της ουσίας στην αέρια φάση του εδάφους $\left(M/L^3\right)$.

Οι συντελεστές διάχυσης D_g^s και D_ℓ^s διαφέρουν από τους αντίστοιχους συντελεστές διάχυσης D_g^{air} και D_ℓ^w (D_g^{air} = συντελεστής διάχυσης της αέριας φάσης του φυτοφαρμάκου στον ατμοσφαιρικό αέρα και D_ℓ^w = συντελεστής διάχυσης της υγρής φάσης του φυτοφαρμάκου στο νερό). Η διαφοροποίηση αυτή, γίνεται σύμφωνα με τη σχέση των Millington and Quirk (1961) με ένα πολλαπλασιαστικό παράγοντα μαιανδρισμού και έτσι έχουμε τις σχέσεις :

$$D_g^s = \frac{f_a^{10/3}}{f_{o\lambda}^2} D_g^{air} \qquad (3)$$

$$D_l^s = \frac{\Theta^{10/3}}{f_{o\lambda}^2} D_l^w \qquad (4)$$

όπου f_α = κατ' όγκον ποσοστό του αέρα στο έδαφος $\left(L^3/L^3\right)$, $f_{o\lambda}$ =το ολικό πορώδες του εδάφους, δηλαδή το κατ' όγκο ποσοστό όλων των πόρων (είτε είναι γεμάτοι με νερό ή αέρα ή και τα δυο μαζί) στο έδαφος, Θ = η υγρασία του εδάφους κατ' όγκον $\left(L^3/L^3\right)$.

Στην εξίσωση (2), η συμβολή της υδροδυναμικής διασποράς που εκφράζει την επίδραση της παραλλακτικότητας των πραγματικών ταχυτήτων ροής στη διασπορά της διαλυμένης ουσίας, στην υγρή φάση, παραλείπεται ως αμελητέα. Αυτό περιορίζει το μοντέλο για πολύ μικρές μέσες ταχύτητες ροής και σε σχετικά ομοιογενή πορώδη μέσα.

Οι εξ. (1) και (2), λαμβάνοντας υπόψη τις (3) και (4), γράφονται:

$$J_s = -D_e \frac{dC_T}{dz} + V_e C_T \qquad (5)$$

και $$\frac{dC_T}{dt} = D_e \frac{d^2 C_T}{dz^2} - V_e \frac{dC_T}{dz} - \mu C_T \qquad (6)$$

Ο συντελεστής διάχυσης D_e είναι ένας φαινομενικός συντελεστής διάχυσης και δίνεται από την σχέση :

$$D_e = \frac{1}{f_{o\lambda}^2}\left\{\frac{\Theta^{10/3} D_l^w}{R_\ell} + \frac{f_a^{10/3} D_g^{air}}{R_g}\right\} \qquad (7)$$

και η ταχύτητα V_e είναι μια φαινομενική ταχύτητα μετάθεσης του φυτοφαρμάκου στην υγρή φάση και δίνεται από την σχέση :

$$V_e = \frac{J_w}{R_\ell} \qquad (8)$$

Η λύση της εξ. (6) προκύπτει για τις εξής συνθήκες:

i. Αρχική συνθήκη : $t = 0$, $C_T(z,0) = C_0$, $0 < z < L$ (9)

$$C_T(z,0) = 0, \; z > L$$

όπου C_0 = η αρχική συγκέντρωση του φυτοφαρμάκου, L= το βάθος της ανώτερης εδαφικής στρώσης όπου εφαρμόζεται ομοιόμορφα το φυτοφάρμακο.

ii. Οριακές συνθήκες: Προκειμένου για την διαφυγή της αέριας φάσης του φυτοφαρμάκου προς την ατμόσφαιρα, έχουμε:

$$z = 0, \; J_s(0,t) = -D_g^{air}\left(\frac{dC_g}{dz}\right)_0 \qquad \text{ή}$$

$$J_s(0,t) = -D_g^{air}\left[\frac{C_g(d,t) - C_g(0,t)}{d}\right] = \frac{D_g^{air}}{d} C_g(0,t) = \frac{D_g^{air}}{dR_g} C_T(0,t) = h_e C_T(0,t) \qquad (10)$$

όπου d = το πάχος της οριακής στρώσης της ατμόσφαιρας πάνω από την επιφάνεια του εδάφους και $h_e = D_g^{air} \big/ dR_g$

Για την επιφάνεια του εδάφους έχουμε:

$$z = 0, \quad -D_e \frac{dC_T}{dz} + V_e C_T = \frac{D_g^{air}}{dR_g} C_T \qquad (11)$$

ενώ η κάτω οριακή συνθήκη είναι :

$$z \longrightarrow \infty, \; C_{T(\infty,t)} = 0 \qquad (12)$$

Με αυτές τις συνθήκες (εξ. (9), (11) και (12)) η λύση της (6) είναι:

$$C_{T(z,t)} = \frac{1}{2} C_0 \exp(-\mu t)\left[\left\{\operatorname{erfc}\left(\frac{z - L - V_e t}{2\sqrt{D_e t}}\right) - \operatorname{erfc}\left(\frac{z - V_e t}{2\sqrt{D_e t}}\right)\right\} +\right.$$

$$+\left(\left(1+\frac{V_e}{h_e}\right)\exp\left(\frac{V_e z}{D_e}\right)\right)*\left\{\operatorname{erfc}\left(\frac{z+L+V_e t}{2\sqrt{D_e t}}\right)-\operatorname{erfc}\left(\frac{z+V_e t}{2\sqrt{D_e t}}\right)\right\}+$$

$$+\left(2+\frac{V_e}{h_e}\right)*\exp\left(\frac{h_e(h_e+V_e)t+(h_e+V_e)z}{D_e}\right)*$$

$$*\left(\operatorname{erfc}\left(\frac{z+(2h_e+V_e)t}{2\sqrt{D_e t}}\right)-\exp\left(\frac{h_e L}{D_e}\right)\operatorname{erfc}\left(\frac{z+L+(2h_e+V_e)t}{2\sqrt{D_e t}}\right)\right)\Bigg] \quad (13)$$

(Jury et al., 1983) και η πυκνότητα ροής της αέριας φάσης στην εδαφική επιφάνεια $J_s(0,t)$ θα δίνεται από τη σχέση:

$$J_s(0,t)=\frac{1}{2}C_0\exp(-\mu t)\Bigg[V_e\left\{\operatorname{erfc}\left(\frac{V_e t}{2\sqrt{D_e t}}\right)-\operatorname{erfc}\left(\frac{L+V_e t}{2\sqrt{D_e t}}\right)\right\}+$$

$$+(2h_e+V_e)\exp\left(\frac{h_e(h_e+V_e)t}{D_e}\right)*$$

$$*\left\{\exp\left(\frac{h_e L}{D_e}\right)\operatorname{erfc}\left(\frac{L+(2h_e+V_e)t}{2\sqrt{D_e t}}\right)-\operatorname{erfc}\left(\frac{(2h_e+V_e)t}{2\sqrt{D_e t}}\right)\right\}\Bigg] \quad (14)$$

3. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Με βάση τα όσα έχουν αναφερθεί προηγουμένως, μελετήθηκε η συμπεριφορά 4 φυτοφαρμάκων από τα πιο γνωστά και ευρέως χρησιμοποιούμενα στη γεωργία. Ο πίνακας 1, δίνει τα χαρακτηριστικά του εδάφους και του καθεστώτος ροής καθώς και τις τιμές των συντελεστών διάχυσης της υγρής και της αέριας φάσης των φυτοφαρμάκων στο νερό και στον ατμοσφαιρικό αέρα αντίστοιχα. Ο πίνακας 2 (τα στοιχεία του οποίου έχουν ληφθεί από διάφορες πηγές,π.χ Jury et al.,1984, κ.ά) δίνει τα επί μέρους χαρακτηριστικά των υπό μελέτη φυτοφαρμάκων που αναφέρονται στη διαλυτότητα και το ρυθμό αποικοδόμησής τους, στη δυνατότητα και στο ποσοστό ατμοποίησής τους και τους συντελεστές κατανομής τους στον οργανικό άνθρακα του εδάφους.

Με τα παραπάνω δεδομένα εφαρμόστηκαν οι εξισώσεις (13) και (14) με τις οποίες προσδιορίστηκαν οι κατατομές των συγκεντρώσεων των υπό μελέτη φυτοφαρμάκων στο έδαφος για διάφορους χρόνους μετά την εφαρμογή τους στην ανώτερη εδαφική στρώση (πάχους 10 cm) καθώς και οι επιφανειακές πυκνότητες ροής των ατμών των εν λόγω φυτοφαρμάκων. Τόσο οι συγκεντρώσεις όσο και οι επιφανειακές πυκνότητες ροής των ατμών, προσδιορίστηκαν για διαφορετικά καθεστώτα κίνησης του νερού στο έδαφος.

Πίνακας 1. Τιμές ιδιοτήτων που είναι κοινές σε όλους τους υπολογισμούς.

Ιδιότητα	**Τιμή (μονάδες)**
Συντελεστής διάχυσης της αέριας φάσης στον ατμ. αέρα, D_g^{air}	0,43 (m^2/day)
Συντελεστής διάχυσης υγρής φάσης του φ/κ στο νερό D_ℓ^w	4,3 x 10^{-3} (m^2/day)
Ολικό πορώδες του εδάφους, $f_{ολ}$	0,5 (m^3/ m^3)
Φαινομενική πυκνότητα στερεών συστατικών εδάφους, ρ_φ	1350 (kg/m^3)
Κατ'όγκον ποσοστό της οργανικής ουσίας στα στερεά συστατικά του εδάφους, f_{oc}	0,125 (m^3/ m^3)
Υγρασία του εδάφους κατ' όγκον , Θ	0,30 (m^3/ m^3)
Βάθος τοποθέτησης φυτοφαρμάκου , L	10 cm
Ρυθμός έκπλυσης	5 x 10^{-3} (m/day)
Ποσότητα εφαρμοζόμενου φυτοφαρμάκου	0,1 (g/m^2) ή (1kg/ha)

Πίνακας 2: Τιμές ιδιοτήτων φυτοφαρμάκων

Ιδιότητα	**Bromacil**	**Atrazine**	**Lindane**	**2,4-D**
Πυκνότητα κορεσμένων ατμών, (g/m^3)	3 x 10^{-6}	5 x 10^{-6}	1 x 10^{-3}	5 x 10^{-6}
Διαλυτότητα στο νερό (g/m^3)	820	33	7,5	900
Συντελεστής κατανομής φυτοφαρμάκου στην οργανική ουσία K_{oc} (m^3/kg)	0,072	0,03	1,3	1,3
Σταθερά ρυθμού αποικοδόμησης, μ (day^{-1})	1,98 x 10^{-3}	1,16 x 10^{-2}	2,67 x 10^{-3}	4,62 x 10^{-2}
Συντελεστής Henry, K_H (αδιάστατος)	3,7 x 10^{-9}	9,1 x 10^{-11}	1,33 x 10^{-4}	5,5 x 10^{-9}
Ημιπερίοδος ζωής (days)	350	60	260	30

4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στα σχήματα 1 και 2 παρουσιάζονται οι επιφανειακές πυκνότητες ροής και οι κατατομές στων συγκεντρώσεων των φυτοφαρμάκων που μελετήθηκαν

Η πυκνότητα ροής των ατμών του Lindane είναι ιδιαίτερα μεγάλη συγκριτικά με των άλλων ζιζανιοκτόνων. Αυτό ασφαλώς αποδίδεται στη μεγαλύτερη πτητικότητά του (K_H= 1.33 x 10^{-4})

Σε όλες τις περιπτώσεις η επιφανειακή πυκνότητα ροής των ατμών ενισχύεται από την ανοδική κίνηση του νερού. Είναι φανερό (βλ. σχ.2) ότι η κίνηση του νερού (ανοδική ή καθοδική) επηρεάζει τις κατατομές της σχετικής συγκέντρωσης των υπο μελέτη φυτοφαρμάκων. Φαίνεται επίσης η μείωση στις σχετικές συγκεντρώσεις και η εξάπλωση των παλμών σε μεγαλύτερη έκταση και σε μεγαλύτερα βάθη, καθώς ο χρόνος παρατήρησης μετά την εφαρμογή αυξάνει από 30 σε 50 ημέρες.

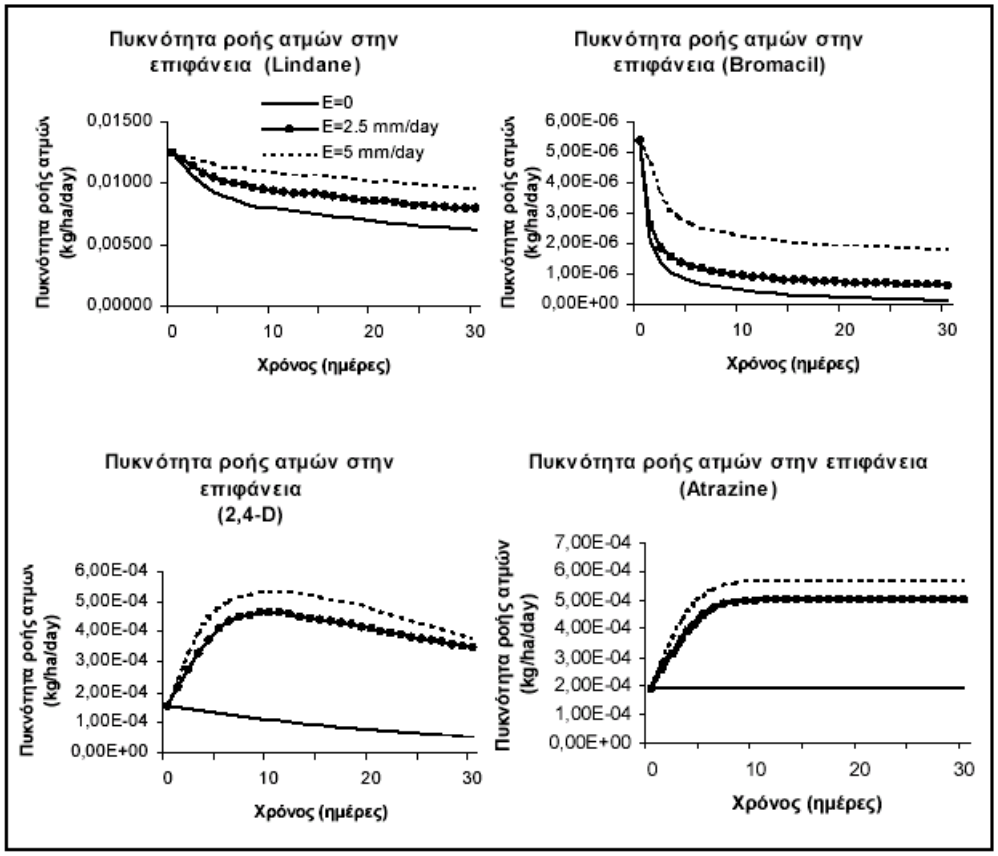
Η σχετική συγκέντρωση του 2,4-D φαίνεται να μειώνεται πιο έντονα αφού η αποικοδόμησή του συντελείται με ένα ρυθμό μ=0,0462 ανά ημέρα. Ακολουθούν κατά σειρά τα Atrazine, Lindane και τελευταίο το Bromacil.

Τα Atrazine, Bromacil και 2,4-D έχουν σχετικά (ασήμαντες) μικρές

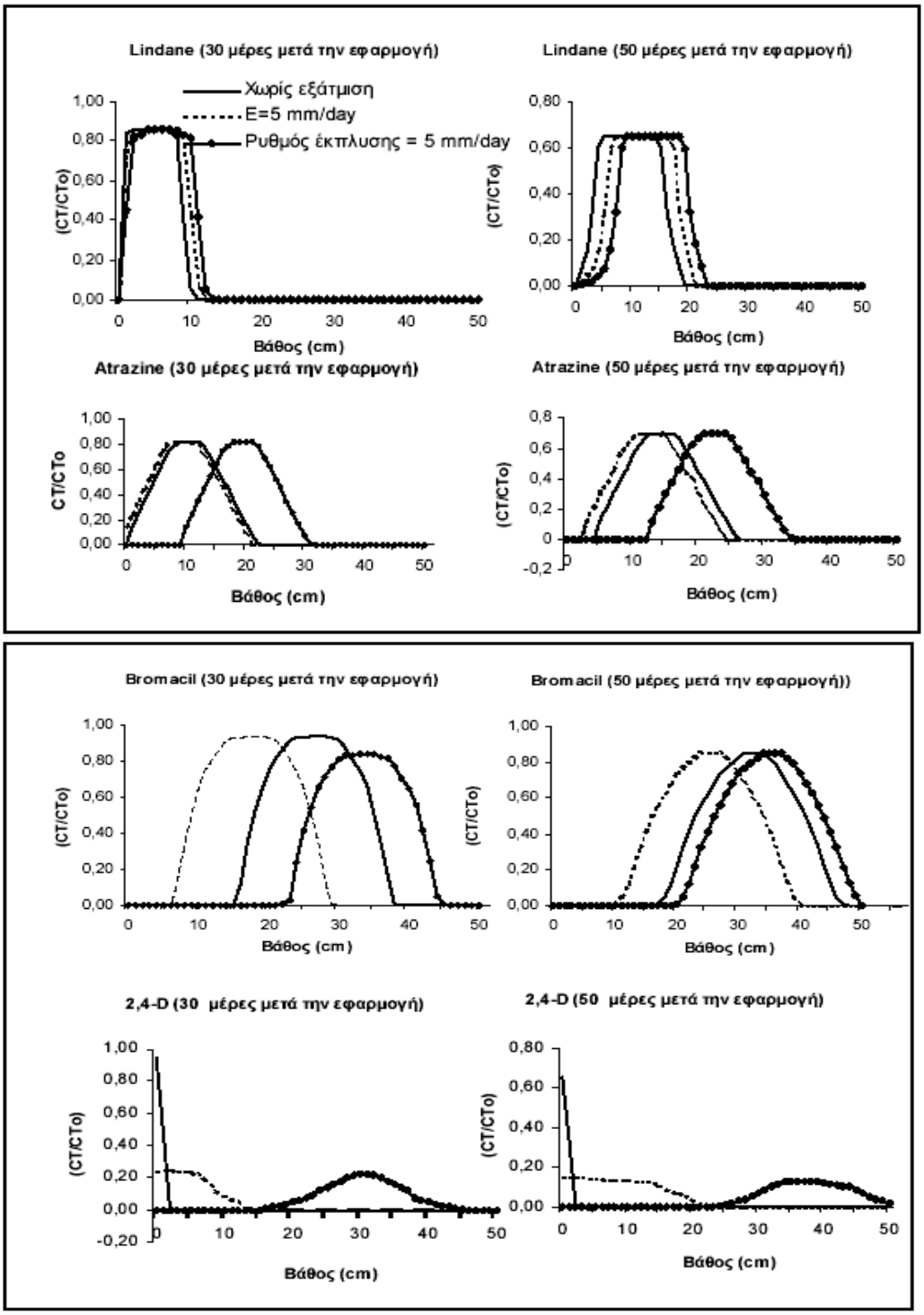
επιφανειακές πυκνότητες ροής όταν δεν υπάρχει ανοδική κίνηση νερού στην εδαφική κατατομή.

Φυτοφάρμακα με χαμηλή τιμή K_H όπως το Bromacil και το Atrazine έχουν συνήθως μικρές τιμές πυκνότητας ατμών με αποτέλεσμα η οριακή στρώση να φαίνεται ότι προβάλλει μεγαλύτερη αντίσταση στη ροή (αφού η κλίση της συγκέντρωσης θα είναι μικρή), απ' ότι το ίδιο το έδαφος.

Αποτέλεσμα των ανωτέρω είναι, όταν το νερό κινείται ανοδικά, να παρατηρείται συσσώρευση του φυτοφαρμάκου στην επιφάνεια με το χρόνο και έτσι η επιφανειακή πυκνότητα ροής των ατμών να αυξάνει με το χρόνο καθώς με το χρόνο μεγαλώνει η τάση των ατμών του φυτοφαρμάκου στην επιφάνεια. Φυτοφάρμακα με μεγάλη τιμή K_H χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερες σχετικά τάσεις ατμών και η διαφυγή τους με διάχυση μέσω της οριακής στοιβάδας προς την ατμόσφαιρα, είναι πιο αποτελεσματική κι έτσι δεν παρατηρείται συσσώρευση ατμών στην επιφάνεια με το πέρασμα του χρόνου.



Σχήμα 1. Πυκνότητα ροής διαφυγής ατμών από την επιφάνεια του εδάφουςπρος την ατμόσφαιρα



Σχήμα 2. Κατατομές σχετικής συγκέντρωσης φυτοφαρμάκων, 30 ημέρες και 50 ημέρες, μετά την εφαρμογή στο έδαφος.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Αγγελάκης Ν. Α. (1987) Ασταθής κίνηση χημικών ουσιών στο έδαφος με διαφορετικούς συντελεστές διασποράς. *Πρακτικά 3ου συνεδρίου Ε.Υ.Ε. Θεσσαλονίκη*, σ. 699-711.
2. Αντωνόπουλος Β. (2000) Μεθοδολογία εκτίμησης του κινδύνου ρύπανσης των υπόγειων νερών από την εφαρμογή φυτοφαρμάκων εδάφους. *Πρακτικά 2ου Συνεδρίου Γεωργικής Μηχανικής ΕΓΜΕ, Βόλος,* σ. 606-614.
3. Αντωνόπουλος Β. (2001) *Ποιότητα και Ρύπανση Υπόγειων Νερών* Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη.
4. Antonopoulos V. and Z. Papazafiriou (1990a) Solutions of one-dimensional water flow and mass transport equations in variably saturated porous media by the finite element method. *Journal of Hydrology.* 119: 151-167
5. Antonopoulos V. and Z. Papazafiriou (1990b) Simultaneous one-dimensional water flow and mass transport equations of conservative solutes in porous media. *Water Resources Management* 4 (1): 47-62
6. Azevedo A.S., R. S. Kanwar, P. Singh, L.S. Perreira. (1996). Movement of NO_3-N and Atrazine through soil columns as affected by lime application. *Transactions of the ASAE* Vol. 39 (3):937-945.
7. Carmichael Lisa M., T.G. Smith and D.L. Pardieck (1999). Site specific sorption values for mixtures of volatile and semivolatile organic compounds in sandy soils. *Journal of Environmental Quality* Vol. 28: 888-897.
8. Chapman D. and V, Kimstach (1996). *Selection of water quality variables. In D. Chapman (ed.) Water quality assessments (2nd edition).* E & FN SPON, London.
9. Clay S.A., D.E. Clay, W.C. Koskinen, R.K. Berg Jr. (1988) Application method: Impacts on Atrazine and Alachlor movement, weed control and corn yield in three tillage systems. *Soil and Tillage Research*, Vol.48: 215-224.
10. Gaynor J.D., C.S, Tan, H.Y.F.Ng, C.F. Drury, T.W. Welacky and I.J. Van Wesenbeeck (2000). Tillage and controlled drainage-subirrigated management effects on soil persistence of Atrazine, Metolachlor and Metribuzin in corn. *Journal of Environmental Quality*. Vol. 29: 936-947.
11. Heatwole C.D., S. Zacharias, S. Mostaghimi, T.A. Dillaha (1997). Movement of field-applied atrazine, metolachlor and bromide in a sandy loam soil. *Transactions of the ASAE*, vol. 40 (5): 1267-1276.
12. Jury W.A., W.F. Spencer, and W.J. Farmer (1983). Behavior Assesssment Model for Trace Organics in Soil: I. Model Description. *Journal of Environmental Quality*, Vol.12 (4): 558-564.
13. Jury W.A., W.F. Spencer, and W.J. Farmer (1984). Behavior Assesssment Model for Trace Organics in Soil: III. Application of Screening Model. *Journal of Environmental Quality*, Vol.13 (4): 573-579
14. Millinghton, R.J., and J.P. Quirk, (1961). Permeability of porous solids. *Trans. Faraday Soc.* 57: 1200-1207.
15. Moutsopoulos K. N., A. Konstantinidis, I. Meladiotis, C. Tzimopoulos, E. Aifantis (2001) Hydraulic Behavior and Contaminant Transport in Multiple Porosity Media. *Transport in Porous Media, Kluwer Academic Publishers,* 42(3): 265-292.
16. Van den Berg F., J. H. Smelt, J.J. T.I. Boesten and W. Teunissen (1999). Volatilization of Methyl Isothiocynate from soil after application of Metam-Sodium with two techniques. *Journal of Environmental Quality* Vol. 28: 918-928.
17. White R.E. (1985). *The influence of macropores on the transport of dissolved and suspended matter through soil. In Advances in Soil Science,* D. Hillel (Ed.) Springer – Verlag, N. York Inc. Vol.3. p.p. 95-120

ΔΙΑΚΟΠΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΚΤΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ

Ιωάννης Γράβαλος
Ηρώων Πολυτεχνείου 198 - 41221 ΛΑΡΙΣΑ
Email: gravalos@in.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται ένας διακοπτικός ελεγκτής εδαφικής υγρασίας.

Ένας αισθητήρας μέτρησης της κατ' όγκο υγρασίας με τη μέθοδο χρονικής ανακλομέτρησης (TDR), τοποθετημένος εντός του ριζοστρώματος παρακολουθεί κάθε μεταβολή της υγρασίας. Για βαθύριζα φυτά υιοθετήθηκε η λύση της εγκατάστασης δύο ή περισσοτέρων αισθητήρων.

Πυρήνας του συστήματος ελέγχου είναι ο μικροϋπολογιστής ενός ολοκληρωμένου (μικροελεγκτής) 8031 της Intel. Σε κάθε απόκλιση των τιμών μέτρησης από τα επιθυμητά όρια ελάχιστης και μέγιστης εδαφικής υγρασίας, ο ελεγκτής επεμβαίνει στην ηλεκτροβάνα του δικτύου άρδευσης.

Λέξεις κλειδιά: Διακοπτικός ελεγκτής, εδαφική υγρασία, σύστημα άρδευσης.

SOIL MOISTURE SWITCHING CONTROLLER

Ioannis Gravalos
198, Iroon Polytechniou Str. – 41221 Larissa
Email: gravalos@in.gr

ABSTRACT

In this paper, a soil moisture-switching controller has been presented.

A sensor measuring the moisture content by TDR method has been installed in the root zone and it tracks every change of soil moisture. Concerning the deep root plants, the solution of installing two or more sensors, has been decided.

The core of the control system is the 8031 Intel's microcontroller. In every measured value deviation from the requested limits of minimum and maximum soil moisture, the controller regulates on the electrovalve of the irrigation system.

Key words: Switching controller, soil moisture, irrigation system.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η γνώση της εδαφικής υγρασίας και η δυνατότητα ελέγχου αυτής, ώστε να επιτευχθούν βέλτιστες συνθήκες για την ανάπτυξη των φυτών, οπωσδήποτε δεν είναι καινούργια ιδέα. Ήταν γνωστή και προέτρεψε πολλούς ερευνητές να αναπτύξουν συστήματα αυτόματης άρδευσης.

Οι Waugh και Corey (1963) και ο Painter (1966) περιγράφουν τεχνικές ελέγχου, με τις οποίες τα φυτά μπορούν να αναπτυχθούν σε συνθήκες θερμοκηπίου με σχεδόν σταθερή εδαφική υγρασία. Ένα σύστημα αυτόματου ελέγχου επιφανειακής άρδευσης βασιζόμενο στη χρήση τενσιόμετρων (tensiometers), αναπτύχθηκε από τον Fischbach κ.ά. (1970). Η μετατροπή της τάσης εδαφικού νερού (μητρικού δυναμικού) σε ηλεκτρικό σήμα γίνεται εύκολα με την προσαρμογή μετατροπέων τάσης (pressure transducers). Ένας αισθητήρας μητρικού δυναμικού (matric potential sensor), ο οποίος βασίζεται στην αρχή θερμικής διάχυσης σε πορώδες μέσον, αναπτύχθηκε από τον Phene κ.ά (1971) .Παρουσιάζει ευαισθησία σε μεγάλη περιοχή του μητρικού δυναμικού και παράγει στην έξοδό του ηλεκτρικό σήμα, που μπορεί να αξιοποιηθεί στην αυτοματοποίηση των αρδεύσεων. Οι Malicki και Hanks (1989) περιγράφουν έναν αισθητήρα εδαφικής υγρασίας δύο ηλεκτροδίων, ο οποίος βασίζεται στην αρχή της ηλεκτροχημικής πόλωσης (electrochemical polarization). Οι Richardson κ.ά. (1989) και Stenitzer (1993) παρουσιάζουν τα αποτελέσματα δεκαετούς έρευνας από την εφαρμογή γύψινων πλακιδίων (gypsum blocks) στον προγραμματισμό των αρδεύσεων, σε εκτάσεις με ζαχαρότευτλα και καλαμπόκι.

Ο σκοπός της εργασίας αυτής, είναι το σχέδιο και η πειραματική επαλήθευση ενός διακοπτικού ελεγκτή εδαφικής υγρασίας στη ζώνη ριζοστρώματος των φυτών, εφαρμόζοντας την τεχνολογία των μικροεπεξεργαστών.

2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Η διάταξη του συστήματος ελέγχου αποτελείται από το πρωτότυπο του διακοπτικού ελεγκτή εδαφικής υγρασίας, που ονομάσαμε IRCO – 09 και τον αισθητήρα VIRRIB.

2.1 Αισθητήρας

Ο αισθητήρας εδαφικής υγρασίας VIRRIB προστατεύεται με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας PV 8200/88. Η αρχή λειτουργίας του στηρίζεται στη μέτρηση του χρόνου διάδοσης ηλεκτρομαγνητικού κύματος εντός μεταλλικού αγωγού (μικροκυματική γραμμή μεταφοράς), ο οποίος βρίσκεται σε επαφή με το έδαφος. Η ταχύτητα διάδοσης του κύματος επηρεάζεται από την διηλεκτρική σταθερά του εδάφους, κατά συνέπεια μπορεί να προσδιοριστεί η κατ' όγκο περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό (Fexa και Siroky 1983), (Sebela 1989).

Το εύρος των τιμών μέτρησης εδαφικής υγρασίας είναι 0 έως 60% (% του όγκου) με ακρίβεια $\pm$ 1%. Η απόκριση στις μεταβολές της υγρασίας είναι στιγμιαία, γεγονός που τον κάνει να υπερτερεί σε σχέση με άλλους αισθητήρες.

Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε στην εικόνα 1, ο αισθητήρας αποτελείται από δύο μεταλλικούς αγωγούς ομόκεντρων κύκλων, οι οποίοι καταλήγουν σε ένα σώμα. Τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα φυλάσσονται εντός του σώματος, στο οποίο έχει εγχυθεί μονωτικό υλικό, που τα προστατεύει από την υγρασία. Τροφοδοτείται με 12 έως 20V, απευθείας από την συσκευή IRCO–09.

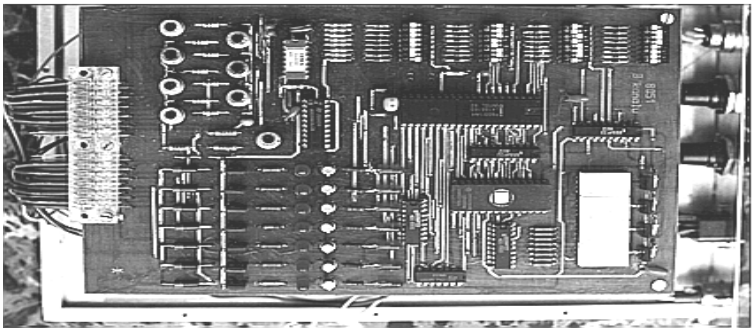
Εικόνα 1: Αισθητήρας παρακολούθησης εδαφικής εργασίας.

Η διακρίβωσή του έχει γίνει από πιστοποιημένο μετεωρολογικό σταθμό του εξωτερικού. Θεωρητικά η διάρκεια ζωής του είναι άπειρη, δεν απαιτεί καμία συντήρηση και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε οποιοδήποτε τύπο εδάφους.

2.2 Μικροελεγκτής

Η κεντρική κάρτα του ελεγκτή εδαφικής υγρασίας IRCO-09 παρουσιάζεται στην εικόνα 2. Για να λειτουργήσει σε σύστημα ο μικροϋπολογιστής ενός ολοκληρωμένου 8031 (IC1) της Intel (μικροελεγκτής), θα πρέπει να υποστηριχθεί από δύο ακόμη ολοκληρωμένα κυκλώματα, τον καταχωρητή διευθύνσεων 74LS373 (IC2) και την εξωτερική μνήμη προγράμματος EPROM 2764 (IC3). Η περιοχή διευθύνσεων που μπορεί να προσπελάσει ο μικροελεγκτής έχει εύρος 16 ψηφίων. Ο δίαυλος δεδομένων του μικροελεγκτή πολυπλέκεται με τις L0–byte γραμμές του διαύλου διευθύνσεων και η αποπολύπλεξη γίνεται από τον καταχωρητή διευθύνσεων. Στις εξόδους του καταχωρητή βρίσκονται οι γραμμές διευθύνσεων A0-A7. Οι HI-byte γραμμές του διαύλου διευθύνσεων δίδονται αυτούσιες από τον μικροελεγκτή. Οι γραμμές A8-A13 συνδέονται απευθείας στους αντίστοιχους ακροδέκτες του ολοκληρωμένου της μνήμης. Τα ψηφία A14 και A15 αποκωδικοποιούνται ξεχωριστά και χρησιμεύουν για την επιλογή των ROM και RAM.

Ο μικροελεγκτής έχει ενσωματωμένο έναν ταλαντωτή χρονισμού τύπου Pierce, που υλοποιείται παρεμβάλλοντας ένα κρύσταλλο χαλαζία μεταξύ των ακροδεκτών XTAL1 και XTAL2. Επίσης για την αυτόματη επανατοποθέτηση (Reset), χρησιμοποιήθηκε ένα απλό κύκλωμα RC.



Εικόνα 2 : Κεντρική κάρτα ελεγκτή

2.3 Αναλογικές είσοδοι

Οι οκτώ αναλογικές είσοδοι βρίσκονται η μία δίπλα στην άλλη, στο επάνω αριστερό τμήμα της κάρτας. Επειδή η έξοδος κάθε αισθητήρα είναι υψηλή για να χρησιμοποιηθεί από τη συσκευή IRCO-09, χρειάστηκε να την υποβιβάσουμε ανάλογα, με τη βοήθεια διαιρετών τάσης. Η χρήση αυτής της απλής τεχνικής δε δημιουργεί σφάλμα στη μέτρηση καθώς η αντίσταση των εισόδων του πολυπλέκτη MAC08 (IC8) που ακολουθεί είναι υψηλή. Στη συνέχεια η έξοδος του πολυπλέκτη οδηγείται σε έναν μετατροπέα A/D. Ο ADC 0803 (IC7) είναι γρήγορος με ακρίβεια οκτώ ψηφίων και συνδέεται μέσω διαύλου με τον μικροελεγκτή.

2.4 Διάταξη διακοπτών

Ο χρήστης με τη βοήθεια της διάταξης οκταπλών διακοπτών DIP, μπορεί να καθορίσει τις τρεις παραμέτρους λειτουργίας. Το όριο ελάχιστης εδαφικής υγρασίας, το όριο μέγιστης εδαφικής υγρασίας και τον χρόνο διάρκειας της άρδευσης (μέγιστος χρόνος άρδευσης ορίστηκαν οι 6 ώρες). Στην περίπτωση, που λανθασμένα καθορίσουμε το ελάχιστο όριο μεγαλύτερο από το μέγιστο, τότε αρχίζει να αναβοσβήνει προειδοποιητικά το δεκαδικό σημείο αριστερά της οθόνης. Η σύνδεση της διάταξης με τον μικροελεγκτή υλοποιείται μέσω ενός οκτάμπιτου καταχωρητή 74LS373 (IC5).

2.5 Πολυπλεγμένη οθόνη

Οι παράμετροι λειτουργίας και οι τιμές μέτρησης απεικονίζονται στην οθόνη της συσκευής IRCO – 09. Η πολυπλεγμένη οθόνη αποτελείται από 4 μονάδες HD11310 των 7 τομέων LED, που συνδέονται με τον μικροελεγκτή μέσω ενός οκτάμπιτου καταχωρητή 74LS373 (IC4), ο οποίος χρησιμοποιείται ως αποκωδικοποιητής. Η γραμμή τροφοδοσίας κάθε μονάδας ελέγχεται με ένα τρανζίστορ – διακόπτη τύπου PNP.

2.6 Ενεργοποιητές

Μόλις ολοκληρωθεί η σύγκριση, ο μικροελεγκτής διαβάζει το αποτέλεσμα και το στέλνει σε ένα οκτάμπιτο καταχωρητή 74LS373 (IC6). Ο

συγκεκριμένος λειτουργεί ως καταχωρητής κατάστασης. Οι οκτώ έξοδοι ενισχύονται από μία διάταξη τρανζίστορ πριν ενεργοποιήσουν τους ηλεκτρονόμους (ρελέ) που ελέγχουν τις ηλεκτροβάνες.

3. ΕΦΑΡΜΟΓΗ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

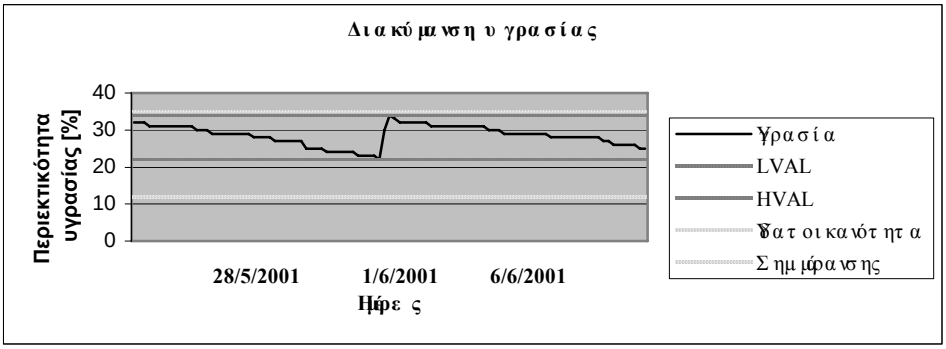
Ο διακοπτικός ελεγκτής εδαφικής υγρασίας επιλέχτηκε να εφαρμοστεί σε συστήματα τοπικής άρδευσης. Προφανώς, αυτή η επιλογή έγινε λόγω των χαρακτηριστικών που διακρίνουν τις τοπικές αρδεύσεις και των δυνατοτήτων που προσφέρουν για πλήρη αυτόματη λειτουργία. Για να παρακολουθήσουμε την εδαφική υγρασία σε συνθήκες εργαστηρίου χρησιμοποιήσαμε ένα πειραματικό μοντέλο στάγδην άρδευσης. Κεντρικό στοιχείο του είναι μία ηλεκτροβάνα 100-DV(1΄΄) της RAIN BIRD που λειτουργεί με εναλλασσόμενη τάση 24V. Τη διάταξη συμπληρώνουν μία βαθμονομημένη δεξαμενή νερού των 50 l, βαλβίδα ανεπιστροφής, σωληνώσεις, εξαρτήματα συνδεσμολογίας και σταλακτήρες παροχής 2,0 l/hr. Επίσης για την καλλιέργεια φυτών βάμβακος χρησιμοποιήθηκαν μεγάλα δοχεία που περιείχαν διαφορετικά εδάφη.

Πίνακας 1: Φυσικομηχανικά και υδρολογικά χαρακτηριστικά εδαφών

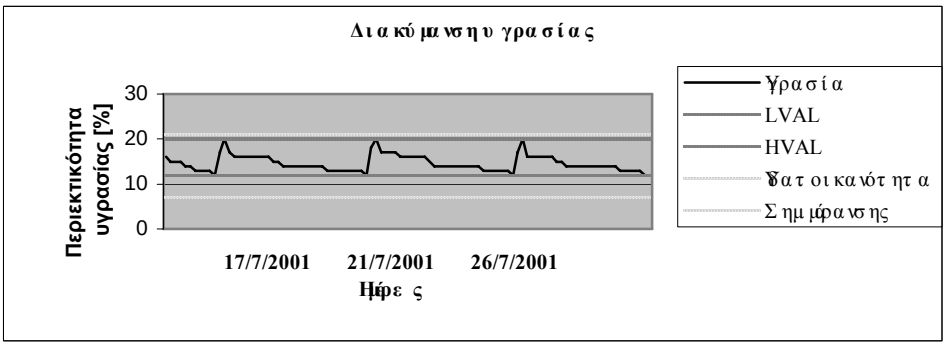
Έδαφος	**Άμμος (%)**	**Ιλύς (%)**	**Αργιλος (%)**	**Φαινόμενο Ειδικό βάρος (g/cm^3)**	**Υδατοϊκανότητα (% όγκου)**	**Σημείο μάρανσης (% όγκου)**
A	44	40	16	1,25	35	12
B	69	22	9	1,50	21	7

Ο αισθητήρας εδαφικής υγρασίας τοποθετήθηκε εντός του ριζοστρώματος των φυτών σε βάθος 20cm από την επιφάνεια του εδάφους. Με τη βοήθεια της διάταξης διακοπτών του ελεγκτή έγινε η εισαγωγή των ορίων ελαχίστης (LVAL) και μέγιστης (HVAL) υγρασίας ανάλογα με τον τύπο εδάφους ενώ οι τιμές μετρήσεων απεικονίζονται στην πολυπλεγμένη οθόνη.

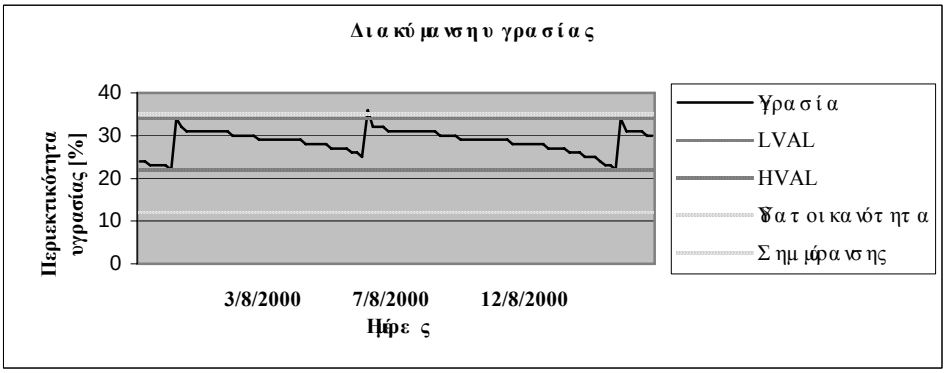
Η πειραματική επαλήθευση του ελεγκτή πραγματοποιήθηκε στην περιοχή της Λάρισας κατά τη θερινή περίοδο των ετών 2000 και 2001. Χρησιμοποιήσαμε στα πειράματα δύο διαφορετικούς τύπους εδαφών, έναν χαμηλής και έναν υψηλής διηθητικότητας ώστε να μελετήσουμε καλύτερα τη συμπεριφορά του ελεγκτή. Η καταγραφή των μετρήσεων γινόταν ανά τακτά χρονικά διαστήματα, περίπου κάθε δύο ώρες. Τα αποτελέσματα τα επεξεργαστήκαμε με τη μορφή διαγραμμάτων.



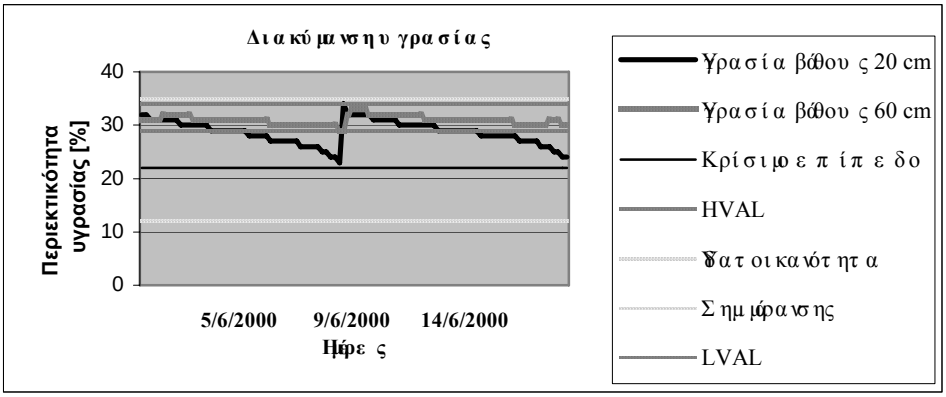
Διάγραμμα 1: Η διακύμανση της υγρασίας στο έδαφος Α σε βάθος 20 cm και η ρύθμισή της από τον ελεγκτή.



Διάγραμμα 2: Η διακύμανση της υγρασίας στο έδαφος Β σε βάθος 20 cm και η ρύθμισή της από τον ελεγκτή.



Διάγραμμα 3: Η διακύμανση της υγρασίας στο έδαφος Α σε βάθος 20 cm. Μετά τη πρώτη ρύθμιση της υγρασίας από τον ελεγκτή ακολούθησε βροχόπτωση.



Διάγραμμα 4: Η διακύμανση της υγρασίας στο έδαφος Α σε βάθος 20 cm και 60 cm και οι ρυθμίσεις της από τον ελεγκτή.

Στόχος του ελεγκτή είναι η συνεχής παρακολούθηση της πραγματικής τιμής εξόδου της διαδικασίας σε σχέση με τις επιθυμητές τιμές, ανεξάρτητα από οποιεσδήποτε ενδογενείς ή εξωγενείς διαταραχές. Ο στόχος αυτός επιτυγχάνεται με τη συνεχή σύγκριση των επιθυμητών τιμών με την πραγματική. Από τα διαγράμματα που παραθέτουμε προκύπτει ότι η εδαφική υγρασία ήταν πάντοτε πάνω από το κρίσιμο επίπεδο και εντός των επιθυμητών τιμών LVAL και HVAL που οριοθετούν κλάσμα της διαθέσιμης υγρασίας. Η υγρασία στα επιφανειακά στρώματα του εδάφους μέχρι βάθους 20 cm παρουσιάζει μεγαλύτερη διέγερση σε διαταραχές σε αντίθεση με τα βαθύτερα στρώματα μέχρι βάθους 60 cm όπου η υγρασία είναι περισσότερο σταθερή. Στο έδαφος Β, λόγω μεγάλης διηθητικότητας, η πτώση της υγρασίας είναι περισσότερο απότομη σε σχέση με εκείνη του εδάφους Α, η οποία είναι πιο ομαλή.

Προφανώς, ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στον προσδιορισμό των τιμών των παραμέτρων λειτουργίας (LVAL, HVAL). Η μέθοδος για τον προσδιορισμό των παραμέτρων του ελεγκτή (συντονισμός) είναι πειραματική.

Για να παρακολουθήσουμε τη διακύμανση της εδαφικής υγρασίας σε βαθύριζα φυτά χρησιμοποιήσαμε δύο αισθητήρες (Πίνακας 2). Ο πρώτος τοποθετήθηκε σε βάθος 60cm και ο δεύτερος σε βάθος 20 cm. Με τον τρόπο αυτό αντιμετωπίσαμε το πρόβλημα της υπερπήδησης (overshoot). Κατά την εφαρμογή δύο αισθητήρων παρακολούθησης της εδαφικής υγρασίας έχουμε περισσότερες μετρήσεις από τη φυσική διαδικασία και μία μόνο μεταβλητή ελέγχου. Ο στενότερος έλεγχος είναι εφικτός χρησιμοποιώντας δύο υποβρόχους.

Πίνακας 2: Προτεινόμενες τιμές βάθους τοποθέτησης των αισθητήρων:

	Καλαμπόκι	Πατάτες	Ζαχαρότευτλα
1ος αισθητήρας	70 cm	50cm	80cm
2ος αισθητήρας	20cm	20cm	20cm

Η αυξημένη υδραυλική αγωγιμότητα του νερού στη ζώνη ριζοστρώματος επέτρεψε στα φυτά να απορροφήσουν και να μεταφέρουν στα φύλλα μεγάλο όγκο νερού. Οι μέγιστες τιμές κατανάλωσης παρατηρήθηκαν μέσα στους μήνες Ιούλιο και Αύγουστο, γεγονός που αντιστοιχεί στη μεγαλύτερη εξάτμιση και στην ολοκλήρωση της φυλλικής ανάπτυξης των φυτών. Μέσα σ'αυτή τη περίοδο τα φυτά είχαν πάντοτε τη διαθέσιμη υγρασία για την ισόρροπη ανάπτυξή τους.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή παρουσιάστηκε ένα σύστημα ελέγχου της εδαφικής υγρασίας σε πραγματικό χρόνο.

Από την πειραματική επαλήθευση του συστήματος προκύπτει ότι είναι δυνατόν να αναπτυχθούν ικανές, συνθήκες για την ανάπτυξη των φυτών, ανεξάρτητα από τις μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου, της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας του περιβάλλοντος.

Η μέτρηση και η ρύθμιση της εδαφικής υγρασίας γινόταν αυτόματα. Η σωστή ανάπτυξη των φυτών επιβεβαιώνει ότι δεν υπήρξαν ξηρές περίοδοι στη ζώνη ριζοστρώματος κατά τη διάρκεια των θερμότερων περιόδων ενώ η κατανάλωση του νερού ήταν περιορισμένη.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Fexa, J., Siroky, K. 1983. Mereni Vlhkosti. Technicky pruvodce 60. SNTL, Praha.
2. Fischbach, P.E., Thompson, T.L., Stetson L.E. 1970. Electric controls for automatic surface irrigation systems with reuse systems. Transactions of the ASAE 13 (2): 286-288.
3. Malicki, M.A., Hanks R.J. 1989. Interfacial contribution to two-electrode soil moisture sensor readings. Irrigation Science 10: 41-54.
4. Painter, L.I. 1966. Method of subjecting growing plants to a continous soil moisture strees. Agron. J. 58: 459-460.
5. Phene, C.J., Hoffman, G.J., Rawlins, S.L. 1971. Measuring soil matric potential in situ by sensing heat dissipation within a porous body: I. Theory and sensor construction. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 35 : 27-33.
6. Richardson, G., Mueller – Beilschmid, P.M. 1989. Managing irrigation with gypsum blocks. Infor Inc., New York.
7. Sebela, F. a Kol. 1989. Sledovani a vyvoj vybranych snimacu a predpoklady unifikace automatizacnich prostredku. Zprava, VUZT Repy: 8-115.
8. Stenitzer, E. 1993. Monitoring soil moisture regimes of field crops with gypsum blocks. Theor. Appl. Climatol. 48: 159-165.
9. Waugh, D.L., Corey, R.B. 1963. A moisture control apparatus for use in short term studies. Agron. J. 55: 412-414.