

ΕΤΑΙΡΕΙΑ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΛΛΑΔΑΣ (Ε.Γ.Μ.Ε.)

ΠΡΑΚΤΙΚΑ

**6^ο ΠΑΝΕΛΛΗΝΙΟΥ ΣΥΝΕΔΡΙΟΥ
ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ**

**Η Γεωργική Μηχανική και η Μηχανική
Βιοσυστημάτων στην εποχή των βιοκαυσίμων
και των κλιματικών αλλαγών**

Επιμέλεια Έκδοσης

Β. Αντωνόπουλος,

Π. Γεωργίου και Σ. Βουγιούκας

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ

8-10 Οκτωβρίου 2009

Πρακτικά του 6^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου Γεωργικής Μηχανικής
Η Γεωργική Μηχανική και η Μηχανική Βιοσυστημάτων στην εποχή των
βιοκαυσίμων και των κλιματικών αλλαγών

ISBN 978-960-6865-12-1

Η αναπαραγωγή των εργασιών έχει γίνει με απευθείας φωτοαντιγραφή και την ευθύνη για το υλικό κάθε εργασίας έχουν οι συγγραφείς.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η Εταιρεία Γεωργικών Μηχανικών Ελλάδος (ΕΓΜΕ) ιδρύθηκε τον Ιούλιο του 1993 με έδρα την Αθήνα και είναι μέλος της Ευρωπαϊκής Ένωσης Γεωργικών Μηχανικών (EurAgEng). Η ΕΓΜΕ οργανώνει κάθε δύο έτη το Πανελλήνιο Συνεδρίο της.

Ο παρόν τόμος αποτελεί τα πρακτικά του 6^{ου} Πανελλήνιου Συνεδρίου της Γεωργικής Μηχανικής, που έλαβε χώρα στην Θεσσαλονίκη από 8-10 Οκτωβρίου 2009. Το θέμα του συνεδρίου ήταν «Η Γεωργική Μηχανική και η Μηχανική Βιοσυστημάτων στην εποχή των βιοκαυσίμων και των κλιματικών αλλαγών». Περιέχει 103 επιστημονικές ανακοινώσεις που παρουσιάστηκαν στο Συνέδριο. Όλες οι εργασίες κρίθηκαν από μέλη της Επιστημονικής Επιτροπής και άλλους ειδικούς επιστήμονες. Το συνέδριο οργανώθηκε υπό την αιγίδα της Γεωπονικής Σχολής του Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης και υποστηρίχθηκε από τα μέλη του Τομέα Εγγείων Βελτιώσεων, Εδαφολογίας και Γεωργικής Μηχανικής.

Στο Συνέδριο δόθηκε η ευκαιρία στο Επιστημονικό δυναμικό της χώρας μας να παρουσιάσει την πρόοδο της Επιστήμης και τις νέες μεθόδους προσέγγισης σε αντικείμενα που αφορούν τη διαχείριση των υδατικών και εδαφικών πόρων, τα γεωργικά μηχανήματα, τις αγροτικές κατασκευές, την επεξεργασία γεωργικών προϊόντων, την ενέργεια, τις νέες τεχνολογίες και το περιβάλλον.

Η Γεωργική Μηχανική τα τελευταία χρόνια μετεξελίχθηκε σε Μηχανική Βιοσυστημάτων διεθνώς αλλά και στη χώρα μας. Στη Μηχανική Βιοσυστημάτων αξιοποιούνται οι αρχές της μηχανικής και της βιολογίας για να δοθούν λύσεις σε προβλήματα που αφορούν τους ζωντανούς οργανισμούς και το φυσικό περιβάλλον. Έχει σαν στόχο την εξασφάλιση των απαραίτητων εφοδίων για τη ζωή: ασφαλή και επαρκή τρόφιμα για τη διατροφή, πόσιμο καθαρό νερό, καθαρά καύσιμα και πηγές ενέργειας, ασφαλές και υγιές περιβάλλον για τη διαβίωση.

Οι δύο προκλήσεις των ημερών είναι τα βιοκαύσιμα και η κλιματική αλλαγή. Είναι δύο θέματα που βρίσκονται στο επίκεντρο των ενδιαφερόντων των Μηχανικών Βιοσυστημάτων. Η κλιματική αλλαγή επηρεάζεται από τις δραστηριότητες της Γεωργίας, αλλά και επηρεάζει την παραγωγικότητα φυτών και ζώων. Οι αναμενόμενες μεταβολές στη θερμοκρασία, τη βροχόπτωση, τη σχετική υγρασία, τα πλημμυρικά φαινόμενα και τη ξηρασία θα επηρεάσουν την ανάπτυξη των φυτών και τη διαβίωση των ζώων και του φυσικού περιβάλλοντος, όπου αναπτύσσονται και εκτρέφονται. Η διαχείριση της καλλιέργειας των αγρών ιδιαίτερα σε οργανικά εδάφη και των αποβλήτων των ζώων, επιβάλλεται για την μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου (CO₂, N₂O, CH₄). Η παραγωγή και η χρήση των βιοκαυσίμων αυξάνει συνεχώς. Συνδέεται, όμως με τη αύξηση της ζήτησης των προϊόντων ορισμένων καλλιεργειών, όπως αραβοσίτου, γεγονός που έχει επιπτώσεις στις τιμές τους και μερικές φορές στην ενίσχυση του επισιτιστικού προβλήματος και την κατασπατάληση υδατικών και εδαφικών πόρων.

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 οργάνωση του συνεδρίου.

Προς την Επιτροπή Ερευνών του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, το ΥΠΕΧΩΔΕ, το ΓΕΩΤΕΕ 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, Οκτώβριος 2009
Καθηγητής, Βασίλειος Ζ. Αντωνόπουλος
Πρόεδρος Οργανωτικής Επιτροπής

Οργανωτική Επιτροπή Συνεδρίου

Αντωνόπουλος Β., Καθηγητής Α.Π.Θ., πρόεδρος ΕΓΜΕ
Τσατσαρέλης Κ., Καθηγητής Α.Π.Θ., αντιπρόεδρος ΕΓΜΕ
Νικήτα-Μαρτζοπούλου Χ., Καθηγήτρια Α.Π.Θ.
Παυλάτου-Βε Α., Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Α.Π.Θ.
Βουγιούκας Σ., Επίκουρος Καθηγητής Α.Π.Θ., γραμματέας ΕΓΜΕ
Γεωργίου Π., Λέκτορας Α.Π.Θ., ταμίας ΕΓΜΕ
Τελόγλου Η., Επίκουρος Καθηγητής Α.Τ.Ε.Ι.Θ.
Ταμβακίδης Σ., Δρ. Γεωπόνος, υπάλληλος ΔΥ-ΠΚΜ
Εσκιάδης Δ., Πρόεδρος Εισαγωγέων-Κατασκευαστών Γεωργικών Μηχανημάτων
Ασχονίτης Β., Γραμματέας συνεδρίου

Επιστημονική Επιτροπή

Αναστασιάδου-Παρθενίου Ε., Καθηγήτρια Α.Π.Θ.
Αντωνόπουλος Β., Καθηγητής Α.Π.Θ.
Βουγιούκας Σ., Επικ. Καθηγητής Α.Π.Θ.
Γέμτος Θ., Καθηγητής Π.Θ.
Γεωργίου Π., Λέκτορας Α.Π.Θ.
Γιαννόπουλος Σ., Καθηγητής Α.Π.Θ.
Δαλέζιος Ν., Καθηγητής Π.Θ.
Ζήσης Θ., Καθηγητής Α.Π.Θ.
Καραμούζης Δ., Καθηγητής Α.Π.Θ.
Κατσούλας Ν., Λέκτορας Π.Θ.
Κερκίδης Π., Καθηγητής Γ.Π.Α.
Κίττας Κ., Καθηγητής Π.Θ.
Λαμπρινός Γ., 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.
Παναγάκης Π., Επικ. Καθηγητής Γ.Π.Α.
Παναγιωτόπουλος Κ., Καθηγητής Α.Π.Θ.
Παπαδάκης Γ., Καθηγητής Γ.Π.Α.
Παπαμιχαήλ Δ., Καθηγητής Α.Π.Θ.
Παρισόπουλος Γ., ΕΘΙΑΓΕ
Παυλάτου-Βε Α., Αν. Καθηγήτρια Α.Π.Θ.
Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη Μ., Καθηγήτρια Π.Θ.
Τσατσαρέλης Κ., Καθηγητής Α.Π.Θ.

Κριτές Επιστημονικών Εργασιών

Αγγελοπούλου Κ.	Καλμπουρτζή Κ.	Μπόχτης Δ.
Ακριτίδης Κ.	Καλφούντζος Δ.	Μυστριώτης Α.
Αλεξίου Ι.	Κανακούδης Β.	Νάνος Γ.
Αλχανάκης Β.	Καραμούζης Δ.	Νάτσης Α.
Αλεξανδρίδης Θ.	Καραρίζος Π.	Νικήτα-Μαρτζοπούλου Χ.
Αναγνωστόπουλος Π.	Καρπούζος Δ.	Ντιούδης Π.
Αναγνωστοπούλου Χ.	Καρυδάς Χ.	Ξανθόπουλος Γ.
Αναστασιάδου-Παρθενίου Ε.	Κατσανίδης Ε.	Παναγάκης Π.
Αντωνόπουλος Β.	Κατσούλας Ν.	Παναγιωτόπουλος Κ.
Αραμπατζής Γ.	Κεραμίδας Β.	Παπαδάκης Γ.
Αργυροκαστρίτης Ι.	Κερκίδης Π.	Παπαδόπουλος Α.
Βαρζάκας Θ.	Κίττας Κ.	Παπαμιχαήλ Δ.
Βουγιούκας Σ.	Κολοκυθά Ε.	Παρισόπουλος Γ.
Βουδούρης Κ.	Κουνδουράς Σ.	Πατέρας Δ.
Βύρλας Π.	Κωστοπούλου Σ.	Παυλάτου-Βε Α.
Γέμτος Θ.	Κωτσόπουλος Θ.	Ράπτη Ε.
Γεωργίου Π.	Κωτσόπουλος Σ.	Σαπουντζής Μ.
Γιαννόπουλος Σ.	Λαζαρίδης Χ.	Σέμος Α.
Γιαννούλη Π.	Λαμπρινός Γ.	Ταμβακίδης Σ.
Γράβαλος Ι.	Λουκάς Α.	Τούλιος Λ.
Δαναλάτος Ν.	Μαλάμος Ν.	Τσατσαρέλης Κ.
Δεδούσης Α.	Μαμώλος Α.	Υψηλάντης Ι.
Δέρκας Ν.	Ματσή Θ.	Φερεντίνος Κ.
Δημητριάδης Α.	Μαυρογιαννόπουλος Γ.	Φουντάς Σ.
Διαμαντοπούλου Μ.	Μισοπολινός Ν.	Φράγκος Β.
Ελμαλόγλου Σ.	Μόσχου Δ.	Χατζηγιαννάκης Ε.
Ζαλίδης Γ.	Μπαμπατζιμόπουλος Χ.	Χρήστου-Βαρσακέλης Δ.
Ζήσης Θ.	Μπαρμπαγιάννης Ν.	Ψυχογιού Μ.
Καλαβρουζιώτης Ι.	Μπαρτζάνας Θ.	

Επικοινωνία – αλληλογραφία - πληροφορίες

Αντωνόπουλος Βασίλης

Καθηγητής Α.Π.Θ.

Γεωπονική Σχολή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης,
54124 Θεσσαλονίκη

Τηλ. 2310-998745, 2310-998716, 2310-998752

Fax: 2310-998767

E-mail: vasanton@agro.auth.gr, egme2009@gmail.com

Internet: www.egme.gr, www.egme2009.web.auth.gr

EurAgEn: www.eurageng.org

ΧΟΡΗΓΟΙ

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



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΕΡΕΥΝΩΝ



Scientact a.E.



ΑΓΡΕΚ

Κ. ΣΑΜΑΝΤΟΥΡΟΣ Α.Ε.



ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗ

Θερμικήτια – Μεταλλικά Κτίρια - Εξοπλισμός
ΒΙ.Π.Ε.Θ ΣΙΝΔΟΥ Τ.Θ. 1144, 570 22 ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
TEL. +30-2310-797001/3 FAX :+30-2310-797004
Web. www.geotherm.gr , E.mail : geotherm@otenet.gr

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ



Υδατικοί Πόροι

- ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΣΧΕΣΕΩΝ ΝΕΡΟΥ – ΑΠΟΔΟΣΗΣ
ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ ΜΕ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ SWBACROS
Χ. Καλλιτσάρη, Π. Γεωργίου και Χ. Μπαμπατζιμόπουλος 3
- ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΚΛΥΣΗΣ ΤΩΝ ΟΡΥΖΩΝΩΝ ΣΤΙΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥΣ ΤΗΣ
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΤΗΣ ΕΞΙΣΩΣΗΣ VAN GENUCHTEN
Β.Γ. Ασχονίτης και Β.Ζ. Αντωνόπουλος..... 11
- Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΥΣΤΕΡΗΣΗΣ ΣΤΗΝ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΜΕΤΩΠΙΟΥ ΔΙΑΒΡΟΧΗΣ
ΚΑΙ ΣΤΗ ΒΑΘΙΑ ΔΙΗΘΗΣΗ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΣΤΑΓΔΗΝ
ΑΡΔΕΥΣΗΣ
Ε. Διαμαντόπουλος και Σ. Ελμαλόγλου..... 19
- ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ WAVE ΣΤΙΣ
ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΤΩΝ ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΣΤΟ ΧΡΟΝΟ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΟΥ
Ι.Γ. Αλεξίου, Δ.Μ. Παπαμιχαήλ και Β.Ζ. Αντωνόπουλος 27
- ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΙΚΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΕ ΑΓΡΟ ΥΠΟ
ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΤΑΓΔΗΝ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΜΕ ΤΟ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ
SWMS_3D
Β.Ζ. Αντωνόπουλος και Σ.Α. Κωτσόπουλος..... 35
- ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ SALTMED ΓΙΑ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ
ΒΑΜΒΑΚΙΟΥ ΜΕ ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΤΑΓΔΗΝ ΑΡΔΕΥΣΗΣ
Δ. Καλφούντζος, R. Ragab, Π. Βύρλας, Π. Καλφούντζος και Δ. Πατέρας 43
- ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΑΡΔΕΥΤΙΚΗΣ ΠΡΑΚΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΟΥ
ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΑΡΤΑΣ
Ι.Α. Τσιρογιάννης και Σ. Τριάντος..... 51
- ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ WET ΣΕ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΑΝΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗΣ
ΥΓΡΑΣΙΑΣ
Γ. Κάργας και Π. Κερκίδης..... 59
- ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΕΣΣΕΡΕΙΣ ΔΙΑΔΟΧΙΚΟΥΣ ΜΗΝΕΣ ΣΤΗΝ
ΑΘΗΝΑ ΚΑΙ ΤΗΝ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥΠΟΛΗ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΕΧΝΗΤΩΝ
ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ
Κ.Π. Μουστρής, Ι.Κ. Λαρίσση και Α.Γ. Παλιατσός..... 67
- ΥΨΗΛΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΕΣ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΠΡΟΓΝΩΣΕΙΣ
ΚΑΙΡΟΥ ΓΙΑ ΑΓΡΟΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ
Ι. Πυθαρούλης..... 75
- ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΚΑΙ ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ
ΚΛΙΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΟΥ ΧΕΙΜΩΝΑ
Γ. Δημόκας, Κ. Κίττας και Μ. Tchamitchian 83
- ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ
ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ
Χ. Ράπτη, Χ. Ευαγγελίδης και Γ. Αραμπατζής 91
- ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΜΕΘΟΔΩΝ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ ΣΤΙΣ ΒΑΣΙΚΕΣ
ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΦΛΩΡΙΝΑΣ
Β.Θ. Αμπας, Ε.Α. Μπαλτάς, Δ.Μ. Παπαμιχαήλ και Π.Ε. Γεωργίου..... 99

- ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΥΔΑΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΠΙΟΝΗΣΗΣ ΔΥΟ ΠΟΙΚΙΛΙΩΝ ΗΛΙΑΝΘΟΥ ΥΠΟ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΕΛΛΕΙΜΜΑΤΙΚΗΣ ΑΡΔΕΥΣΗΣ
Ι. Αργυροκαστρίτης, Σ. Φραγκίστα, Χ. Βαμβακούλας, Θ. Δαμιανίδης, Σ. Αλεξανδρή και Π. Παπαστυλιανού..... 107
- ΜΙΚΡΟΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΑΙ ΥΔΑΤΟΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑ ΓΙΑ ΠΑΤΑΤΟΠΑΡΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΑΡΚΑΔΙΑ
Ν. Προύτσος, Α. Λιακατάς, Α. Κοτρώζου και Σ. Αλεξανδρή..... 115
- ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ (ΣΥΜΒΙΒΑΣΤΙΚΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ) ΣΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΛΙΒΑΔΙΟΥ ΛΑΡΙΣΗΣ
Π. Καρασαββίδης, Χ. Τζιμόπουλος και Χ. Ευαγγελίδης..... 123
- ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΩΝ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΧΩΡΩΝ ΜΕ ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΤΗΣ ΑΣΑΦΟΥΣ ΛΟΓΙΚΗΣ. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΛΕΚΑΝΗ ΤΟΥ ΝΕΣΤΟΥ
Χ. Τζιμόπουλος, Σ. Γιαννόπουλος και Χ. Ευαγγελίδης..... 131
- ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΤΙΚΗ ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΗΣ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΕΞΙΣΩΣΗΣ BOUSSINESQ ΓΙΑ ΤΗ ΜΗ ΜΟΝΙΜΗ ΣΤΡΑΓΓΙΣΗ
Η. Τελόγλου και Θ. Ζήσης..... 139
- ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΣΤΡΑΓΓΙΣΗΣ ΤΩΝ ΔΙΑΣΤΡΩΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ TOKSÖZ - KIRKHAM
Μ.Ε. Θεοχάρης 147
- ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΧΕΙΡΙΣΜΩΝ ΘΥΡΟΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΜΙΚΡΗΣ ΠΡΕΣΠΙΑΣ ΣΤΗ ΣΤΑΘΜΗ ΤΗΣ ΛΙΜΝΗΣ
Γ. Παρισόπουλος, Μ. Μαλακού, Γ. Σαπουντζάκης και Μ. Γιαμούρη 155
- ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ ΔΑΣΙΚΩΝ ΠΥΡΚΑΓΙΩΝ ΣΤΙΣ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΕΣ ΑΠΟΡΡΟΕΣ
Κ. Σούλης, Π. Λόντρα, Δ. Αλωνιστιώτη, Ε. Πολλάλης και Ι. Βαλιάντζας..... 163
- ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΚΛΙΜΑΤΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΩΝ ΣΤΟ ΥΔΑΤΙΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΜΙΚΡΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ ΛΕΚΑΝΩΝ ΑΠΟΡΡΟΗΣ
Κ. Χατζηπαραδείση, Κ. Τολίκα και Ν. Θεοδοσίου..... 171

Εδαφικοί Πόροι

-
- ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΣΒΕΣΤΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΛΙΠΑΝΣΗΣ ΝΡΚ ΣΤΗ ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΘΡΕΠΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΣΤΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΦΥΛΛΩΝ ΚΑΠΝΟΥ (VIRGINIA) ΣΕ ΟΞΙΝΑ ΕΔΑΦΗ ΣΤΗΝ ΘΕΣΣΑΛΙΑ
Ε. Σταυρινός, Α. Δημήτρου, Γ. Ζαλίδης, Ν. Μισσοπολινός, Γ. Μπίλας..... 181
 - ΧΡΗΣΗ ΦΥΤΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΑΠΟ ΚΑΛΑΜΙΩΝΕΣ (*Phragmites australis*) ΓΙΑ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΚΟΜΠΟΣΤΑΣ ΚΑΙ Η ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ
Α. Τουμπέλη, Α. Παυλάτου-Βε, Σ. Κωστοπούλου, Α. Μαμώλος και Κ. Καλμπουρτζή..... 189
 - ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΕΚΠΛΥΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΠΡΟΣΘΗΚΗΣ ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΩΝ ΣΤΗ ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΤΗΣ ΑΡΓΙΛΟΥ ΚΑΙ ΤΗ ΜΙΚΡΟΒΙΑΚΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ ΕΝΟΣ ΑΛΑΤΟΥΧΟΥ-ΝΑΤΡΙΩΜΕΝΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ
Σ.Κ. Κωστοπούλου και Σ. Τάτσης 197
 - ΔΟΚΙΜΗ ΤΗΣ USLE ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΚΑΛΛΙΕΡΓΗΤΙΚΗΣ ΠΡΑΚΤΙΚΗΣ
Δ. Πατέρας, Χ. Τερζούδη και Θ. Γέμτος 205
 - ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑ ΦΩΣΦΟΡΟΥ ΣΕ ΟΞΙΝΑ ΚΑΙ ΑΣΒΕΣΤΩΜΕΝΑ ΕΔΑΦΗ
Β. Αντωνιάδης, Δ. Μπαχτσεβανίδης και Φ. Χαντζής 213

- Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΕΙΣΡΟΩΝ ΤΟΥ ΑΓΡΟΤΙΚΟΥ ΟΙΚΟΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΟΜΑΛΩΝ ΚΕΦΑΛΛΗΝΙΑΣ ΣΤΗΝ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΤΩΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ
Π.Σ. Βαγγελιάτου, Θ.Ε. Σιμιτοπούλου και Κ.Χ. Αγγελόπουλος..... 221
- ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΣΤΟ ΚΡΙΘΑΡΙ
Χ. Πασχαλίδης, Β. Καββαδίας, Δ. Πετρόπουλος, Α. Κορίκη και Α. Πανδής..... 229
- ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΑΣΕΩΝ ΣΤΟ ΕΔΑΦΙΚΟ ΠΡΟΦΙΛ ΑΠΟ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟ ΦΟΡΤΙΟ
Χ. Χαλβατζής και Ι.Κ. Καλαβρουζιώτης 235

Υπολογιστικά Μοντέλα στη Γεωργική Μηχανική

- ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΙΞΩΔΟΥΣ ΡΟΗΣ ΠΑΝΩ ΑΠΟ ΠΟΛΛΑΠΛΑ ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΤΟΞΩΤΑ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑ
Δ.Α. Κατέρης, Ι.Ν. Ντάντος, Σ. Παπουτσή–Ψυχουδάκη και Β.Π. Φράγκος..... 245
- ΜΕΤΡΗΣΗ ΠΑΡΟΧΗΣ ΝΕΡΟΥ ΣΤΙΣ ΕΚΒΟΛΕΣ ΤΟΥ ΣΤΡΥΜΟΝΑ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΑΚΟΥΣΤΙΚΟΥ ΑΥΤΟΓΡΑΦΙΚΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΓΡΑΦΟΥ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΔΕΣΜΗΣ (H-ADCP)
Σ. Βουγιούκας, Δ. Παπαμιχαήλ, Π. Γεωργίου και Δ. Παπαδήμος..... 253
- ΔΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΡΟΗΣ ΑΕΡΑ ΠΑΝΩ ΑΠΟ ΔΥΟ ΔΙΑΔΟΧΙΚΕΣ ΑΓΡΟΤΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ
Ι.Ν. Ντάντος, Δ.Α. Κατέρης, Σ. Παπουτσή–Ψυχουδάκη και Β.Π. Φράγκος..... 261
- ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΡΟΗΣ & ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΣΕ ΚΤΗΝΟΤΡΟΦΙΚΟ ΚΤΙΡΙΟ
Κ. Μπαζεβάνου, Δ. Φεΐδαρος, Δ. Παπαναστασίου, Θ. Μπαρτζάνας και Κ. Κίττας 269
- ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΞΑΝΑΓΚΑΣΜΕΝΗΣ ΡΟΗΣ ΑΕΡΙΣΜΟΥ ΣΕ ΤΥΠΙΚΟ ΤΟΞΩΤΟ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟ
Θ. Μπαρτζάνας, Δ. Φεΐδαρος, Α. Μπαζεβάνου και Κ. Κίττας..... 277
- ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΚΕΝΟΥ ΔΩΜΑΤΙΟΥ ΜΕ ΦΥΤΕΜΕΝΗ ΟΡΟΦΗ
Δ. Φεΐδαρος, Κ. Μπαζεβάνου, Θ. Μπαρτζάνας και Κ. Κίττας..... 285

Τεχνολογία Περιβάλλοντος

- ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗΣ ΜΕ ΑΛΓΗ ΚΑΙ ΜΕ ΜΑΚΡΟΦΥΤΑ (DUCKWEED) ΓΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΒΟΘΡΟΛΥΜΑΤΩΝ
Φ.Η. Παπαδόπουλος και Β.Α. Τσιχριντζής 295
- ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΛΥΜΑΤΩΝ ΜΙΚΡΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ ΜΕ ΤΗ ΘΕΩΡΙΑ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΣ ΑΞΙΑΣ
Φ.Δ. Γάλλιον, Δ.Κ. Καρπούζος και Δ. Καραμούζης 303
- ΕΜΠΕΙΡΙΕΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΡΩΤΗ ΕΥΡΕΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΜΕΝΩΝ ΛΥΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΑΡΔΕΥΣΗ ΜΕΓΑΛΩΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ
Α. Πανώρας, Α. Ηλίας, Ε. Χατζηγιαννάκης, Γ. Αραμπαζής, Α. Ζδράγκας, Α. Παναγόπουλος, Σ. Σωτηράκη, Η. Παρούσης, Γ. Πανώρας, Θ. Μπόγιας, Α. Σουπίλας και Α. Νούλα..... 311
- ΑΖΩΤΟΥΧΟΣ ΛΙΠΑΝΣΗ ΒΑΜΒΑΚΙΟΥ ΜΕ ΣΥΜΒΑΤΙΚΑ ΛΙΠΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕ ΠΑΡΕΜΠΟΔΙΣΤΗ ΝΙΤΡΟΠΟΙΗΣΗΣ
Ν. Δαναλάτος, Σ. Αρχοντούλης, Δ. Μπαρτζιάλης, Α. Σιάνου, Δ. Ζαϊτούδης..... 321
- ΠΟΙΟΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΓΡΟΤΙΚΩΝ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΑΝΑΦΟΡΙΚΑ ΜΕ ΤΙΣ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΚΤΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ
Δ. Μπριασούλης, Μ. Χισκάκης, Ε. Μπάμπου, Σ. Αντίοχος και Κ. Παπάδη..... 329

- ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΤΟΥ ΑΖΩΤΟΥ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ ΚΑΙ ΣΤΑ ΦΥΤΑ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ
ΓΛΥΚΟΥ ΣΟΡΓΟΥ [*Sorghum bicolor* (L.) Moench]
Α.Β. Κουβέλας και Κ.Χ. Αγγελόπουλος..... 341
- ΕΠΙΠΕΔΑ ΚΛΙΜΑΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΚΑΙ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ
ΣΕ ΚΤΗΝΟΤΡΟΦΙΚΟ ΚΤΙΡΙΟ ΜΕ ΦΥΣΙΚΟ ΑΕΡΙΣΜΟ
Δ.Κ. Παπαναστασίου, Δ. Φεΐδαρος, Α. Μπαζεβάνου, Θ. Μπαρτζάνας και Κ. Κίττας..... 349
- ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΟΙΚΟΛΟΓΙΚΗΣ ΑΕΙΦΟΡΙΑΣ ΤΟΥ ΑΓΡΟΤΙΚΟΥ
ΟΙΚΟΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΟΜΑΛΩΝ ΚΕΦΑΛΟΝΙΑΣ
Θ.Ε. Σιμιτοπούλου, Π.Σ. Βαγγελάτου και Κ.Χ. Αγγελόπουλος..... 357

Οικονομικά Θέματα Γεωργικής Μηχανικής

- ΚΟΣΤΟΛΟΓΗΣΗ ΑΡΔΕΥΤΙΚΟΥ ΝΕΡΟΥ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ
ΖΗΤΗΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ
Α.Γ. Λιάπης, Π.Ε. Γεωργίου και Δ.Μ. Παπαμιχαήλ..... 367
- ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΩΝ ΥΙΟΘΕΤΗΣΗΣ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΕΡΩΝ
ΜΕΘΟΔΩΝ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΜΕΣΩ ΤΗΣ ΤΙΜΟΛΟΓΙΑΚΗΣ ΠΟΛΙΤΙΚΗΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ
Δ. Παγίδης και Δ. Λατινόπουλος..... 375
- ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΕΛΛΕΙΜΜΑΤΙΚΗΣ
ΑΡΔΕΥΣΗΣ
Μ. Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, Ε. Μυγδάκος και Χ. Παπανικολάου..... 383
- ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ ΕΙΚΟΝΙΚΟΥ
ΝΕΡΟΥ ΣΤΟ ΝΟΜΟ ΚΟΡΙΝΘΙΑΣ
Π. Γεωργίου και Κ. Βουδούρης..... 391
- ΤΟ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΤΡΙΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ ΣΤΗ
ΘΕΣΣΑΛΙΑ
Α. Ταγαράκης, Χ. Καραμούτης, Χ. Καβαλάρης, Ε. Μυγδάκος και Θ.Α. Γέμτος..... 399
- ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΥΜΒΑΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΒΙΟΛΟΓΙΚΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ ΛΑΧΑΝΟΥ:
ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ
Ε. Μυγδάκος, Α. Ρεζίτης, Ι. Σωτηρόπουλος και Μ. Ζώζουλα..... 407
- ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ
ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ ΣΤΟ ΝΟΜΟ ΑΙΤΩΛΟΑΚΑΡΝΑΝΙΑΣ : ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ
ΚΑΛΛΙΕΡΓΗΤΙΚΗΣ ΠΕΡΙΟΔΟΥ 2006-2007
Ε. Μυγδάκος, Α. Ρεζίτης και Χ. Κελεπούρης..... 415

Γεωργικά Μηχανήματα - Εξοπλισμοί

- ΔΟΝΗΣΕΙΣ ΣΤΟ ΚΑΘΙΣΜΑ ΤΟΥ ΧΕΙΡΙΣΤΗ ΕΛΚΥΣΤΗΡΑ ΣΕ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ
ΕΔΑΦΟΥΣ ΜΕ ΔΙΣΚΟΣΒΑΡΝΑ
*Θ. Γιαλαμάς, Δ. Κατέρης, Ι. Γράβαλος, Π. Ξυραδάκης, Ζ. Τσιρόπουλος,
Χ. Δημητριάδης, Κ.Α. Τσατσαρέλης και Θ.Α. Γέμτος*..... 425
- ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΙΑΓΝΩΣΗΣ ΒΛΑΒΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ DIESEL
Ι. Γράβαλος, Ζ. Τσιρόπουλος, Θ. Γιαλαμάς, Δ. Κατέρης και Π. Ξυραδάκης..... 433
- ΥΒΡΙΔΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΤΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ
Ι. Γράβαλος, Θ. Γιαλαμάς, Δ. Κατέρης, Ζ. Τσιρόπουλος και Π. Ξυραδάκης..... 441
- Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΣΥΓΚΟΜΙΔΗΣ ΣΤΗΝ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΤΟΥ
ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΟΥ ΑΙΘΕΡΙΟΥ ΕΛΑΙΟΥ ΑΠΟ ΤΗ ΛΕΒΑΝΤΑ
Χ.Ι. Δημητριάδης, J.L. Brighton, Ι.Φ. Κόκκορας, Μ.Ι. Κόκκορα και Θ. Γιαλαμάς..... 449
- ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΜΕ
ΔΙΣΚΟΣΒΑΡΝΑ ΚΑΙ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΛΙΠΑΝΣΗΣ
Χ.Κ. Κοτσακιώτη και Κ.Α. Τσατσαρέλης..... 457

• ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΤΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΓΕΩΡΓΙΚΟΥ ΕΛΚΥΣΤΗΡΑ <i>Α. Σβέρκου, Α. Νάτσης, Γ. Λαμπρινός και Θ.Α.Γέμτος</i>	465
• ΔΟΝΗΣΕΙΣ ΣΤΟ ΚΑΘΙΣΜΑ ΤΟΥ ΧΕΙΡΙΣΤΗ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΑΡΟΣΗΣ ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟΥΣ ΕΛΚΥΣΤΗΡΕΣ <i>Θ.Α. Γιαλαμάς, Ι. Γράβαλος, Δ. Κατέρης, Π. Ξυραδάκης, Ζ. Τσιρόπουλος, Κ.Α. Τσατσαρέλης, Δ. Μόσχου και Θ.Α. Γέμτος</i>	471
• ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΚΑΘΑΡΟΥ ΗΛΙΕΛΑΙΟΥ ΩΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΣΕ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ ΜΕ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΟΥ ΧΡΟΝΙΣΜΟΥ & ΤΟΥ ΒΑΘΟΥΣ ΕΓΧΥΣΗΣ ΚΑΙ ΧΡΗΣΗ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ <i>Α. Μπαλαφούτης, Α. Παπαγιαννοπούλου, Α. Γερονικολού, Α. Νάτσης και Γ. Παπαδάκης</i>	479
• ΕΡΕΥΝΑ ΠΕΔΙΟΥ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΓΕΩΡΓΙΚΟΥ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ <i>Σ. Πασιτόπουλος, Σ. Φουντάς και Θ. Γέμτος</i>	489
• ΟΙ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΤΟΥ ΠΡΟΩΘΗΤΗ ΓΑΙΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΜΟΧΛΕΥΣΗ ΤΟΥ ΕΛΑΦΟΥΣ ΣΤΙΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΤΟΥ ΔΑΣΟΥΣ <i>Π.Β. Καραρίζος, Ε.Α. Καραγιάννης, Ε.Ν. Λάμπου και Μ.Γ. Καλαϊτζή</i>	497
• ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΩΝ ΦΟΡΤΩΣΗΣ ΣΕ ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΤΟΥ ΔΑΣΟΥΣ <i>Ε.Α. Καραγιάννης, Π.Β. Καραρίζος, Ε.Ν. Λάμπου και Κ.Π. Ζάννης</i>	505
• ΧΡΗΣΗ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΩΝ ΣΤΙΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΤΟΥ ΔΑΣΟΥΣ <i>Ε.Α. Καραγιάννης, Π.Β. Καραρίζος, Ε.Ν. Λάμπου και Μ.Γ. Καλαϊτζή</i>	513
• ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΗΤΙΚΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ, ΣΠΟΡΑΣ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΖΙΖΑΝΙΩΝ ΣΤΗΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΤΟΥ ΗΛΙΑΝΘΟΥ <i>Χ. Καβαλάρης, Χ. Καραμούτης και Θ.Α. Γέμτος</i>	521
• ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΕΩΝ <i>Ι.Γ. Αμπατζίδης, Ι.Α. Σπανομήτρος και Δ.Χ. Χατζημπεντέλης</i>	531

Αγροτικές Κατασκευές

• ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΤΟΞΩΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ <i>Χ. Παπαϊωάννου, Ν. Κατσούλας και Κ. Κίττας</i>	541
• ΣΥΜΒΟΛΗ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΕΙΤΑΙ ΩΣ ΥΔΡΟΡΡΟΗ ΥΔΡΟΠΟΝΙΑΣ ΣΤΗ ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ <i>Γ. Ντίνας και Χ. Νικήτα-Μαρτζοπούλου</i>	549
• ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΑΝΕΜΟΠΙΕΣΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΠΕΤΑΣΜΑΤΟΣ ΕΛΑΣΤΙΚΗΣ ΣΤΗΡΙΞΗΣ <i>Α. Γιαννούλης, Α. Μυστριώτης και Δ. Μπριασούλης</i>	557
• ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΤΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟ ΜΕ ΥΒΡΙΔΙΚΟ ΗΛΙΑΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΟ ΜΕ ΥΔΡΟΡΡΟΗ ΥΔΡΟΠΟΝΙΑΣ <i>Γ. Ντίνας, Ε. Καρανίκας και Χ. Νικήτα-Μαρτζοπούλου</i>	567
• ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΩΝ ΚΑΙ ΣΤΗΡΙΞΗΣ ΥΔΡΟΠΟΝΙΚΩΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ <i>Κ. Κίττας, Ν. Κατσούλας, Θ. Μπαρτζάνας, Χ. Λύκας και Μ. Τσετσελίδου</i>	575

- ΧΟΙΡΟΣΤΑΣΙΟΥ ΚΑΙ ΕΛΑΙΟΤΡΙΒΕΙΟΥ ΣΕ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΕΣ ΕΦΑΠΙΑΣ ΠΛΗΡΩΣΗΣ (BATCH DIGESTERS) ΣΤΗ ΜΕΣΟΦΙΛΗ ΖΩΝΗ
Π. Κούγιας, Α. Βέργος, Θ. Κωτσόπουλος και Γ. Μαρτζόπουλος 583

Νέες Τεχνολογίες στη Γεωργική Μηχανική

- ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΝΑΜΟΝΗΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΜΕΤΡΗΣΗ ΚΑΙ ΤΑΥΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΠΙΤΡΑΠΕΖΙΩΝ ΣΤΑΦΥΛΙΩΝ ΣΤΟΝ ΑΓΡΟ
Ι.Γ. Αμπατζίδης και Σ.Γ. Βουγιούκας..... 593
- ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΚΑΙ ΧΩΡΙΚΗ ΠΑΡΑΛΛΑΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΕ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΜΗΛΙΑΣ ΜΕ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΑΝΘΟΦΟΡΙΑΣ ΜΕΣΩ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ
Α.Α. Κουτσοστάθης, Δ. Μπόχτης, Α. Αγγελόπουλου, Σπ. Φουντάς και Θ. Γέμτος 601
- ΒΑΘΜΟΝΗΣΗ ΚΑΙ ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ ΣΠΟΡΟΦΥΤΩΝ ΤΟΜΑΤΑΣ
Κ. Πεπονάκης, Ν. Κατσούλας και Κ. Κίττας 609
- ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΔΟΣΙΑΚΗΣ ΣΥΓΚΟΜΙΔΗΣ ΝΩΠΩΝ ΚΑΡΠΩΝ ΟΠΩΡΟΦΟΡΩΝ ΔΕΝΔΡΩΝ
Ι.Γ. Αμπατζίδης και Σ.Γ. Βουγιούκας..... 617
- ΚΑΤΑΠΟΛΕΜΗΣΗ ΖΙΖΑΝΙΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΙΑ: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΠΡΑΚΤΙΚΩΝ ΓΕΩΡΓΙΑΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ
Σ. Φουντάς, Κ. Μπουλουλή, Κ. Αγγελοπούλου, Ν. Γιαννόπουλος, Θ. Γέμτος, Γ. Νάνος, Α. Παρασκευόπουλος και Μ. Γαλάνης..... 625
- ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΥΤΟΜΑΤΗΣ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΑΣΘΕΝΕΙΩΝ ΦΥΤΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΣΥΓΚΕΡΑΣΜΟΥ ΠΟΛΥΑΙΣΘΗΤΗΡΙΑΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ
Δ. Μόσχου..... 633
- ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ ΚΟΜΒΩΝ ΣΕ ΓΕΩΡΓΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΒΑΣΙΖΟΜΕΝΗ ΣΤΟΝ LGR ΑΛΓΟΡΙΘΜΟ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ
Α. Ξενάκης, Α. Περλεπές, Π. Κίκiras και Γ. Σταμούλης..... 641
- ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΤΟΥ Π. ΣΤΡΥΜΟΝΑ ΜΕ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟΣΤΡΕΦΗ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ
Χ. Καρυδάς, Β. Αντωνόπουλος, Γ. Ζαλίδης, Δ. Παπαμιχαήλ και Ν. Σύλλαίος..... 649
- ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΓΕΩΡΓΙΑΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΣΕ ΑΜΠΕΛΩΝΑ
Γ. Στουγιάννης, Α. Περλεπές, Σ. Φουντάς, Θ.Α. Γέμτος και Π. Κίκiras..... 657
- ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΝΕΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΣΤΗΝ ΕΦΟΔΙΑΣΤΙΚΗ ΑΛΥΣΙΔΑ ΒΙΟΜΑΖΑΣ
Δ.Δ. Μπόχτης, S.G. Sørensen, O. Green, A. Klose και K.A. Andersen..... 665
- ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΕΥΡΩΣΤΩΝ ΕΛΕΓΚΤΩΝ ΣΕ ΑΝΟΙΚΤΑ ΑΡΔΕΥΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ
Α.Γ. Σολδάτος, Σ.Γ. Σαφαρίδης και Κ.Γ. Αρβανίτης 673
- ΧΡΗΣΗ ΑΝΙΧΝΕΥΤΗ ΕΓΓΥΣ ΥΠΕΡΥΘΡΟΥ ΦΩΤΟΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΤΟΥ ΣΤΑΔΙΟΥ ΩΡΙΜΟΤΗΤΑΣ ΤΗΣ ΑΡΑΧΙΔΑΣ
Α. Περιστερόπουλος, Γ. Βελλίδης, Σ. Φουντάς και Θ.Α. Γέμτος..... 681

Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και Εξοικονόμηση Ενέργειας στη Γεωργία

- ΤΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΤΡΙΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ ΣΤΗ ΘΕΣΣΑΛΙΑ
Χ. Καβαλάρης, Χ. Καραμούτης, Α. Ταγαράκης και Θ.Α. Γέμτος 691

• Η ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΡΙΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ ΣΤΗ ΘΕΣΣΑΛΙΑ <i>Θ.Α. Γέμτος, Χρ. Καβαλάρης, Χρ. Καραμούτης και Σπ. Φουντάς</i>	699
• ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ ΣΟΡΓΟΥ ΣΤΗΝ ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΕΛΛΑΔΑ <i>Χ. Παπανικολάου και Μ. Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη</i>	707
• ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΓΛΥΚΟΥ ΣΟΡΓΟΥ ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΒΙΟΜΑΖΑΣ <i>Κ.Χ. Αγγελόπουλος, Α.Β. Κούβελας, Α. Καμπράνης, Α.Ν. Θεοδωρακοπούλου</i>	715
• ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΑΠΟ ΤΥΡΟΓΑΛΑ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΕΝΟ ΜΕ ΥΓΡΑ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΥ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΧΟΙΡΟΣΤΑΣΙΟΥ <i>Αν. Κακούρος, Δ. Γεωργακάκης και Β. Φούντα</i>	721
• ΝΕΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΨΥΚΤΙΚΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ ΓΙΑ ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟ <i>Α. Λεβέντη και Γρ. Λαμπρινός</i>	729
• ΕΠΟΧΙΑΚΗ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΜΕ ΑΝΤΛΙΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ <i>Μ. Χιονίδης και Γρ. Λαμπρινός</i>	737

Μετασυλλεκτική – Μετασυγκομιστική Τεχνολογία

• Ο ΡΟΛΟΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ ΣΤΗ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ «ΕΛΑΧΙΣΤΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΜΕΝΗΣ» ΠΡΑΣΙΝΗΣ ΠΙΠΕΡΙΑΣ <i>Α. Χριστόπουλος, Κ. Ρεκούμη και Ε. Μανωλοπούλου</i>	747
• ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΓΚΟΜΙΔΗΣ ΝΩΠΩΝ ΚΑΡΠΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟΥ ΨΕΥΔΟΚΑΡΠΟΥ <i>Γ.Δ. Νάνος, Στ. Λεοντόπουλος και Θ. Γέμτος</i>	755
• Η ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΩΝ ΕΡΓΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΥΠΟΒΑΘΜΙΣΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΜΗΛΩΝ ΑΠΟ ΜΩΛΩΠΙΣΜΟΥΣ <i>Γ.Δ. Νάνος, Σ. Λεοντόπουλος και Θ. Γέμτος</i>	763
• ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΤΩΝ ΧΡΩΜΑΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΞΗΡΑΝΣΗ ΜΕ ΘΕΡΜΟ ΑΕΡΑ ΕΔΩΔΙΜΟΥ ΜΑΝΙΤΑΡΙΟΥ <i>AGARICUS BISPORUS</i> <i>Θ. Σωτηριάδης, Ε. Π. Αγγλογάλλος, Γ. Ξανθόπουλος και Γρ. Λαμπρινός</i>	771
• ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΔΥΝΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΤΩΝ ΤΡΟΦΙΜΩΝ ΣΕ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΗ ΔΙΑΚΙΝΗΣΗΣ ΑΛΙΕΥΜΑΤΩΝ <i>Ε.Γ. Χατζής, Κ.Δ. Σιαφαρίκας και Στ. Ψυχογιού</i>	779
• ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΟΥ ΧΡΩΜΑΤΟΣ «ΕΛΑΧΙΣΤΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΜΕΝΩΝ» ΜΗΛΩΝ <i>GOLDEN DELICIOUS</i> ΜΕ ΑΝΑΛΥΣΗ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΕΙΚΟΝΑΣ <i>Ε.Γ. Χατζής, Ε. Μανωλοπούλου, Ε. Αραβαντινός-Καρλάτος, Γ. Ξανθόπουλος και Γρ. Λαμπρινός</i>	787
• ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΔΙΑΧΥΣΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΑΤΟΜΙΚΗ ΞΗΡΑΝΣΗ ΜΑΝΙΤΑΡΙΩΝ <i>AGARICUS BISPORUS</i> <i>Ε-Π. Αγγλογάλλος, Θ. Σωτηριάδης, Γ. Ξανθόπουλος και Γρ. Λαμπρινός</i>	795
• ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΞΗΡΑΝΣΗΣ ΤΩΝ ΚΑΛΑΜΙΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥΣ ΩΣ ΒΙΟΜΑΖΑ <i>Α.Ν. Δημητριάδης</i>	805
• ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ ΣΤΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΟΥ ΧΡΩΜΑΤΟΣ ΤΡΙΩΝ ΣΤΕΛΕΧΩΝ ΜΑΝΙΤΑΡΙΟΥ <i>AGARICUS BISPORUS</i> <i>Α. Κέφη, Γ. Ξανθόπουλος, Ε. Μανωλοπούλου και Γρ. Λαμπρινός</i>	815

- ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΣΤΑΔΙΟΥ ΩΡΙΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ
ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ ΣΤΗΝ ΠΟΙΟΤΗΤΑ «ΕΛΑΧΙΣΤΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΜΕΝΟΥ ΜΗΛΟΥ»
Delicious Pilafa
Ε. Μανωλοπούλου, Γρ. Λαμπρινός, Γ. Ξανθόπουλος, Ε. Χατζής και
Ε. Αραβαντινός–Καρλάτος..... 823
- ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΝΤΗΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΤΟΜΑΤΑΣ ΒΙΟΛΟΓΙΚΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ
Στ. Ψυχογιού, Α. Κατσογιάννη, Ε. Μανωλοπούλου, Γ. Ξανθόπουλος
Ε. Χατζής και Γρ. Λαμπρινός 831
- ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΜΑΖΑΣ ΝΩΠΗΣ ΤΟΜΑΤΑΣ ΒΙΟΛΟΓΙΚΗΣ
ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕ ΨΥΞΗ
Στ. Ψυχογιού, Α. Κατσογιάννη, Ε. Μανωλοπούλου, Γ. Ξανθόπουλος και
Γρ. Λαμπρινός..... 841
- ΤΕΧΝΗΤΗ ΞΗΡΑΝΣΗ ΚΑΛΛΙΕΡΓΟΥΜΕΝΩΝ ΛΕΥΚΩΝ ΜΑΝΙΤΑΡΙΩΝ
AGARICUS BISPORUS ΣΕ ΠΟΛΛΑΠΛΕΣ ΣΤΡΩΣΕΙΣ
Θ. Σωτηριάδης, Π–Ε Αγγλογάλλος, Γ. Ξανθόπουλος και Γρ. Λαμπρινός 849

Ευρετήριο Συγγραφέων **857**

Θεματικό Ευρετήριο **863**

6^ο Πανελλήνιο Συνέδριο
της Εταιρείας Γεωργικών Μηχανικών Ελλάδος



ΥΔΑΤΙΚΟΙ ΠΟΡΟΙ

ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΣΧΕΣΕΩΝ ΝΕΡΟΥ – ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ ΜΕ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ SWBACROS

Χ. Καλλιτσάρη¹, Π. Γεωργίου² και Χ. Μπαμπατζιμόπουλος³

Τομέας Εγγείων Βελτιώσεων, Εδαφολογίας και Γεωργικής Μηχανικής,
Γεωπονική Σχολή Α.Π.Θ., 54124 Θεσσαλονίκη

E-mails: ¹xkallit@yahoo.gr, ²pantaz@agro.auth.gr, ³babajim@agro.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της εργασίας είναι η ορθολογική χρήση του αρδευτικού νερού με στόχο την ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων έλλειψής του στην απόδοση των καλλιεργειών. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται σχέσεις απόδοσης των καλλιεργειών σε συνάρτηση με τη διαθεσιμότητα νερού, οι οποίες περιλαμβάνουν την επίδραση της ευαισθησίας (stress) στην έλλειψη νερού της καλλιέργειας. Στην εργασία αυτή χρησιμοποιούνται τρεις σχέσεις για τον υπολογισμό της απόδοσης μιας καλλιέργειας βαμβακιού κάτω από συνθήκες επάρκειας και ανεπάρκειας νερού: η κλασική σχέση του Jensen του γενικού πολλαπλασιαστικού μοντέλου, το αθροιστικό και το πολλαπλασιαστικό μοντέλο των Doorenbos and Kassam. Παράλληλα πραγματοποιείται συγκριτική αξιολόγησή τους. Για την εφαρμογή των σχέσεων χρησιμοποιείται το μοντέλο SWBACROS.

Λέξεις κλειδιά: σχέσεις νερού - απόδοσης καλλιεργειών, διαχείριση αρδευτικού νερού, μοντέλο SWBACROS.

CRITICAL ANALYSIS OF YIELD RESPONSE TO WATER RELATIONSHIPS USING THE MATHEMATICAL MODEL SWBACROS

C. Kallitsari¹, P. Georgiou² and C. Babajimopoulos³

Department of Hydraulics, Soil Science and Agricultural Engineering,
Faculty of Agriculture, Aristotle University, Thessaloniki 54124, Greece
E-mails: ¹xkallit@yahoo.gr, ²pantaz@agro.auth.gr, ³babajim@agro.auth.gr

ABSTRACT

Aim of the paper is the optimal use of irrigation water, minimizing the results of water deficits toward yield. For this reason relationships between crop yield and water supply were used which include the effect of both timing and quantities of irrigation. In this paper, three functions are used to estimate yield for a crop of cotton over a wide range of deficit and stress conditions: (a) the general multiplicative power function form proposed by Jensen (1968), (b) the additive model that is based in the Doorenbos and Kassam model and (c) the multiplicative model that is based in the Doorenbos and Kassam model. Furthermore, a comparative analysis of the functions was performed. For this reason the mathematical model SWBACROS (Simulation of the Water Balance of a CROpped Soil) is applied.

Key words: crop water production functions, irrigation water management, SWBACROS model

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αρδευόμενη γεωργία κατέχει σήμερα το μεγαλύτερο μερίδιο στην παγκόσμια κατανάλωση νερού. Στις μεσογειακές χώρες όπως και στην Ελλάδα, η κατανάλωση νερού στη γεωργία πλησιάζει το 80-85% του νερού καλής ποιότητας. Το γεγονός αυτό καθιστά επιτακτική την ανάγκη της ορθολογικής διαχείρισης του νερού που χρησιμοποιείται για αρδευτικούς σκοπούς. Η αύξηση της αρδευτικής αποδοτικότητας και ο ορθολογικός προγραμματισμός των αρδεύσεων κυρίως σε περιόδους ανεπάρκειας συμβάλλει στην εξοικονόμηση σημαντικής ποσότητας νερού, γεγονός που μπορεί να επιτευχθεί όταν είναι γνωστά οι απαιτήσεις σε νερό της καλλιέργειας και η ευαισθησία της στην έλλειψη νερού κατά τη διάρκεια διαφορετικών σταδίων της βλαστικής περιόδου. Για το λόγο αυτό, δημιουργήθηκε η αναγκαιότητα διερεύνησης σχέσεων απόδοσης καλλιεργειών σε συνάρτηση με τη διαθεσιμότητα νερού. Κατά το παρελθόν, παρουσιάστηκαν διάφορες σχέσεις, ανάμεσα στις οποίες ξεχωρίζουν οι σχέσεις του Jensen (1968) και των Doorenbos and Kassam (1979), οι οποίες έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως (Tsakiris, 1982; Zhang and Oweis, 1999; Γεωργίου, 2004; Georgiou et al., 2006; Καλλιτσάρη, 2009).

Σκοπός της εργασίας είναι η ορθολογική χρήση του αρδευτικού νερού με στόχο την ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων έλλειψής του στην απόδοση των καλλιεργειών. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται σχέσεις απόδοσης των καλλιεργειών σε συνάρτηση με τη διαθεσιμότητα νερού, οι οποίες περιλαμβάνουν την επίδραση της ευαισθησίας (stress) στην έλλειψη νερού της καλλιέργειας. Στην εργασία αυτή χρησιμοποιούνται τρεις σχέσεις: η κλασική σχέση του Jensen του γενικού πολλαπλασιαστικού μοντέλου, το αθροιστικό μοντέλο των Doorenbos and Kassam και το πολλαπλασιαστικό μοντέλο των Doorenbos and Kassam. Οι παραπάνω σχέσεις χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της απόδοσης μιας καλλιέργειας βαμβακιού κάτω από συνθήκες επάρκειας και ανεπάρκειας νερού και γίνεται συγκριτική αξιολόγησή τους. Για την εφαρμογή των σχέσεων χρησιμοποιείται το μοντέλο SWBACROS (Babajimopoulos et al., 1995).

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ SWBACROS

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το μαθηματικό μοντέλο SWBACROS, το οποίο επιλύει την εξίσωση Richards, λαμβάνοντας υπόψη τη δράση του ριζικού συστήματος των φυτών (Babajimopoulos et al., 1995, Μπαμπατζιμόπουλος κ.αλ., 1995, Γεωργούσης, 2007, Καλλιτσάρη, 2009):

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

όπου: $C(h)$ υδραυλική χωρητικότητα του εδάφους, $(d\theta/dh)$ [L^{-1}], θ εδαφική υγρασία κατ' όγκο [$L^3 L^{-3}$], h ύψος πίεσης του εδαφικού νερού [L], t χρόνος [T], z κατακόρυφη συντεταγμένη με θετική φορά προς τα κάτω και με αρχή την επιφάνεια του εδάφους [L], $K(\theta)$ ακόρεστη υδραυλική αγωγιμότητα [LT^{-1}], $S(h, z, t)$ πρόσληψη του νερού από τις ρίζες του φυτού [T^{-1}].

Στο μοντέλο SWBACROS η εξίσωση (1) επιλύεται με τη μέθοδο πρόβλεψης-διόρθωσης των Douglas-Jones (Babajimopoulos, 1991). Λεπτομερής περιγραφή του μοντέλου δίνεται από τους Babajimopoulos et al., 1995 και Μπαμπατζιμόπουλος κ.αλ., 1995.

Σημειώνεται ότι η ακόρεστη υδραυλική αγωγιμότητα και η υδραυλική χωρητικότητα προσδιορίζονται με τη βοήθεια των σχέσεων του Van Genuchten (1980). Ο όρος $S(h, z, t)$ της εξίσωσης (1) προσεγγίζεται ως εξής (Belmans et al., 1983):

$$S(h, z, t) = a(h)S_{\max}(z, t) \quad (2)$$

όπου: $a(h)$ μία αδιάστατη συνάρτηση του ύψους πίεσης του εδαφικού νερού, $S_{\max}(z, t)$ μέγιστη δυνατή πρόσληψη νερού από τις ρίζες. Η τιμή της πρόσληψης του νερού από τις ρίζες του φυτού, S , αυξάνεται γραμμικά για $0 < |h| \leq h_1$, παίρνει τη μέγιστη τιμή της για $h_1 < |h| \leq h_2$ και μειώνεται γραμμικά για $h_2 < |h| \leq h_3$.

Η μέγιστη διαπνοή T_m , υπολογίζεται από τη σχέση:

$$T_m = ET_m - E_m \quad (3)$$

όπου: ET_m μέγιστη εξατμισοδιαπνοή που υπολογίζεται με τη μέθοδο FAO Penman - Monteith και E_m μέγιστη εξάτμιση από την επιφάνεια του εδάφους.

Η μέγιστη εξατμισοδιαπνοή, ET_m , υπολογίζεται με την αναθεωρημένη μέθοδο FAO Penman - Monteith και με τη βοήθεια των αντίστοιχων φυτικών συντελεστών. (Allen et al., 1998; Παπαζαφειρίου, 1999; Γεωργίου και Παπαμιχαήλ, 2008).

$$ET_m = k_c \frac{0.408 * \Delta * (R_n - G) + \gamma * \frac{900}{T + 273} * U_2 * (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma * (1 + 0.34 * U_2)} \quad (4)$$

όπου: ET_m εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας αναφοράς (mm day^{-1}), Δ κλίση της καμπύλης στη σχέση πίεσης κορεσμού υδρατμών και θερμοκρασίας του αέρα ($\text{kPa}^\circ\text{C}^{-1}$), T μέση ημερήσια θερμοκρασία σε ύψος 2m ($^\circ\text{C}$), γ ψυχομετρική σταθερά ($\text{kPa}/^\circ\text{C}$), G κατακόρυφη μεταφορά θερμότητας στο έδαφος ($\text{MJ m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$), u_2 μέση ταχύτητα ανέμου σε ύψος 2 μέτρων από την επιφάνεια του εδάφους (m/sec), e_a πίεση κορεσμού υδρατμών (kPa), e_d πραγματική πίεση υδρατμών της ατμόσφαιρας που αντιστοιχεί στη θερμοκρασία του σημείου δρόσου (kPa), R_n μέση ημερήσια καθαρή ακτινοβολία ($\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$).

Η μέγιστη και η πραγματική εξάτμιση από την επιφάνεια του εδάφους υπολογίζεται από την σχέση των Al-Khafaf et al. (1978).

Το μοντέλο έχει δοκιμαστεί σε διάφορες συνθήκες και καλλιέργειες με πολύ καλά αποτελέσματα (Babajimopoulos et al., 1995; Μπίλας, 1995; Γεωργούσης, 2007; Καλλιτσάρη, 2009).

2.2. ΣΧΕΣΕΙΣ ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΝΕΡΟΥ - ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ

Σκοπός της εργασίας είναι να συμβάλει στην ορθολογική χρήση των υδατικών πόρων, μελετώντας σχέσεις που συνδέουν τη διαθεσιμότητα του νερού και την απόδοση των καλλιεργειών. Έλλειψη νερού στους ιστούς προκαλεί ευαισθησία (water stress), που συνοδεύεται από φυσιολογικές αντιδράσεις, που τελικά προκαλούν μειωμένη παραγωγή ξηρής φυτικής ουσίας. Η μέγιστη παραγωγή βιομάζας δεν μπορεί να επιτευχθεί από τη στιγμή που εμφανίζονται περίοδοι έλλειψης νερού κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται σχέσεις απόδοσης των καλλιεργειών σε σχέση με τη διαθεσιμότητα νερού, οι οποίες περικλείουν την επίδραση της ευαισθησίας (stress) στην έλλειψη νερού της καλλιέργειας. Η συνδυασμένη επίδραση της ευαισθησίας στην έλλειψη νερού των διαφόρων περιόδων ανάπτυξης, μπορεί να λειτουργήσει είτε προσθετικά, είτε πολλαπλασιαστικά. Οι πιο διαδεδομένες και ευρέως χρησιμοποιούμενες σχέσεις είναι του Jensen (1968) και των Doorenbos and Kassam (1979).

Σύμφωνα με τον Jensen (1968), η σχετική απόδοση για τις μη χορτοδοτικές καλλιέργειες, προσδιορίζεται από το γενικό πολλαπλασιαστικό μοντέλο της σχέσης:

$$\frac{Y_a}{Y_m} = \prod_{i=1}^n \left(\frac{ET_a}{ET_m} \right)^{\lambda_i} \quad (5)$$

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 (mm) κατά το στάδιο i , ET_m μέγιστη εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας (mm) κατά το στάδιο i , λ_i συντελεστής ευαισθησίας της καλλιέργειας κατά το στάδιο i και n συνολικός αριθμός των σταδίων. Το μέγεθος του συντελεστή ευαισθησίας λ για ένα συγκεκριμένο στάδιο ανάπτυξης εξαρτάται από την ευαισθησία της καλλιέργειας στην έλλειψη νερού στο στάδιο αυτό.

Οι Doorenbos and Kassam (1979) χώρισαν τη βλαστική περίοδο σε πέντε περιόδους ανάπτυξης: την εγκατάσταση (establishment), τη βλάστηση (vegetative), την ανθοφορία (flowering), τη σχηματοποίηση των καρπών (ή διαμόρφωση της παραγωγής) (yield formation) και την ωρίμανση (ripening). Η απόκριση της καλλιέργειας σε σχέση με τη διαθεσιμότητα νερού περιγράφεται από το συντελεστή ανταπόκρισης της παραγωγής k_y . Η εκτίμηση των επιπτώσεων στην απόδοση της περιορισμένης διαθεσιμότητας νερού, σύμφωνα με τους Doorenbos and Kassam (1979) είναι:

$$Y_a/Y_m = 1 - k_y(1 - ET_a/ET_m) \quad (6)$$

όπου: Y_a , Y_m , ET_a , ET_m όπως ορίστηκαν προηγούμενα και k_y ο αδιάστατος συντελεστής ανταπόκρισης της παραγωγής, που αντικατοπτρίζει την επίδραση της διαθεσιμότητας νερού στην παραγωγή. Τιμές του συντελεστή ανταπόκρισης, k_y , δόθηκαν για διάφορες καλλιέργειες, για ολόκληρη τη βλαστική περίοδο και για επιμέρους περιόδους ανάπτυξης, από τους Doorenbos and Kassam (Doorenbos and Kassam, 1979; Παπαζαφειρίου, 1999). Οι τιμές του k_y υπολογίστηκαν με τις παραδοχές ότι: 1) η σχέση μεταξύ του Y_a/Y_m και ET_a/ET_m είναι γραμμική και 2) ισχύει για έλλειμμα νερού μέχρι 50%, όταν δηλαδή $(1 - ET_a/ET_m) \leq 0.5$. Από την ανάλυση συσχέτισης μεταξύ των τιμών k_y και λ προκύπτει η πολυωνυμική σχέση υπολογισμού του λ (Tsakiris, 1982; Kipkorir and Raes, 2002; Γεωργίου, 2004; Georgiou et al., 2006; Γεωργίου και Παπαμιχαήλ, 2007).

Στην παρούσα εργασία προσδιορίζεται η σχετική απόδοσης μίας καλλιέργειας βαμβακιού σε συνθήκες επάρκειας και ανεπάρκειας νερού, με τη βοήθεια τριών σχέσεων. Η πρώτη είναι η κλασική σχέση του Jensen (1968), του γενικού πολλαπλασιαστικού μοντέλου, δηλαδή η σχέση (5). Η δεύτερη είναι το προσθετικό μοντέλο της σχέσης των Doorenbos and Kassam (1979), δηλαδή η σχέση:

$$\frac{Y_a}{Y_m} = 1 - \sum_{i=1}^N k_{yi} \left(1 - \frac{ET_a}{ET_m} \right)_i \quad (7)$$

Η τρίτη είναι το πολλαπλασιαστικό μοντέλο της σχέσης των Doorenbos and Kassam (1979), δηλαδή η σχέση:

$$\frac{Y_a}{Y_m} = \prod_{i=1}^N \left[1 - k_{yi} \left(1 - \frac{ET_a}{ET_m} \right)_i \right] \quad (8)$$

Οι σχέσεις αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο σχεδιασμό και στη διαχείριση του αρδευτικού νερού, καθώς επίσης για την πρόβλεψη και την αποτίμηση των επιπτώσεων έλλειψής του στην απόδοση μιας καλλιέργειας.

2.3. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε το μαθηματικό μοντέλο SWBACROS, το οποίο εφαρμόστηκε σε ένα τυπικό αγροτεμάχιο της πεδιάδας της Θεσσαλονίκης και ειδικότερα στην περιοχή του Τ.Ο.Ε.Β. Χαλάστρας – Καλοχωρίου.

Η προσομοίωση του υδατικού ισοζυγίου ξεκινά με την εγκατάσταση στην περιοχή μελέτης της καλλιέργειας του βαμβακιού (13^η Μαΐου 1994) και λήγει με τη

συγκομιδή της (10^η Οκτωβρίου 1994). Τα μετεωρολογικά δεδομένα μετρήθηκαν στο μετεωρολογικό σταθμό του Ινστιτούτου Εγγείων Βελτιώσεων. Η ανάλυση στα πλαίσια της εργασίας αυτής πραγματοποιήθηκε σε ένα έδαφος με δύο στρώσεις (0-90cm και 90-200cm), (Πίνακας 1). Για την γνώση των εδαφικών παραμέτρων χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα βιβλιογραφίας που αφορούν την περιοχή μελέτης (Μπίλας, 1995, Γεωργούσης, 2007).

Πίνακας 1. Μηχανική σύσταση του εδάφους.

Στρώση	θ_{fc} (cm ³ /cm ³)	θ_{rwp} (cm ³ /cm ³)	Άμμος %	Ιλύς %	Άργιλος %	Κατηγορία	Χαρακτηρισμός
1	0.39	0.165	26.4	48	25.6	L	Πηλώδες
2	0.18	0.043	36.4	50	13.6	SiL	Ιλυοπηλώδες

Οι τιμές των παραμέτρων της εξίσωσης Van Genuchten (1980) (θ_s , θ_r , a , n) προσδιορίστηκαν με μία μη γραμμική ανάλυση παλινδρόμησης (Van Genuchten and Nielsen, 1985) και παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2. Τιμές των παραμέτρων της χαρακτηριστικής καμπύλης υγρασίας.

Στρώση	Μετρημένες τιμές		Προσαρμοσμένες τιμές			n
	θ_s (cm ³ /cm ³)	θ_r (cm ³ /cm ³)	θ_s (cm ³ /cm ³)	θ_r (cm ³ /cm ³)	a (m ⁻¹)	
1	0.54	0.20	0.532	0.165	0.6551	1.5602
2	0.54	0.05	0.540	0.043	1.6001	1.7893

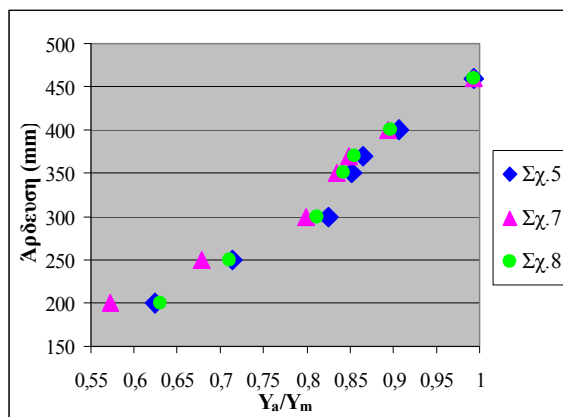
Όσον αφορά τον όρο S, η τιμή h_1 υπολογίζεται από τη χαρακτηριστική καμπύλη υγρασίας για περιεκτικότητα του εδάφους σε αέρα 0.05cm³ cm⁻³, η τιμή της $h_2 = -6$ m ενώ η τιμή της $h_3 = -150$ m.

3. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

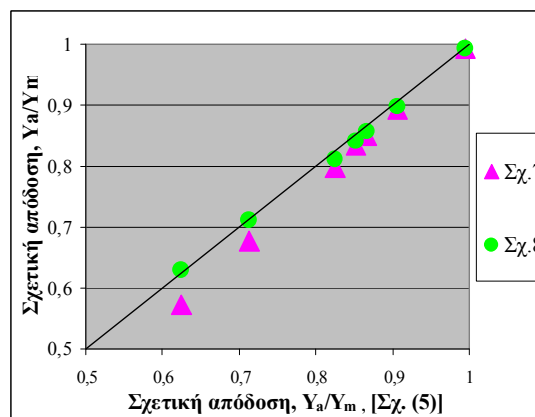
Το μαθηματικό μοντέλο SWBACROS χρησιμοποιήθηκε για την πρόβλεψη της σχετικής απόδοσης με διάφορα σενάρια άρδευσης, σε συνθήκες επάρκειας και ανεπάρκειας νερού για διάφορες τιμές της σχετικής εξατμισοδιαπνοής ET_a/ET_m . Η ποσοτικοποίηση των επιπτώσεων της έλλειψης νερού στα διάφορα στάδια ανάπτυξης της καλλιέργειας και η συνδυασμένη επίδρασή τους στην απόδοσή της πραγματοποιείται με τη βοήθεια των τριών σχέσεων (5), (7) και (8). Στην περίπτωση ελλειμματικών αρδεύσεων σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η βελτιστοποίηση των ελλείψεων νερού, δηλαδή η εφαρμογή κατάλληλης ποσότητας νερού την κατάλληλη χρονική στιγμή. Οι υπό μελέτη σχέσεις λαμβάνουν υπόψη την ευαισθησία των καλλιεργειών μέσω των συντελεστών ευαισθησίας και τη συνδυασμένη επίδραση της ευαισθησίας με την πολλαπλασιαστική ή αθροιστική μορφή τους.

Στο υπό μελέτη αγροτεμάχιο εξετάστηκαν πιθανά σενάρια διαχείρισης του αρδευτικού νερού για άρδευση ίση με 200, 250, 300, 350, 370, 400 και 460mm. Σε κάθε σενάριο διαφέρει η ημερομηνία άρδευσης, ο αριθμός των αρδεύσεων και οι δόσεις άρδευσης.

Το μοντέλο εκτελείται για κάθε σενάριο άρδευσης τρεις φορές, χρησιμοποιώντας κάθε φορά διαφορετική σχέση πρόβλεψης της σχετικής απόδοσης. Οι τιμές που προκύπτουν από την εφαρμογή των σχέσεων (5), (7) και (8) για κάθε σενάριο, παρουσιάζονται γραφικά στο Σχήμα 1. Στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται επίσης γραφικά η σύγκριση ανάμεσα στις τιμές της σχετικής απόδοσης, όπως υπολογίστηκαν από τις σχέσεις (5), (7) και (8) με την εκτέλεση του μοντέλου.



Σχήμα 1. Σχετική απόδοση καλλιέργειας για διάφορες ποσότητες νερού εφαρμόζοντας τις σχέσεις (5),(7),(8).



Σχήμα 2. Σύγκριση ανάμεσα στις τιμές της σχετικής απόδοσης όπως υπολογίζονται από τις σχέσεις (5),(7),(8).

Αρχικά εξετάζεται η περίπτωση **επάρκειας νερού**, όταν εφαρμόζεται στο αγροτεμάχιο ποσότητα αρδευτικού νερού ίση με **460mm**. Σημειώνεται ότι το μεγαλύτερο τμήμα του εφαρμόστηκε στην καλλιέργεια κατά το πιο ευαίσθητο στάδιο στην έλλειψη νερού, δηλαδή κατά την περίοδο ανθοφορίας και σχηματισμού καρπών. Στην περίπτωση αυτή, η σχετική απόδοση είναι πολύ υψηλή (σχεδόν 100%) και οι τρεις σχέσεις προσδιορισμού της σχετικής απόδοσης δεν παρουσιάζουν διαφοροποιήσεις.

Στην περίπτωση **μικρής έλλειψη νερού**, όταν δηλαδή η καλλιέργεια δέχεται κατά την καλλιεργητική περίοδο **400mm** αρδευτικού νερού, η προσθετική και η πολλαπλασιαστική σχέση των Doorenbos and Kassam δίνουν παρόμοια αποτελέσματα σχετικής απόδοσης (89%), ενώ η πολλαπλασιαστική σχέση του Jensen οδηγεί σε λίγο υψηλότερες τιμές (91%).

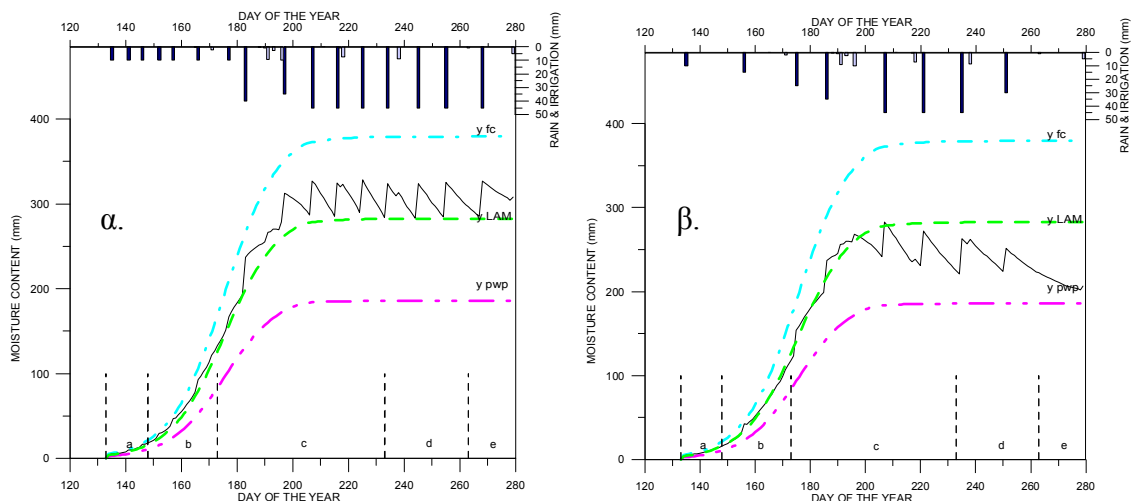
Όταν παρατηρείται **σημαντική έλλειψη νερού (300-370mm)**, οι τρεις σχέσεις παρουσιάζουν διαφοροποιήσεις. Η πολλαπλασιαστική σχέση του Jensen οδηγεί πάντα σε υψηλότερες τιμές σχετικής απόδοσης (82-87%), ακολουθεί η πολλαπλασιαστική σχέση των Doorenbos and Kassam (81-86%), ενώ η προσθετική σχέση των Doorenbos and Kassam οδηγεί πάντα σε μικρότερες τιμές (80-85%).

Στην περίπτωση που η έλλειψη νερού είναι **ιδιαίτερα έντονη (200-250mm)**, η πολλαπλασιαστική σχέση του Jensen και η πολλαπλασιαστική σχέση των Doorenbos and Kassam παρουσιάζουν παρόμοια αποτελέσματα (62-71%), ενώ η προσθετική σχέση των Doorenbos and Kassam οδηγεί πάντα σε μικρότερες τιμές (57-68%).

Στο Σχήμα 3 παρουσιάζεται η μεταβολή του ισοδύναμου ύψους εδαφικού νερού στη ζώνη του ριζοστρώματος σε σχέση με τα διάφορα όριά της (υδατοϊκανότητα, σημείο μόνιμης μάρανσης και όριο αποδεκτής εξάντλησης νερού) για άρδευση ίση με 460 και 250 mm, όπως προκύπτει από την εκτέλεση του μοντέλου SWBACROS. Παράλληλα, παρουσιάζονται με κάθετες μπάρες οι βροχοπτώσεις και οι αρδεύσεις κατά τη διάρκεια της βλαστικής περιόδου. Ο διαχωρισμός των πέντε περιόδων ανάπτυξης της καλλιέργειας πραγματοποιείται με τη βοήθεια των κάθετων γραμμών.

Όταν το εφαρμοζόμενο νερό ικανοποιεί πλήρως τις απαιτήσεις της καλλιέργειας ($ET_a = ET_m$), τότε η απόδοσή της είναι η μέγιστη, με την προϋπόθεση ότι οι άλλοι παράγοντες που τη διαμορφώνουν βρίσκονται σε άριστο επίπεδο. Στην περίπτωση επάρκειας νερού (Σχήμα 3α), το ισοδύναμο ύψος νερού σε όλα τα στάδια ανάπτυξης της καλλιέργειας είναι πάνω από το επιτρεπόμενο όριο αποδεκτής μείωσης νερού, εκτός από ελάχιστες ημέρες. Συνεπώς, ανεξάρτητα από τη σχέση που χρησιμοποιείται (5), (7), (8), η σχετική απόδοση είναι πολύ υψηλή (99%). Αντίθετα, στις περιπτώσεις που το εφαρμοζόμενο νερό δεν ικανοποιεί τις απαιτήσεις της καλλιέργειας ($ET_a < ET_m$), τότε

δημιουργούνται επιπτώσεις στην απόδοσή της. Στην περίπτωση ελλειμματικής άρδευσης (Σχήμα 3β), όπου $ET_a < ET_m$ στις περισσότερες ημέρες, το ισοδύναμο ύψος νερού βρίσκεται κάτω από το επιτρεπόμενο όριο αποδεκτής μείωσης νερού, για το μεγαλύτερο μέρος της καλλιεργητικής περιόδου, με σημαντική επίπτωση στην απόδοση της καλλιέργειας, η οποία σύμφωνα με τις σχέσεις (5) και (8) είναι ίση με 71% και σύμφωνα με τη σχέση (7) ίση με 68%.



Σχήμα 3α,β. Προγραμματισμός των αρδεύσεων και μεταβολή του εδαφικού νερού στη ζώνη του ριζοστρώματος, για άρδευση ίση με 460 και 250mm.

Από τα παραπάνω προκύπτει, ότι οι σχέσεις (5), (7) και (8) παρουσιάζουν διαφοροποιήσεις, ανάλογα με το μέγεθος της έλλειψης του αρδευτικού νερού. Οι διαφορές μεταξύ των σχέσεων είναι πιο έντονες, όταν η έλλειψη νερού είναι πιο έντονη.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία επιχειρείται η ποσοτικοποίηση των επιπτώσεων ελλειμματικής άρδευσης στην απόδοση μίας καλλιέργειας βαμβακιού εφαρμόζοντας διαφορετικά σενάρια άρδευσης, με τη βοήθεια του μοντέλου SWBACROS. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται τρεις σχέσεις νερού – απόδοσης καλλιεργειών και πραγματοποιείται συγκριτική αξιολόγησή τους. Οι σχέσεις αυτές είναι το κλασικό πολλαπλασιαστικό μοντέλο του Jensen [σχέση (5)], το αθροιστικό μοντέλο [σχέση (7)] και το πολλαπλασιαστικό μοντέλο [σχέση (8)] των Doorenbos-Kassam.

Από τη συγκριτική ανάλυση των σχέσεων προκύπτει ότι όταν υπάρχει επάρκεια νερού, οι τρεις σχέσεις δεν παρουσιάζουν διαφοροποιήσεις. Αντίθετα, όταν η έλλειψη νερού είναι μικρή, οι σχέσεις (7) και (8) δίνουν παρόμοια αποτελέσματα, ενώ η σχέση (5) οδηγεί σε υψηλότερες τιμές. Όταν παρατηρείται σημαντική έλλειψη νερού, η σχέση (5) οδηγεί σε υψηλότερες τιμές σχετικής απόδοσης, ακολουθεί η σχέση (8), ενώ η σχέση (7) οδηγεί πάντα σε μικρότερες τιμές. Στην περίπτωση που η έλλειψη νερού είναι ιδιαίτερα έντονη, οι σχέσεις (5) και (8) εμφανίζουν παρόμοια αποτελέσματα, ενώ η σχέση των (7) οδηγεί σε μικρότερες τιμές. Με τη διερεύνηση παρόμοιων σεναρίων ο διαχειριστής ενός αρδευτικού δικτύου θα μπορεί να εκτιμήσει τις πιέσεις που θα ασκηθούν στην καλλιέργεια υπό συνθήκες δυσμενών καιρικών αλλαγών και να ποσοτικοποιήσει τις επιπτώσεις στην απόδοση της καλλιέργειάς του, λαμβάνοντας υπόψη της περιόδους ευαισθησίας της καλλιέργειας με στόχο την εξοικονόμηση νερού σε συνδυασμό με τη μέγιστη δυνατή απόδοση.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Al-Khafaf, S., Wierenga, P.J. and Williams, B.C., 1978. *Evaporate flux from irrigated cotton as related to leaf area index, soil water and evaporative demand*. Agronomy Journal, 70: 912-917.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M., 1998. *Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. FAO, Rome, σύνολο σελίδων: 300p.
- Babajimopoulos C., 1991. *A Douglas-Jones predictor-corrector method in simulating one-dimensional unsaturated flow in soil*. Ground Water 29 (2): 271-286.
- Babajimopoulos, C., Budina, A. and Kalfountzos, D., 1995. *S.W.BA.CRO.S: A model for the estimation of the water balance of a cropped soil*. Environ. Sof., 10(3): 211-220.
- Belmans, C., Wesseling, J.G. and Feddes, R.A., 1983. *Simulation model of the water balance of a cropped soil*. SWATRE. Journal of Hydrology, 63: 271-286.
- Γεωργίου, Π., 2004. *Βελτιστοποίηση λειτουργίας ταμιευτήρων για αρδευτικούς σκοπούς*. Διδακτορική Διατριβή. Θεσσαλονίκη. Γεωπονική Σχολή Α.Π.Θ.
- Γεωργίου, Π. και Παπαμιχαήλ Δ., 2007. *Βέλτιστη διαχείριση αρδευτικού νερού με τη διερεύνηση σχέσεων απόδοσης καλλιεργειών – διαθεσιμότητας νερού*. Πρακτικά 5^{ου} Εθνικού Συνεδρίου Γεωργικής Μηχανικής, Λάρισα, 205-212.
- Γεωργίου, Π.Ε. και Παπαμιχαήλ, Δ.Μ., 2008. *Συγκριτική αξιολόγηση των εκτιμήσεων της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς με τη βοήθεια μετρημένων και εκτιμημένων μετεωρολογικών παραμέτρων*. Πρακτικά 9^{ου} Πανελλήνιου Συνεδρίου Μετεωρολογίας-Κλιματολογίας-Φυσικής της Ατμόσφαιρας, Θεσσαλονίκη, 839-846.
- Γεωργούσης Χ., 2007. *Προγραμματισμός των αρδεύσεων με εφαρμογή μαθηματικών μοντέλων και Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών*. Διδακτορική Διατριβή. Θεσσαλονίκη. Γεωπονική Σχολή Α.Π.Θ.
- Doorenbos, J. and Kassam, A.H., 1979. *Yield response to water*. FAO Irrigation and Drainage Paper, 33, Rome, σύνολο σελίδων: 156p.
- Georgiou, P.E., Papamichail, D.M. and Vouggioukas, S.G., 2006. *Optimal irrigation reservoir operation and simultaneous multi-crop cultivation area selection using simulated annealing*. Irrigation and Drainage, 55 (2): 129-144.
- Jensen, M.E., 1968. *Water consumption by agricultural plants*. In: T.T. Koziowski (ed.), *water deficits and plants growth*, Vol. II. Academic Press, New York, 1-22.
- Καλλιτσάρη, Χ., 2009. *Κριτική μελέτη σχέσεων απόδοσης καλλιεργειών σε συνάρτηση με τη διαθεσιμότητα του νερού στο έδαφος*. Μεταπτυχιακή Διατριβή. Θεσσαλονίκη. Γεωπονική Σχολή Α.Π.Θ.
- Μπαμπατζιμιόπουλος, Χ., Πανώρας, Α., Μαυρούδης, Ι., Μπίλας, Γ. και Παπαγιαννακόπουλος, Ν., 1995. *Προγραμματισμός των αρδεύσεων με χρήση μαθηματικών μοντέλων (91 ΕΔ 457)*. Τελική Έκθεση. Θεσσαλονίκη.
- Μπίλας, Γ., 1995. *Εφαρμογή μοντέλου SWBACROS στην πρόβλεψη της παραγωγής και στον προγραμματισμό της άρδευσης του βαμβακιού*. Μεταπτυχιακή Διατριβή. Α.Π.Θ.
- Παπαζαφειρίου Ζ.Γ., 1999. *Οι ανάγκες των καλλιεργειών σε νερό*. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, σύνολο σελίδων: 347.
- Tsakiris, G., 1982. *A method for applying crop sensitivity factors in irrigation scheduling*. Agricultural Water Management, 5: 335-343.
- 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.
- Van Genuchten, M.Th. and Nielsen D.R., 1985. *On describing and predicting the hydraulic properties of unsaturated soil*. 1.U.S. Salinity Laboratory, 2. Department of Land, Air and Water Resources, University of California.
- Zhang, H. and Oweis, T., 1999. *Water-yield relations and optimal irrigation scheduling of wheat in the Mediterranean Region*. Agricultural Water Management, 38: 195-211.

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΚΛΥΣΗΣ ΤΩΝ ΟΡΥΖΩΝΩΝ ΣΤΙΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥΣ ΤΗΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΤΗΣ ΕΞΙΣΩΣΗΣ VAN GENUCHTEN

Β.Γ. Ασχονίτης¹ και Β.Ζ. Αντωνόπουλος²

Τομέας Εγγείων Βελτιώσεων, Εδαφολογίας και Γεωργικής Μηχανικής,
Γεωπονική Σχολή, Α.Π.Θ., 54124, Θεσσαλονίκη
E-mails: ¹vaschoni@agro.auth.gr, ²vasanton@agro.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία μελετάται η επίδραση της κατάκλυσης στη χαρακτηριστική καμπύλη του εδαφικού νερού, η οποία εκφράζεται με την εξίσωση του van Genuchten, για το εδαφικό προφίλ δύο τυπικών ορυζώνων στην περιοχή της Σίνδου Θεσσαλονίκης. Από την σύγκριση των χαρακτηριστικών καμπυλών παρατηρήθηκε μείωση της περιεχόμενης υγρασίας στον κορεσμό θ_s και της παραμέτρου a καθώς και αύξηση της παραμέτρου n και του γινομένου nm της εξίσωσης του van Genuchten μετά την καλλιεργητική περίοδο. Το σημείο αλλαγής κύρτωσης της χαρακτηριστικής καμπύλης μετατοπίζεται σε υψηλότερες τιμές ύψους πίεσης μεταξύ ενός εύρους τιμών, οι οποίες με βάση την εξίσωση τριχοειδούς ανύψωσης αντιστοιχούν σε πόρους ισοδύναμης διαμέτρου μεταξύ 2-6 μm , με το μεγαλύτερο μέρος της περιεχόμενης υγρασίας να κατανέμεται πιο κοντά στους πόρους αυτούς.

Λέξεις κλειδιά: χαρακτηριστική καμπύλη, εξίσωση van Genuchten, κατάκλυση, ορυζώνες.

EFFECTS OF SUBMERGENCE AT RICE FIELDS ON PARAMETERS OF VAN GENUCHTEN'S SOIL WATER RETENTION CURVE

V.G. Aschonitis¹ and V.Z. Antonopoulos²

Department of Hydraulics, Soil Science and Agricultural Engineering,
School of Agriculture, Aristotle University, Thessaloniki 54124, Greece
E-mails: ¹vaschoni@agro.auth.gr, ²vasanton@agro.auth.gr

ABSTRACT

Aim of the study was the investigation of submergence effects on soil water retention curve and its parameters, as expressed by van Genuchten's equation, through the soil profile of two conventionally cultivated lowland rice fields at Sindos-Thessaloniki. From the comparison of water retention curves before and after the growing season occurred that the water content at saturation θ_s and the value of parameter a are reduced, while the values of the parameter n and the product nm in van Genuchten's equation are increased after the growing period. The inflection point of water retention curves were shifted in higher suctions between a range of values that correspond to pores of equivalent diameter between 2 to 6 μm . Soil water content were distributed in a narrower suction range around inflection point.

Key words: soil water retention curve, van Genuchten's equation, submergence, paddy-rice fields.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η πρακτική της κατάκλυσης του εδάφους για την άρδευση των ορυζώνων έχει ως αποτέλεσμα τη διασπορά της αργίλου, την καταστροφή των συσσωματωμάτων και τη μείωση της υδραυλικής αγωγιμότητας λόγω της μείωσης του ολικού πορώδους και της ανακατανομή του σε μικρότερης διαμέτρου πόρους. Οι συνθήκες αυτές είναι ιδανικές για την ανάπτυξη του ρυζιού αλλά δυσμενείς για τις υπόλοιπες καλλιέργειες που ακολουθούν κατά την αμειψισπορά (Sharma and De Datta, 1985; Ασχονίτης κ.α., 2008).

Οι παραπάνω μεταβολές αντικατοπτρίζονται στη χαρακτηριστική καμπύλη του εδαφικού νερού, της οποίας οι παράμετροι μεταβάλλονται κάτω από την επίδραση της κατάκλυσης. Σύμφωνα με τους Richard et al. (2001) και τους Startsev και McNabb (2001), η χαρακτηριστική καμπύλη, όπως εκφράζεται με την εξίσωση van Genuchten, παρουσιάζει σημαντικές μεταβολές κάτω από συνθήκες μηχανικής συμπίεσης. Στους ορυζώνες η μεγάλη διάρκεια της κατάκλυσης, η οποία χαρακτηρίζεται από συνεχή διήθηση του νερού, καταστροφή των συσσωματωμάτων και διασπορά της αργίλου, επιδρά με πιο έντονο τρόπο σε σχέση με τη μηχανική συμπίεση.

Σκοπός της εργασίας είναι να διερευνηθεί η επίδραση της κατάκλυσης στις παραμέτρους της εξίσωσης του van Genuchten για τέσσερα βάθη του εδαφικού προφίλ δύο ορυζώνων με μέσης-βαριάς μηχανικής σύστασης εδάφη, στην πεδιάδα της Θεσσαλονίκης.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1. ΕΞΙΣΩΣΗ VAN GENUCHTEN

Η χαρακτηριστική καμπύλη του εδαφικού νερού $\theta(h)$, σύμφωνα με τον van Genuchten (1980) δίνεται από τη σχέση:

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

όπου θ είναι η κατ' όγκο εδαφική υγρασία ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) h είναι το ύψος πίεσης (cm), θ_s είναι η εδαφική υγρασία στον κορεσμό ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), θ_r είναι η υπολειμματική υγρασία ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), a (cm^{-1}), n και m (αδιάστατες) είναι εμπειρικές παράμετροι προσαρμογής που καθορίζουν τη μορφή της καμπύλης. Η παράμετρος n σχετίζεται με τη διάμετρο των πόρων που κατανέμονται μεταξύ της υγρασίας κορεσμού και της υγρασίας στο σημείο εισόδου αέρα (air entry pressure head), ενώ το γινόμενο nm σχετίζεται με τη διάμετρο των πόρων που κατανέμονται μεταξύ της υγρασίας στο σημείο εισόδου αέρα και του σημείου πλήρους ξήρανσης (Durner and Flühler, 2005) Για πρακτικούς λόγους η εξίσωση του van Genuchten εφαρμόζεται με τον περιορισμό $m+1/n = 1$ (Αντωνόπουλος, 1999).

Για μια δεδομένη τιμή μύζησης h_i , η οποία αντιστοιχεί σε μια υγρασία θ_i , η καμπύλη $\theta(h)$ του van Genuchten λόγω της μορφής της παρουσιάζει ένα σημείο αλλαγής κύρτωσης $\{d^2\theta/d(h_i)^2 = 0\}$. Η κλίση της καμπύλης στο σημείο αυτό παίρνει τη μέγιστη τιμή της, δίνεται από τη σχέση $S_i = d\theta/d(h_i)$ και αντιστοιχεί στη μέγιστη υδραυλική χωρητικότητα $C(h_i)$. Η κλίση της χαρακτηριστικής καμπύλης $\theta(h)$, η οποία καλείται και υδραυλική χωρητικότητα $C(h)$, δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{d\theta}{dh} = C(h) = -mn(\theta_s - \theta_r) \left[1 + (ah)^n\right]^{-m-1} a^n h^{n-1} \quad (2)$$

Η τιμή της μύζησης και η εδαφική υγρασία στο σημείο αλλαγής κύρτωσης της

συνάρτησης $\theta(h)$ δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις, αντίστοιχα (Αντωνόπουλος, 1999):

$$h_i = \frac{1}{a} m^{1-m} \quad \text{και} \quad \theta_i = \theta_r + (\theta_s - \theta_r)[1 + m]^{-m} \quad (3 \ \& \ 4)$$

Με βάση την εξίσωση της τριχοειδούς ανύψωσης και σε συνδυασμό με την εξ. (3), το ύψος πίεσης h_i στο σημείο αλλαγής κύρτωσης αντιστοιχεί σε μια συγκεκριμένη αποτελεσματική ακτίνα r_i (effective radius) ή αλλιώς στην αντίστοιχη ισοδύναμη διάμετρο D_i (equivalent diameter), η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$D_i = \frac{4a\sigma \cos(\gamma)}{\rho_w g m^{1-m}} \quad (5)$$

όπου σ είναι η επιφανειακή τάση (N m^{-1}), γ η γωνία επαφής της διεπιφάνειας του νερού με τα τοιχώματα των πόρων, ρ_w η πυκνότητα του νερού (kg m^{-3}), g η επιτάχυνση της βαρύτητας (m s^{-2}) και a (m^{-1}), m οι παράμετροι της εξίσωσης van Genuchten.

Η σύγκριση των παραπάνω παραμέτρων της χαρακτηριστικής καμπύλης στα ίδια εδάφη πριν και μετά από την κατάκλυση των αγρών για την καλλιέργεια ρυζιού μπορεί να δώσει σημαντικές πληροφορίες για την επίδρασή της στις φυσικές-υδραυλικές ιδιότητες του εδάφους.

2.2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Οι πειραματικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε δύο αγρούς ορυζώνων (Α και Β) στα νοτιοανατολικά της πεδιάδας Θεσσαλονίκης (N 40 38', E 22 49'). Η μέση ετήσια βροχόπτωση και θερμοκρασία στην περιοχή είναι 417 mm και 14.5 °C, αντίστοιχα. Οι πειραματικοί αγροί βρίσκονται στην περιοχή της Σινδού-Θεσσαλονίκης και χαρακτηρίζονται από υψηλή υπόγεια στάθμη (1-1.5 m η απόσταση της στάθμης του νερού στην στραγγιστική τάφρο από την επιφάνεια του εδάφους). Η διανομή του νερού γίνεται με δίκτυο ανοιχτών αγωγών και η κοινή πρακτική άρδευσης για τους ορυζώνες είναι η κατάκλυση (Antonopoulos, 2008).

Για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών καμπυλών, ελήφθησαν αδιατάρακτα δείγματα από τέσσερα βάθη (5-10, 35-40, 65-70, 95-100 cm), τόσο πριν (Μάιος) όσο και μετά (Νοέμβριος) την καλλιεργητική περίοδο του 2005. Στα δείγματα μετρήθηκαν τα ζεύγη τιμών πίεσης-υγρασίας. Ο προσδιορισμός των παραμέτρων της εξίσωσης van Genuchten έγινε με τη βοήθεια του προγράμματος RETC (van Genuchten et al., 1991). Παράλληλα, ελήφθησαν και διαταραγμένα δείγματα για τον προσδιορισμό των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών του εδάφους (Πίνακας 1).

Πίνακας 1. Φυσικο-χημικές ιδιότητες του εδάφους για τις τέσσερεις εδαφικές στρώσεις των δύο αγρών.

Αγρός	Α				Β			
	5-10	35-40	65-70	95-100	5-10	35-40	65-70	95-100
Βάθος (cm)								
Άμμος %	10.4	6.4	4.4	39.2	14.4	9.2	11.2	11.2
Πλύς %	44.8	50.0	40.0	46.0	48.8	45.2	68.0	53.2
Αργίλος %	44.8	43.6	55.6	14.8	36.8	45.6	20.8	35.6
Κλάση	SiC	SiC	C	L	SiCL	SiC	SiL	SiCL
O.M. %	2.95	1.85	1.58	0.63	2.72	1.26	0.43	1.20
pH	7.3	7.5	7.6	7.7	8.0	8.2	8.5	8.4
EC ($\mu\text{S/cm}$)	1113	1309	925	1412	417	611	877	1084

O.M.: Οργανική ουσία, E.C.: Ηλεκτρική Αγωγιμότητα

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στους Πίνακες 2 και 3 δίνονται οι τιμές των παραμέτρων της εξίσωσης Van Genuchten για τους δύο πειραματικούς αγρούς πριν (Μάιος) και μετά (Νοέμβριος) την καλλιεργητική περίοδο. Όσον αφορά την επίδραση της κατάκλυσης στην παράμετρο θ_s , παρατηρήθηκε μείωσή της σε όλες τις στρώσεις και των δύο αγρών. Πριν την καλλιεργητική περίοδο (Μάιος), η επιφανειακή στρώση (5-10 cm) και των δύο αγρών παρουσίασε τις μικρότερες τιμές της παραμέτρου θ_s σε σχέση με τις υποκείμενες στρώσεις, γεγονός το οποίο είναι ενδεικτικό της συμπύκνωσης που επήλθε κατά την προηγούμενη καλλιεργητική περίοδο. Μετά την καλλιεργητική περίοδο (Νοέμβριος), οι επιφανειακές στρώσεις (5-10 cm) των δύο αγρών παρουσίασαν και πάλι τις μικρότερες τιμές της παραμέτρου θ_s , παρόλο που οι υποκείμενες στρώσεις παρουσίασαν τη μεγαλύτερη μείωση της θ_s (Πίνακες 2 και 3). Η εντονότερη μείωση της παραμέτρου θ_s μετά την καλλιεργητική περίοδο παρατηρήθηκε στη δεύτερη (35-40 cm) και στην τέταρτη στρώση (95-100 cm) και των δύο αγρών. Η μείωση στη δεύτερη στρώση οφείλεται στην πίεση που ασκεί το βάρος του νερού κατάκλυσης και της επιφανειακής λασπώδους στρώσης. Η επίδραση της συμπίεσης είναι εντονότερη κάτω από τη διεπιφάνεια επαφής της λασπώδους στρώσης και της υποκείμενης μη λασπώδους στρώσης (Singh et al., 2001). Η μείωση στην τέταρτη στρώση (95-100 cm) πιθανόν να οφείλεται όχι μόνο στη συμπίεση από το βάρος των υπερκείμενων στρώσεων αλλά και από τη συνδυασμένη επίδραση της διήθησης του νερού και της ανύψωσης της υπόγειας στάθμης, οι οποίες επιδρούν αντίθετα στο βάθος αυτό κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου.

Από τη σύγκριση των τιμών των παραμέτρων a και n πριν και μετά την καλλιεργητική περίοδο για τους δύο αγρούς (Πίνακες 2 και 3) προκύπτει μείωση των τιμών της παραμέτρου a και αύξηση των τιμών της παραμέτρου n σε όλες τις στρώσεις των δύο αγρών (εξάιρεση αποτελεί η στρώση 95-100 cm του αγρού Β όπου η τιμή του n ήταν υψηλή ήδη πριν την καλλιεργητική περίοδο). Η αύξηση του n , σε συνδυασμό με τη σχέση $m=1-1/n$, είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση και του γινομένου mn . Παράλληλα, μετά την καλλιεργητική περίοδο, μετατοπίστηκε το σημείο αλλαγής κύρτωσης σε μεγαλύτερα ύψη πίεσης, τα οποία αντιστοιχούν σε πόρους μικρότερης ισοδύναμης διαμέτρου ενώ μειώθηκε και η περιεχόμενη κατ'όγκο εδαφική υγρασία θ_i στα σημεία αυτά (Πίνακες 2 και 3). Παρόμοια αποτελέσματα έχουν παρουσιάσει και οι Startsev και McNabb (2001) για εδάφη στα οποία εφαρμόστηκε μηχανική συμπίεση.

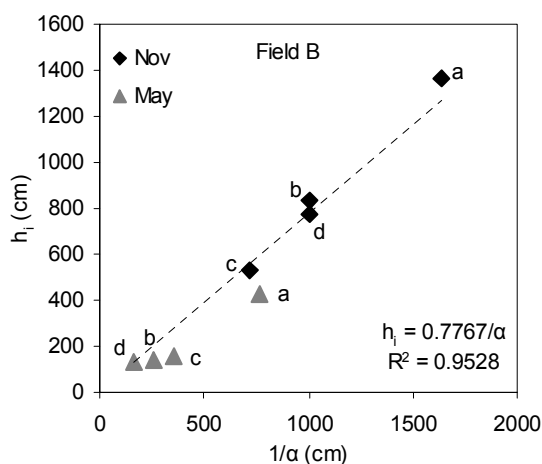
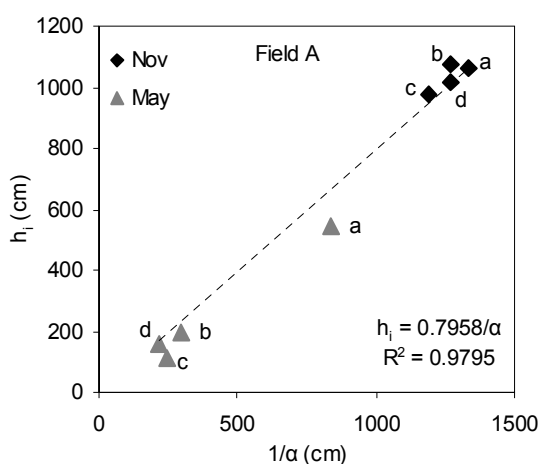
Στο Σχήμα 2 δίνεται η σχέση μεταξύ του ύψους πίεσης στο σημείο αλλαγής κύρτωσης και του αντιστρόφου της παραμέτρου a (εξ.3) πριν και μετά την καλλιεργητική περίοδο και για τους δύο αγρούς, από το οποίο φαίνεται η υψηλή συσχέτιση των δύο παραμέτρων. Συγκρίνοντας την εξ. (3) με τις σχέσεις που προκύπτουν από τη συσχέτιση του Σχήματος 2 για τους δύο αγρούς, προκύπτει ότι ο παράγοντας m^{1-m} παρουσιάζει παραπλήσιες τιμές, με μέσες τιμές 0.7958 ($R^2 = 0.98$) και 0.7767 ($R^2 = 0.95$) για τον αγρό Α και Β, αντίστοιχα. Σε όλες τις στρώσεις και στους δύο αγρούς παρατηρήθηκε ότι η ισοδύναμη διάμετρος D_i , που αντιστοιχεί στο σημείο αλλαγής κύρτωσης, μετατοπίστηκε σε μικρότερες τιμές ισοδύναμης διαμέτρου (υψηλότερες τιμές υψών πίεσης) μεταξύ ενός στενότερου εύρους τιμών κοντά στα 2 έως 6 μm (Πίνακες 2 και 3). Η εδαφική υγρασία κατανεμήθηκε πιο κοντά στο σημείο αλλαγής κύρτωσης, μεταβολές οι οποίες είναι πιο ευδιάκριτες στις καμπύλες της υδραυλικής χωρητικότητας $C(h)$ και στις αιχμές τους (Σχήματα 3 και 4). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των Startsev και McNabb (2001), για εδάφη στα οποία εφαρμόστηκε συμπίεση, αναμενόταν υποβιβασμός της αιχμής των καμπυλών της $C(h)$, γεγονός το οποίο επιβεβαιώθηκε σε όλες τις περιπτώσεις εκτός της στρώσης 5-10 cm του αγρού Α και της στρώσης 65-70 cm του αγρού Β (Σχήματα 3 και 4).

Πίνακας 2. Παράμετροι της εξίσωσης van Genuchten και τα χαρακτηριστικά των χαρακτηριστικών καμπύλων στο σημείο αλλαγής κύρτωσης πριν (Μάιος) και μετά (Νοέμβριος) την καλλιεργητική περίοδο για τον αγρό Α.

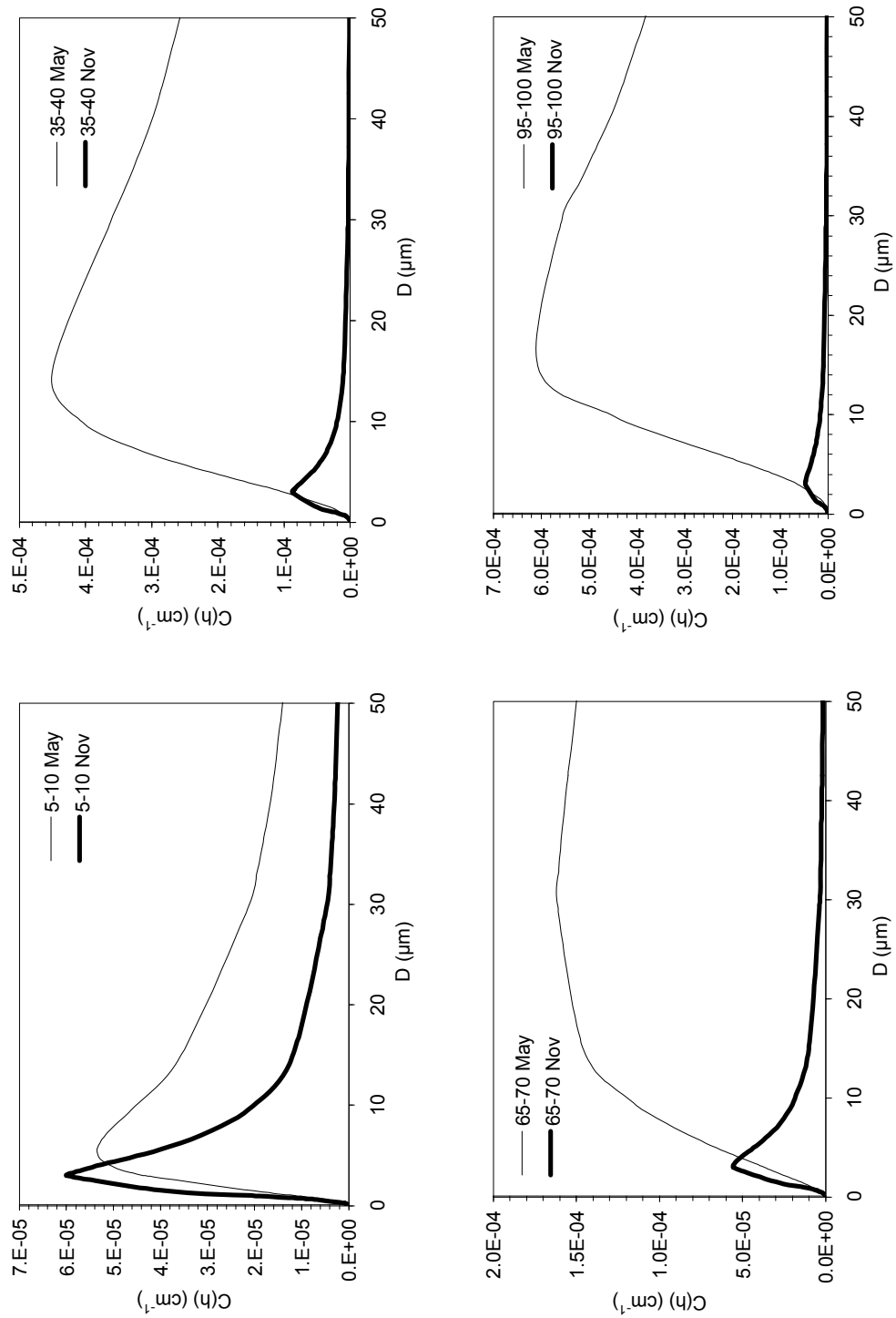
Βάθος (cm)	θ_s (cm ³ /cm ³)	θ_r (cm ³ /cm ³)	α (cm ⁻¹)	n (n>1)	h_i (cm)	θ_i (cm ³ /cm ³)	D_i (μm)
Αγρός Α				Μάιος			
5-10	0.530	0.400	0.0012	1.850	547.3	0.509	5.4
35-40	0.575	0.200	0.0034	1.890	197.5	0.513	15.1
65-70	0.570	0.390	0.0041	1.450	108.8	0.556	27.4
95-100	0.580	0.250	0.0047	2.100	156.4	0.515	19.1
Αγρός Α				Νοέμβριος			
5-10	0.520	0.360	0.00075	2.390	1062.8	0.483	2.8
35-40	0.529	0.340	0.00079	2.750	1074.0	0.478	2.8
65-70	0.530	0.410	0.00084	2.530	975.9	0.500	3.1
95-100	0.549	0.420	0.00079	2.420	1015.5	0.518	2.9

Πίνακας 3. Παράμετροι της εξίσωσης van Genuchten και τα χαρακτηριστικά των χαρακτηριστικών καμπύλων στο σημείο αλλαγής κύρτωσης πριν (Μάιος) και μετά (Νοέμβριος) την καλλιεργητική περίοδο για τον αγρό Β.

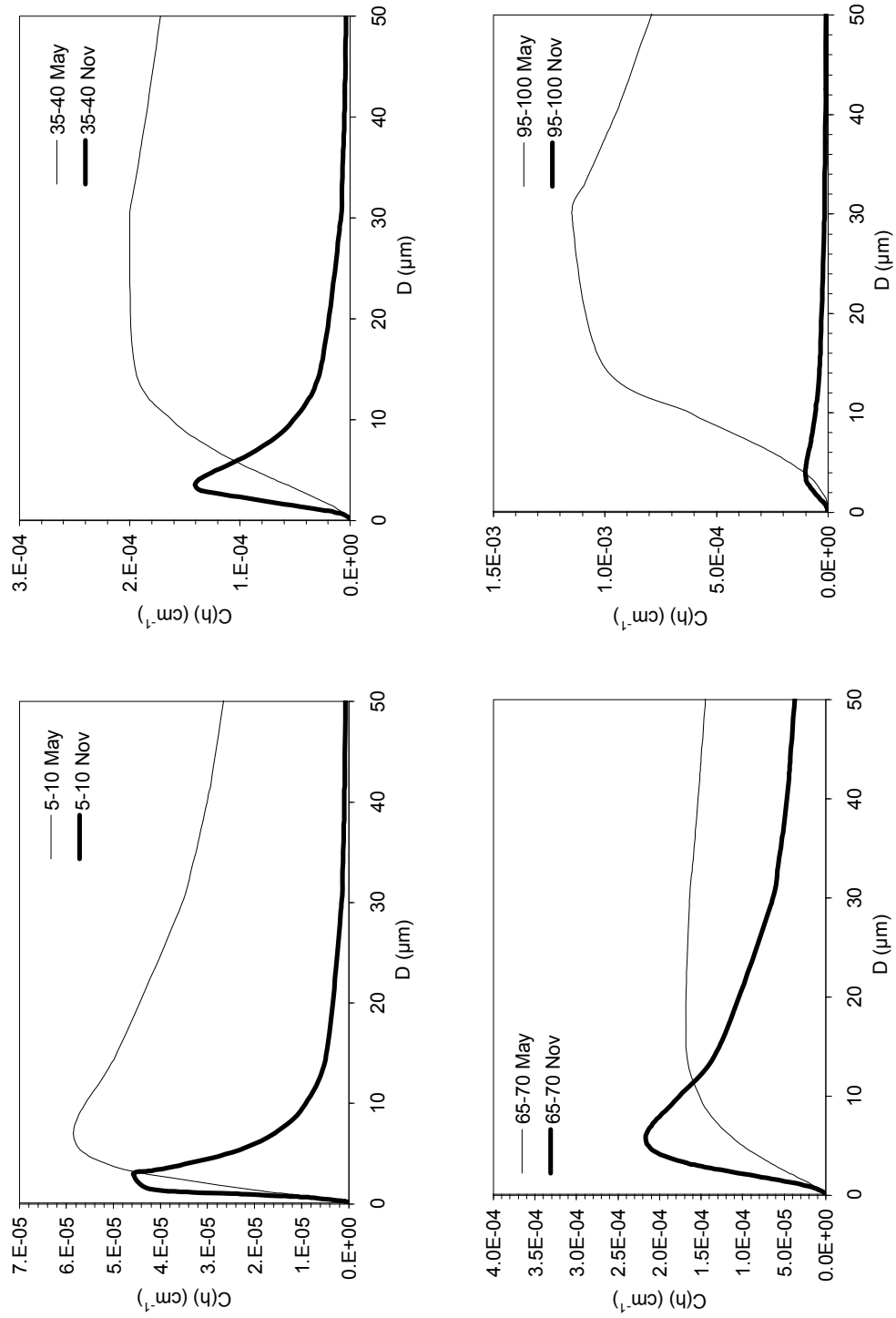
Βάθος (cm)	θ_s (cm ³ /cm ³)	θ_r (cm ³ /cm ³)	α (cm ⁻¹)	n (n>1)	h_i (cm)	θ_i (cm ³ /cm ³)	D_i (μm)
Αγρός Β				Μάιος			
5-10	0.500	0.335	0.0013	1.620	425.2	0.481	7.0
35-40	0.610	0.410	0.0039	1.580	136.0	0.588	21.9
65-70	0.597	0.310	0.0028	1.435	155.5	0.575	19.2
95-100	0.580	0.140	0.0060	2.279	129.4	0.483	23.0
Αγρός Β				Νοέμβριος			
5-10	0.490	0.338	0.00061	2.640	1368.8	0.451	2.2
35-40	0.510	0.264	0.00100	2.670	838.8	0.446	3.6
65-70	0.580	0.210	0.00140	2.110	526.8	0.506	5.7
95-100	0.530	0.310	0.00100	2.250	770.1	0.482	3.9



Σχήμα 2. Σχέση μεταξύ του ύψους πίεσης στο σημείο αλλαγής κύρτωσης και του αντιστρόφου της παραμέτρου α πριν και μετά την καλλιεργητική περίοδο για τους δύο αγρούς (a: 5-10 cm, b: 35-40 cm, c: 67-70 cm και d: 95-100 cm).



Σχήμα 3. Υδραυλική χωρητικότητα $C(h)$ των τεσσάρων στρώσεων του αγρού Α πριν και μετά την καλλιεργητική περίοδο.



Σχήμα 4. Υδραυλική χωρητικότητα $C(h)$ των τεσσάρων στρώσεων του αγρού Β πριν και μετά την καλλιεργητική περίοδο.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τα αποτελέσματα της έρευνας προέκυψε ότι η κατάκλυση των ορυζώνων προκαλεί συγκεκριμένης πορείας μεταβολές στις παραμέτρους της χαρακτηριστικής καμπύλης του van Genuchten. Η κατάκλυση επιδρά με διαφορετικούς τρόπους (π.χ. διασπορά της αργίλου, καταστροφή συσσωματωμάτων, συμπίεση, αυξημένη διήθηση νερού κλπ) ανάλογα με το βάθος του εδαφικού προφίλ, με αποτέλεσμα να διαφοροποιείται ο βαθμός μεταβολής των παραμέτρων αυτών για κάθε μελετούμενη στρώση. Η ανάλυση και σύγκριση των παραμέτρων της χαρακτηριστικής καμπύλης του van Genuchten, σε συνδυασμό με τα χαρακτηριστικά τους στο σημείο αλλαγής κύρτωσης πριν και μετά την επίδραση της κατάκλυσης ή της μηχανικής συμπίεσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μελλοντικές έρευνες για την πρόβλεψη των μεταβολών των φυσικο-υδραυλικών ιδιοτήτων του εδάφους.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Αντωνόπουλος Β.Ζ., 1999. *Υδρολογία της ακόρεστης ζώνης του εδάφους*. Υπηρεσία δημοσιευμάτων Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, σελ. 61-79.
- Antonopoulos, V.Z., 2008. *Modelling of water and nitrogen balance in the ponded water of rice fields*. Paddy Water Environment, 6: 387-395.
- Ασchonitis Β.Γ., Κωστοπούλου, Σ.Κ., Αντωνόπουλος, Β.Ζ., 2008. *Επίδραση της κατάκλυσης των ορυζώνων στην κατανομή μεγέθους των πόρων του εδάφους*. Πρακτικά του 12^{ου} Πανελλήνιου Συνεδρίου της Ελληνικής Εδαφολογικής Εταιρείας, Πύργος, 24-26 Σεπτεμβρίου, σελ. 233-242.
- Durner, W. and Flühler, H., 2005. *Soil Hydraulic Properties*. In: Anderson M. G. (Ed.), Encyclopedia of Hydrological Sciences. John Wiley & Sons, Chichester, pp. 1103-1119.
- Richard, G., Cousin, I., Sillon, J.F., Bruand, A. and Guerif, J., 2001. *Effect of compaction on the porosity of a silty soil: influence on unsaturated hydraulic properties*. Eur. J. of Soil Sci., 52: 49-58.
- Sharma, P.K. and De Datta, S.K., 1985. *Effects of puddling on soil physical properties and processes*. In: Soil physics and rice. IRRI, Los Banos, Philippines, pp.217-234.
- Singh, K.B., Gajri, P.R. and Arora, V.K., 2001. *Modelling the effects of soil and water management practices on the water balance and performance of rice*. Agr. Water Man., 49: 77-95.
- Startsev, A.D. and McNabb, D.H., 2001. *Skidder traffic effects on water retention, pore size distribution and van Genuchten parameters of boreal forest soils*. Soil Sci. Soc. Am. J., 65: 224-231.
- 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.
- 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, Agr. Res. Service, Riverside, California. pp 85.

Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΥΣΤΕΡΗΣΗΣ ΣΤΗΝ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΜΕΤΩΠΟΥ ΔΙΑΒΡΟΧΗΣ ΚΑΙ ΣΤΗ ΒΑΘΙΑ ΔΙΗΘΗΣΗ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΣΤΑΓΔΗΝ ΑΡΔΕΥΣΗΣ

Ε. Διαμαντόπουλος¹ και Σ. Ελμαλόγλου²

Εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής, Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων
και Γεωργικής Μηχανικής, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών,

Ιερά Οδός 75, Αθήνα Τ.Κ. 11855

E-mails: ¹stathis.diamantopoulos@gmail.com, ²elma@aua.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή εξετάζεται η επίδραση του φαινομένου της υστέρησης στη βαθιά διήθηση και στην εξέλιξη του μετώπου διαβροχής κάτω από επιφανειακές ισαπέχουσες σημειακές πηγές στάγδην άρδευσης. Το φυσικό φαινόμενο προσομοιώνεται με ένα μαθηματικό μοντέλο αξονικής συμμετρίας στο οποίο έχει ενσωματωθεί το φαινόμενο της υστέρησης στη χαρακτηριστική καμπύλη υγρασίας $\Theta(H)$ μέσω του εμπειρικού μοντέλου των Scott et al. (1983). Τα αριθμητικά αποτελέσματα δείχνουν ότι σε χρόνο ίσο με το συνολικό χρόνο προσομοίωσης (χρόνος ίσος με το εύρος άρδευσης) η υστέρηση ελαττώνει τις απώλειες αρδευτικού νερού λόγω βαθιάς διήθησης. Ειδικότερα η υστέρηση ελαττώνει τη βαθιά διήθηση περισσότερο στο χονδρόκοκκο (loamy sand) από ότι στο λεπτόκοκκο έδαφος (silt).

Λέξεις κλειδιά: στάγδην άρδευση, προσομοίωση, υστέρηση, βαθιά διήθηση.

THE EFFECT OF HYSTERESIS ON THE WETTING FRONT ADVANCE AND ON DEEP PERCOLATION UNDER SURFACE DRIP IRRIGATION

E. Diamantopoulos¹ and S. Elmaloglou²

Department of Natural Resources Management & Agricultural Engineering,

Agricultural University of Athens, Iera Odos 75, 11855 Athens, Greece

E-mails: ¹stathis.diamantopoulos@gmail.com, ²elma@aua.gr

ABSTRACT

In this study it is examined the effect of hysteresis on the deep percolation and on soil wetting advance patterns in the case of surface drip irrigation. The physical problem is simulated with a mathematical model of axial symmetry in which it has been incorporated hysteresis in the soil water characteristic curve using the empirical model of Scott et al. (1983). The numerical results show that at time equal to the total simulation time, hysteresis reduces deep percolation. Moreover, hysteresis reduces deep percolation more in the coarse-grained soil (loamy sand) than in the fine-grained soil (silt).

Key words: Drip irrigation, simulation, hysteresis, deep percolation.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

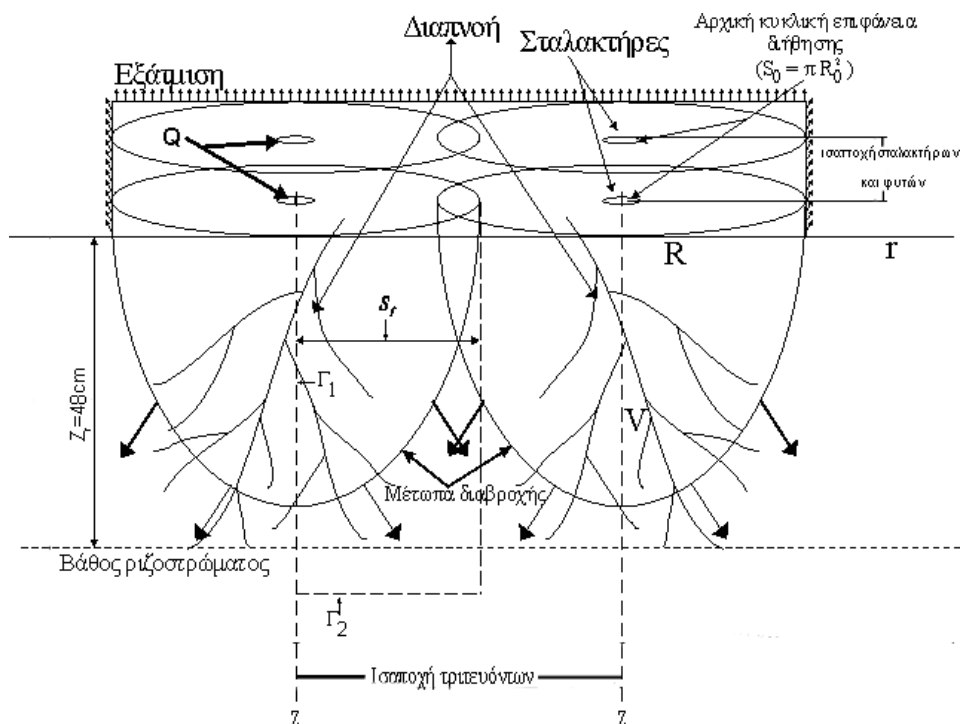
Η υστέρηση μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τη ροή του νερού στα ακόρεστα εδάφη. Προηγούμενες εργασίες που περιγράφουν το φαινόμενο της διήθησης και ανακατανομής του νερού στην περίπτωση στάγδην άρδευσης ασχολούνται κυρίως με την δυναμική του εδαφικού νερού, κατά τη διάρκεια της άρδευσης ή λίγο μετά τον τερματισμό της χωρίς να λαμβάνουν υπόψη την επίδραση του φαινομένου της υστέρησης (Brandt et al., 1971; Healy and Warrick, 1988; Lafolie et al., 1989; Angelakis et al., 1993; Hammami et al., 2002, Cote et al., 2003; Elmaloglou and Malamos, 2006).

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η επίδραση του φαινομένου της υστέρησης στη βαθιά διήθηση και στη χρονική εξέλιξη του μετώπου διαβροχής. Προσομοιώνεται η τοπική διήθηση και ανακατανομή του εδαφικού νερού για δυο παροχές ($Q = 2$ και 4 l/h) για δόση άρδευσης ίση με 30 mm και ισαπόσταση σταλακτήρων 60 cm.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1. ΤΟ ΦΥΣΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται το φυσικό πρόβλημα σε τρεις διαστάσεις. Στην επιφάνεια του εδάφους εφαρμόζεται παροχή από σημειακή πηγή στάγδην άρδευσης, ακτίνας R_0 . Η αξονική συμμετρία μας επιτρέπει να εξετάσουμε το φυσικό πρόβλημα πάνω σε ένα από τα άπειρα κατακόρυφα επίπεδα που διέρχονται από το κέντρο της κυκλικής λεκάνης και που ορίζονται από τους άξονες r και z .



Σχήμα 1. Το φυσικό ομοίωμα (Elmaloglou and Malamos, 2006).

2.2. ΤΟ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Θεωρώντας την ύπαρξη αξονοσυμμετρικής συμμετρίας στην ροή του αρδευτικού νερού στο έδαφος, η εξίσωση η οποία περιγράφει το φυσικό πρόβλημα είναι:

$$\frac{\partial \theta}{\partial H} \cdot \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot K(H) \cdot \frac{\partial H}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K(H) \cdot \frac{\partial H}{\partial z} \right) - \frac{\partial K(H)}{\partial z} - S(H, z, t) \quad (1)$$

όπου r και z (θετικό προς τα κάτω) είναι οι κυλινδρικές συντεταγμένες (L), H είναι το φορτίο πίεσης (L), Θ είναι η κατ' όγκο εδαφική υγρασία (L^3L^{-3}) $K(H)$ είναι η ακόρεστη υδραυλική αγωγιμότητα (LT^{-1}), t είναι ο χρόνος από την έναρξη της άρδευσης (T), S είναι ο όρος ο οποίος εκφράζει τη πρόσληψη του εδαφικού νερού από τις ρίζες των φυτών ($L^3L^{-3}T^{-1}$).

Περισσότερες πληροφορίες για το μαθηματικό μοντέλο καθώς επίσης και για τις αρχικές και οριακές συνθήκες δίνονται στην εργασία των Elmaloglou and Malamos (2006).

2.3. ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΥΣΤΕΡΗΣΗΣ

Στην παρακάτω προσέγγιση έγινε η υπόθεση ότι οι κύριες καμπύλες στράγγισης και διαβροχής μπορούν να περιγραφούν από την αναλυτική σχέση του van Genuchten (1980):

$$\Theta(H) = \Theta_r + \frac{\Theta_s - \Theta_r}{\left(1 + (a \cdot H)^n\right)^m}, m = 1 - 1/n \quad (2)$$

όπου Θ είναι η κατ' όγκο περιεκτικότητα σε νερό του εδάφους ($L^3 \cdot L^{-3}$), Θ_r είναι η υπολειπόμενη περιεκτικότητα σε νερό, Θ_s η κατ' όγκο περιεκτικότητα σε νερό στον κορεσμό και a , n , και m εμπειρικές παράμετροι προσαρμογής. Επίσης ορίστηκε ότι η κύρια καμπύλη στράγγισης και η κυρία καμπύλη διαβροχής θα συμβολίζονται ως $\Theta_d(H)$ και $\Theta_w(H)$, αντίστοιχα.

Στην ενσωμάτωση του φαινομένου της υστέρησης στο μοντέλο μας θα ακολουθήσουμε τις απλοποιήσεις των Kool and Parker (1987) για το εμπειρικό μοντέλο των Scott et al. (1983). Έτσι υποθέτουμε ότι:

$$\Theta_r^w = \Theta_r^d = \Theta_r \text{ και } \Theta_s^w = \Theta_s^d = \Theta_s \quad (3)$$

Η υδραυλική αγωγιμότητα K ($L \cdot T^{-1}$) δίνεται από τη σχέση του van Genuchten (1980) συναρτήσει του ενεργού βαθμού κορεσμού (Se):

$$K(Se) = K_s Se^{0.5} \left(1 - \left[1 - Se^{\frac{n}{n-1}} \right]^m \right)^2 \text{ όπου } Se = \frac{\Theta(H) - \Theta_r}{\Theta_s - \Theta_r} \quad (4)$$

Το K_s είναι η υδραυλική αγωγιμότητα στο κορεσμό. Έχοντας υποθέσει προηγουμένως ότι $\Theta_r^w = \Theta_r^d = \Theta_r$ και $\Theta_s^w = \Theta_s^d = \Theta_s$, η ύπαρξη της υστέρησης στη σχέση $K(H)$ εμφανίζεται στις διαφορές μεταξύ n^d και n^w . Εναλλακτικά για να εξάγουμε μια μη υστερητική σχέση $K(H)$ θέτουμε $n^d = n^w = n$.

Έτσι η κύρια καμπύλη στράγγισης περιγράφεται από το διάνυσμα παραμέτρων $(\Theta_s, \Theta_r, a^d, n)$ και η κύρια καμπύλη διαβροχής από το διάνυσμα παραμέτρων $(\Theta_s, \Theta_r, a^w, n)$.

Στο μοντέλο των Scott et al. (1983), οι διερευνητικές καμπύλες στράγγισης προκύπτουν με κλιμάκωση από τη κύρια καμπύλη στράγγισης και οι διερευνητικές καμπύλες διαβροχής προκύπτουν με κλιμάκωση από τη κύρια καμπύλη διαβροχής. Οι διερευνητικές καμπύλες στράγγισης βρίσκονται χρησιμοποιώντας το διάνυσμα παραμέτρων $(\Theta_s^*, \Theta_r, a^d, n)$ στη σχέση (5), όπου το Θ_s^* αντικαθιστά το Θ_s και εμπεριέχει την

επίδραση της κλιμάκωσης (scaling) της καμπύλης στράγγισης έτσι ώστε να περάσει από το σημείο εναλλαγής, δηλαδή:

$$\Theta_s^* = \frac{\Theta_d - \Theta_r \cdot [1 - Se^d(H_d)]}{Se^d(H_d)} \quad (5)$$

όπου Θ_d είναι η υγρασία του εδάφους στο σημείο εναλλαγής, και $Se^d(H_d)$ είναι η τιμή του ενεργού βαθμού κορεσμού στη κύρια καμπύλη στράγγισης για φορτίο H_d .

Όμοια, οι διερευνητικές καμπύλες διαβροχής βρίσκονται χρησιμοποιώντας το διάνυσμα παραμέτρων ($\Theta_s, \Theta_r^*, a^w, n$) στη σχέση (6), όπου το Θ_r^* αντικαθιστά το Θ_r και εμπεριέχει την επίδραση της κλιμάκωσης (scaling) της καμπύλης διαβροχής έτσι ώστε να περάσει από το σημείο εναλλαγής, δηλαδή:

$$\Theta_r^* = \frac{\Theta_d - \Theta_s \cdot Se^w(H_d)}{1 - Se^w(H_d)} \quad (6)$$

όπου $Se^w(H_d)$ είναι η τιμή του ενεργού βαθμού κορεσμού στη κύρια καμπύλη διαβροχής για φορτίο H_d .

Η ενσωμάτωση της παραπάνω διαδικασίας στους υπολογισμούς γίνεται ως εξής: Ένας δείκτης υστέρησης k αντιπροσωπεύει κάθε κόμβο της υπό μελέτη περιοχής. Ο δείκτης αυτός έχει την τιμή +1 εάν το έδαφος στο κόμβο αυτό διαβρέχεται και την τιμή -1 αν το έδαφος στραγγίζει. Όταν μια διεργασία στράγγισης αλλάζει σε διεργασία διαβροχής τότε ο δείκτης k αλλάζει τιμή από -1 σε +1 (ή και το αντίθετο). Όταν ανιχνεύεται μια εναλλαγή εντοπίζεται η κατάλληλη διερευνητική καμπύλη και οι συντελεστές της αποθηκεύονται.

2.4. ΣΥΓΚΛΙΣΗ ΤΗΣ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗΣ ΛΥΣΗΣ

Ο έλεγχος της σύγκλισης της αριθμητικής λύσης έγινε όπως αναλύεται διεξοδικά στην εργασία των Elmaloglou and Diamantopoulos (2009).

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Η δυναμική του εδαφικού νερού προσομοιώνεται για δύο εδάφη, δύο παροχές ($Q = 2$ και 4 l/h), και ύψος άρδευσης 30 mm. Επιλέχθηκαν τα εδάφη loamy sand και silt από τη βάση δεδομένων Rosetta (Scaap and Leij, 1998). Οι τιμές των παραμέτρων που υπεισέρχονται στην χαρακτηριστική καμπύλη υγρασίας $\Theta(H)$ και την καμπύλη $K(H)$, σύμφωνα με τις σχέσεις του van Genuchten (1980) (2) και (4), φαίνονται στον Πίνακα 1.

Περισσότερες πληροφορίες για την προσομοίωση της πρόσληψης του εδαφικού νερού από τις ρίζες καθώς επίσης και την εξάτμιση του εδαφικού νερού από την επιφάνεια του εδάφους δίνονται στην εργασία των Elmaloglou and Malamos (2006). Οι τιμές της αρχικής υγρασίας είναι $0.1641 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ και $0.1979 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ για το έδαφος loamy sand και silt, αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές επιλέχθηκαν με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε σε χρόνο $t = 0$, και τα δύο εδάφη να έχουν την ίδια τιμή ενεργού βαθμού κορεσμού (Se) (4). Η ισαπόσταση μεταξύ των σταλακτήρων πάρθηκε 60 cm και το βάθος του ριζοστρώματος 48 cm.

Πίνακας 1. Τιμές των παραμέτρων του μοντέλου του van Genuchten (1980).

έδαφος	$\theta_s(\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	$\theta_r(\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	$a^w(\text{cm}^{-1})$	$a^d(\text{cm}^{-1})$	$n(-)$	$K_s(\text{cm} \cdot \text{h}^{-1})$
loamy sand	0.390	0.049	0.03467	0.01733	1.7378	4.383
silt	0.00661	0.00330	1.6596	0.489	0.05	1.819

Παρουσιάζονται τα μέτωπα διαβροχής σε πέντε χρονικές στιγμές (στο μισό του χρόνου άρδευσης, στο χρόνο άρδευσης, στις 24 ώρες, στις 48 ώρες και στο συνολικό χρόνο προσομοίωσης) χωρίς να λαμβάνουμε υπόψη το φαινόμενο της υστέρησης στα Σχήματα 2(a,c) και 3(a,c) και λαμβάνοντας υπόψη το φαινόμενο της υστέρησης στα Σχήματα 2(b,d) και 3(b,d). Η διάρκεια της άρδευσης (βλέπε Πίνακα 2) μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση:

$$t_i = \frac{\text{δόση άρδευσης} \times \text{απόσταση των σταλακτηρών} \times \text{απόσταση των πλευρικών}}{\text{παροχή}} \quad (7)$$

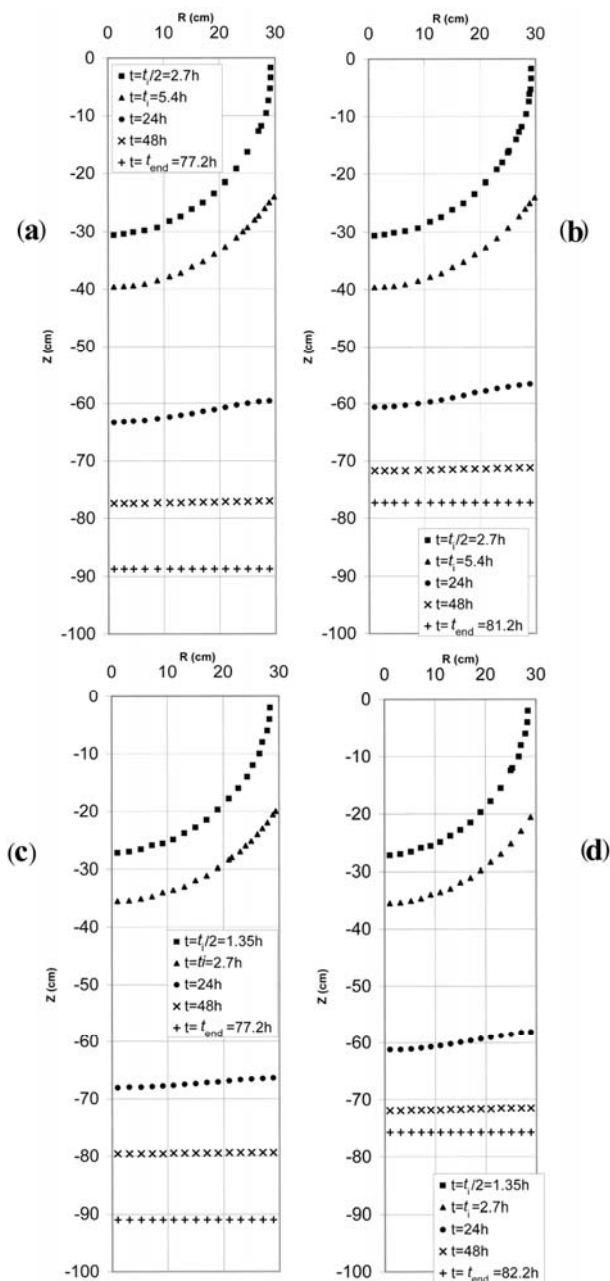
Ο συνολικός χρόνος προσομοίωσης t_{end} ορίζεται ως ο χρόνος που χρειάζεται για να επανέλθει η μέση υγρασία στο ριζόστρωμα (από $z = 0$ έως 48 cm) την αρχική της τιμή.

Πίνακας 2. Συνδυασμοί παροχής και διάρκειας άρδευσης.

Παροχή σταλακτήρα ($\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$)	Διάρκεια άρδευσης (h)	Δόση άρδευσης (mm)
2	5.4	30
4	2.7	30

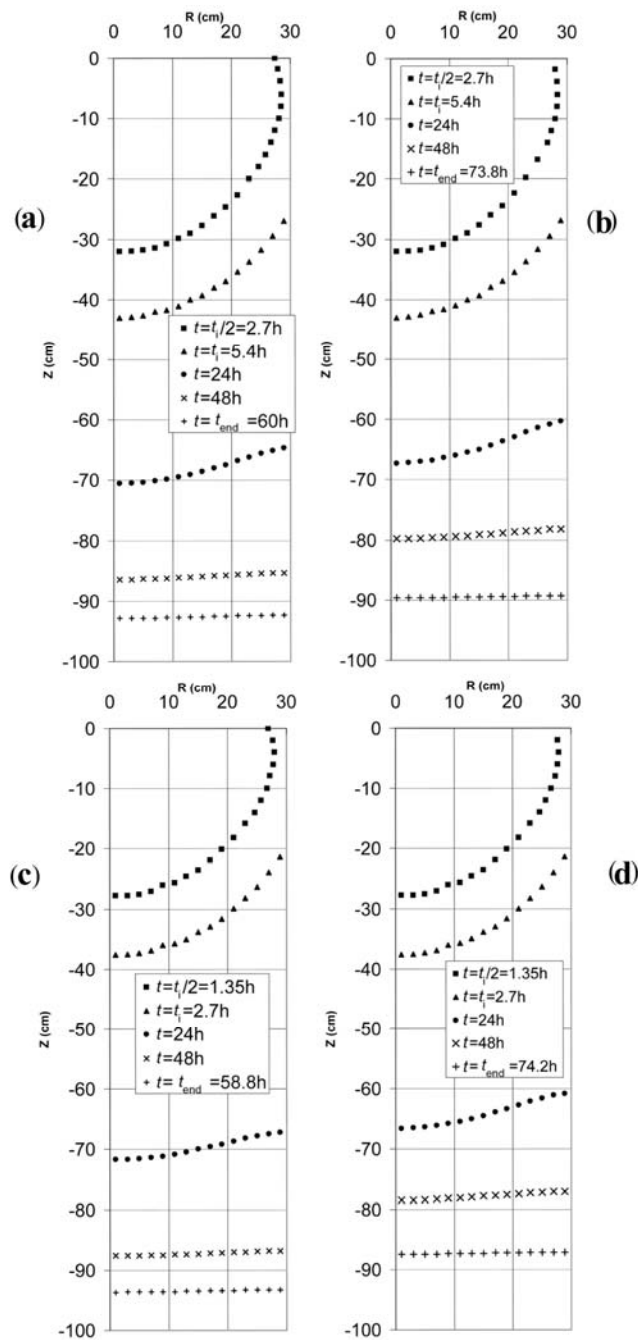
Από τα Σχήματα 2 και 3 προκύπτει ότι για την ίδια παροχή και για χρόνο ίσο με το χρόνο άρδευσης το νερό κινείται ταχύτερα προς τα κάτω στην περίπτωση του πιο περατού εδάφους. Επίσης από τα ίδια Σχήματα φαίνεται καθαρά ότι για χρόνο ίσο με το χρόνο άρδευσης η κατακόρυφη συνιστώσα του μετώπου διαβροχής είναι μεγαλύτερη στη περίπτωση της μικρότερης παροχής. Τα συμπεράσματα αυτά είναι σε συμφωνία με το συμπέρασμα των Bresler *et al.* (1971) και Elmaloglou and Malamos (2006).

Η υστέρηση φαίνεται ότι παίζει σημαντικό ρόλο κατά τη διάρκεια της ανακατανομής του αρδευτικού νερού. Συγκρίνοντας τους συνολικούς χρόνους προσομοίωσης μεταξύ των Σχημάτων [2(a),(c)], [3(a),(c)] και των Σχημάτων [2(b),(d)], [3(b),(d)], προκύπτει ότι η υστέρηση επιβραδύνει χρονικά την στράγγιση των εδαφών. Ειδικότερα, έχουμε μια επιβράδυνση 13.8 – 15.4 ωρών για το έδαφος loamy sand και 4.0 – 5.0 ωρών για το έδαφος silt.



Σχήμα 2. Μέτωπα διαβροχής σε διάφορους χρόνους για το έδαφος loamy sand ($Q = 2 \text{ L/h}$): (a): χωρίς υστέρηση; (b) με υστέρηση
($Q = 4 \text{ L/h}$): (c): χωρίς υστέρηση; (d) με υστέρηση

Για τα δύο εδάφη και για τις δύο παροχές, οι απώλειες λόγω βαθιάς διήθησης κάτω από τα 48 cm, δίνονται στον Πίνακα 3, εκφρασμένες ως ποσοστό του ύψους άρδευσης. Ο Πίνακας 3 δείχνει ότι η υστέρηση μειώνει σημαντικά τις απώλειες του αρδευτικού νερού κάτω από το ριζόστρωμα. Η υστέρηση μειώνει τις παραπάνω απώλειες (8.4 – 10.4%) στο χονδρόκοκκο έδαφος (loamy sand) και (5.9 – 7.5%) στο πιο λεπτόκοκκο έδαφος (silt).



Σχήμα 3. Μέτωπα διαβροχής σε διάφορους χρόνους για το έδαφος silt ($Q=2\text{ L/h}$): (a): χωρίς υστέρηση; (b) με υστέρηση ($Q=4\text{ L/h}$): (c): χωρίς υστέρηση; (d) με υστέρηση

Πίνακας 3. Βαθειά διήθηση σαν ποσοστό του ύψους άρδευσης.

	παροχή	έδαφος	DI [*]	DI ^{**}	DI [*] -DI ^{**}
			(%)	(%)	(%)
Βαθειά διήθηση	2 l/h	loamy sand	23.42	14.97	8.45
		silt	12.97	7.04	5.93
	4 l/h	loamy sand	23.89	13.51	10.38
		silt	14.08	6.55	7.53

* στάγδην άρδευση χωρίς να λαμβάνεται υπόψη το φαινόμενο της υστέρησης

** στάγδην άρδευση λαμβάνοντας υπόψη το φαινόμενο της υστέρησης

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται αριθμητικά αποτελέσματα για την επίδραση του φαινομένου της υστέρησης στη βαθιά διήθηση και την εξέλιξη του μετώπου διαβροχής κάτω από επιφανειακές ισαπέχουσες σημειακές πηγές στάγδην άρδευσης. Παρουσιάζεται η εξέλιξη του μετώπου διαβροχής για δύο εδάφη (loamy sand και silt) και για δύο παροχές ($Q = 2$ και 4 L/h). Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ο ρόλος της υστέρησης είναι σημαντικός κατά τη διάρκεια της ανακατανομής του αρδευτικού νερού. Η υστέρηση μειώνει σημαντικά τις απώλειες του αρδευτικού νερού κάτω από το ριζόστρωμα ειδικότερα στο πιο χονδρόκοκκο έδαφος και παράλληλα αυξάνει τη χρονική διάρκεια της ανακατανομής του αρδευτικού νερού.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Angelakis, A.N., Rolston, D.E., Kadir, T.N. and Scott, V.H., 1993. *Soil water distribution under trickle source*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering-ASCE, 119(3): 484-500.
- Brandt, A., Bresler, E., Diner, N., Ben-Asher, J., Heller, J. and Goldberg, D., 1971. *Infiltration from a trickle source: 1. Mathematical models*. Soil Science Society of America Proceedings, 35: 675-682.
- Bresler, E., Heller, J., Diner, N., Ben-Asher, I., Brandt, A. And Goldberg, D., 1971. *Infiltration from a trickle source. 2. Experimental data and theoretical predictions*. Soil Science Society of America Proceedings, 35(5): 683-689.
- Cote, C.M., Bristow, K.L., Charlesworth, P.B., Cook, F.J. and Thorburn, P.J., 2003. *Analysis of soil wetting and solute transport in subsurface trickle irrigation*. Irrigation Science, 22: 143-156.
- Elmaloglou, S. and Diamantopoulos, E., 2009. *Effects of hysteresis on redistribution of soil moisture and deep percolation at continuous and pulse drip irrigation*, Agricultural Water Management, 96: 533-538.
- Elmaloglou, S. and 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*. Irrigation and Drainage, 55(1): 99-111.
- Hammami, M., Daghari, H., Balti, J. and Maalej, M., 2002. *Approach for predicting the wetting front depth beneath a surface point source: Theory and numerical aspect*. Irrigation and Drainage, 51: 347-360.
- Healy, R.W. and Warrick, A.W., 1988. *A generalized solution to infiltration from a surface point-source*. Soil Science Society of America Journal, 52(5): 1245-1251.
- Kool, J.B. and Parker, J.C., 1987. *Development and evaluation of closed-form expressions for hysteretic soil hydraulic properties*. Water Resources Research, 23(1): 105-114.
- Lafolie, F., Guennelon, R. and Van Genuchten, M.T., 1989. *Analysis of water flow under trickle-irrigation. 1: Theory and numerical solution*. Soil Science Society of America Journal, 53(5): 1310-1318.
- Schaap, M.G. and Leij, L.J., 1998. *Database-related accuracy and uncertainty of pedotransfer functions*. Soil Science, 163: 765-779.
- Scott, P.S., Farquhar, G.J. and Kouwen, N., 1983. *Hysteretic effects on net infiltration. In Advances in infiltration*. American Society of Agricultural Engineers Publication 11-83, St. Joseph, Mich. Pp. 163-170.
- Van Genuchten, M.Th., 1980. *A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils*. Soil Science Society of America Journal, 44: 892-898.

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ WAVE ΣΤΙΣ ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΤΩΝ ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΣΤΟ ΧΡΟΝΟ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΟΥ

Ι.Γ. Αλεξίου¹, Δ.Μ. Παπαμιχαήλ² και Β.Ζ. Αντωνόπουλος³

¹ΕΘΙΑΓΕ, Ινστιτούτο Χαρτογράφησης και Ταξινόμησης Εδαφών Λάρισας,
Οδός Θεοφράστου 1, 413 35 Λάρισα

^{2,3}Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Γεωπονική Σχολή,
54124 Θεσσαλονίκη

E-mails: ¹alexiou@nagref.gr ²papamich@agro.auth.gr, ³vasanton@agro.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Με την τμηματική ανάλυση ευαισθησίας διερευνήθηκε η συμπεριφορά του μοντέλου WAVE στις μεταβολές, των σταθερών στο χρόνο παραμέτρων θ_r , θ_s και a της χαρακτηριστικής καμπύλης $\theta(h)$ του εδάφους κατά ορίζοντα, των παραμέτρων της περιοριστικής συνάρτησης $\alpha(h)$ και της υδραυλικής αγωγιμότητας κορεσμού K_s . Η συμπεριφορά του μοντέλου εξετάστηκε στη συνολική πραγματική διαπνοή, στην στράγγιση από τον πυθμένα του εδαφικού προφίλ, στην ολική τριχοειδή ανύψωση και στην υγρασία του εδάφους κατά ορίζοντα. Οι παράμετροι της $\theta(h)$ ενός ορίζοντα επηρεάζουν την υγρασία του ίδιου του ορίζοντα και ελάχιστα των άλλων οριζόντων. Η ευαισθησία των τεσσάρων εξόδων στην K_s είναι πολύ μικρή, ενώ στην $\alpha(h)$ δεν διαπιστώθηκε ευαισθησία.

Λέξεις κλειδιά: τμηματική ανάλυση ευαισθησίας, μοντέλο WAVE.

INSPECTION OF THE WAVE MODEL BEHAVIOR OVER A RANGE OF VALUES OF CONSTANT IN TIME PARAMETERS

I. Alexiou¹, D. Papamichail² and V. Antonopoulos³

¹NAGREF/Institute for Soil Mapping and Classification, 1,
Theophrastos Str, 41335 Larisa

^{2,3}Aristotle University of Thessaloniki, Sch. of Agriculture, 54124 Thessaloniki

E-mails: ¹alexiou@nagref.gr ²papamich@agro.auth.gr, ³vasanton@agro.auth.gr

ABSTRACT

The piecewise sensitivity analysis was carried out in order to investigate the WAVE model behavior over a wide range of values of constant in time parameters. These include the characteristic curve parameters θ_r , θ_s and a for each horizon, the parameters of the reduction curve $\alpha(h)$ and the saturated hydraulic conductivity K_s . The model behavior was examined on total actual evapotranspiration, drainage from the profile bottom, capillary rise into the actual root depth and the water content of soil horizons. The $\theta(h)$ parameters of one layer mainly influences the water content of that same layer, while, they have a negligible effect on other horizons. The hydraulic conductivity at saturation has a negligible effect on all examined outputs, while, the parameters of the reduction curve have no influence.

Key words: piecewise sensitivity analysis, WAVE model.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στη λήψη αποφάσεων που αφορούν τη διαχείριση των φυσικών πόρων όπως επίσης και στην πρόβλεψη και την αποτίμηση των επιπτώσεων της ανθρώπινης δραστηριότητας στο περιβάλλον χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο τα μαθηματικά μοντέλα. Τα μοντέλα ως μια αναπαράσταση ενός φυσικού συστήματος αποτελούνται από ένα σύνολο συναρτησιακών σχέσεων, μέσω των οποίων οι εισόδοι του μοντέλου (παράμετροι και μεταβλητές) μετατρέπονται σε εξόδους. Οι εξοδοί του μοντέλου δεν παρουσιάζουν την ίδια ευαισθησία σ' όλες τις εισόδους. Για τους κατασκευαστές και τους χρήστες των μοντέλων είναι σημαντικό να προσδιορίζονται οι κυρίαρχες παράμετροι που ρυθμίζουν την συμπεριφορά του μοντέλου (Tang et al., 2007). Μία προσέγγιση για να επιτευχθεί αυτό, είναι μέσω της χρήσης της ανάλυσης ευαισθησίας, η οποία αξιολογεί την επίδραση των παραμέτρων στην ανταπόκριση του μοντέλου (Hall et al., 2005; Sieber and Uhlenbrook, 2005). Ο σκοπός της ανάλυσης ευαισθησίας, όταν αναφερόμαστε σε μοντέλο προσομοίωσης, είναι να προσδιορίσει σε ποιες από τις εισόδους (παράμετροι του μοντέλου και μεταβλητές εισόδου) οι εξοδοί του μοντέλου είναι περισσότερο ευαίσθητες.

Η ανάλυση ευαισθησίας μπορεί, να εφαρμοστεί με δυο τεχνικές (Diels, 1994): Η πρώτη, που ονομάζεται τμηματική (piecewise) ανάλυση ευαισθησίας, επικεντρώνεται στη διαπίστωση της ευαισθησίας των αποτελεσμάτων σε ένα ευρύ φάσμα τιμών μιας μόνο εισόδου. Κάθε είσοδος μεταβάλλεται ξεχωριστά κατά προκαθορισμένο βήμα μεγέθους (π.χ. 5%). Το μέγεθος του βήματος μεταβολής εξαρτάται από την αβεβαιότητα που σχετίζεται με τη δεδομένη είσοδο. Η τεχνική αυτή είναι περισσότερο χρήσιμη για την ανίχνευση γραμμικών και μη γραμμικών επιδράσεων, καθώς και για τον προσδιορισμό κάποιων οριακών τιμών. Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των εισόδων παραμένουν κρυφές και η τεχνική γίνεται μη πρακτική στην περίπτωση που υπάρχει μεγάλος αριθμός μεταβλητών εισόδου και παραμέτρων. Η δεύτερη τεχνική, που αναφέρεται ως ολική (Global) ανάλυση ευαισθησίας, χρησιμοποιείται για να εξεταστεί η συνολική ευαισθησία σε όλες τις εισόδους, συμπεριλαμβανομένων και των πιθανών αλληλεπιδράσεων. Για κάθε είσοδο ορίζονται ζεύγη τιμών και οι προσομοιώσεις εκτελούνται για όλους τους συνδυασμούς των δυο αυτών τιμών. Για να ανιχνευθούν οι μη γραμμικές επιδράσεις πρέπει να οριστούν περισσότερες από δύο τιμές για κάθε είσοδο και να συμπεριλαμβάνονται στην ανάλυση όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί τιμών.

Η τμηματική ανάλυση ευαισθησίας χρησιμοποιείται σ' αυτή την εργασία για να διερευνηθεί η συμπεριφορά του μοντέλου WAVE στις μεταβολές των παραμέτρων του, που είναι σταθερές στο χρόνο.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1. ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ

Χάριν απλοποίησης, ας θεωρήσουμε ότι F_0 είναι μία έξοδος του μοντέλου, η τιμή της οποίας διαμορφώνεται από τις εισόδους F_i ($i=1,2,..n$), σύμφωνα με τη σχέση (McCuen, 1973):

$$F_0 = f(F_1, F_2, \dots, F_n) \quad (1)$$

σύμφωνα με τον ορισμό της τμηματικής ανάλυσης ευαισθησίας, η ευαισθησία, S_a , της εξόδου F_0 σε κάποια από τις εισόδους F_i είναι:

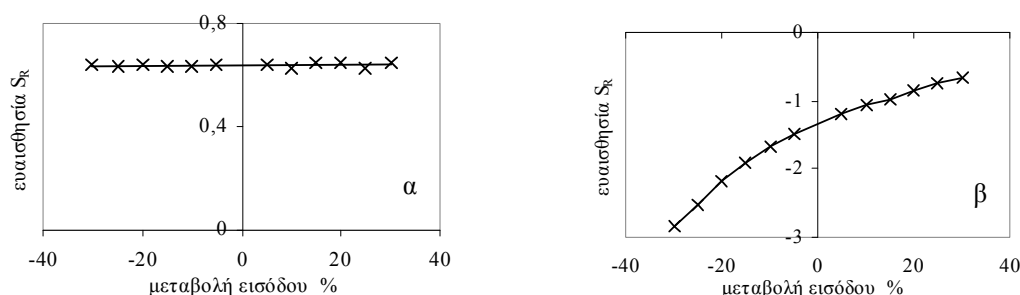
$$S_a = \frac{\Delta F_0}{\Delta F_i} = \frac{f(F_i + \Delta F_i, F_j /_{j \neq i}) - f(F_1, F_2, \dots, F_n)}{\Delta F_i} \quad (2)$$

όπου: S_a είναι η ευαισθησία, ΔF_0 η μεταβολή της εξόδου και ΔF_i είναι η μεταβολή της εισόδου F_i . Η ευαισθησία μπορεί να εκφραστεί με δυο μορφές: την απόλυτη και τη σχετική (McCuen, 1973). Η μορφή με τη οποία θα παρουσιασθούν οι τιμές της ευαισθησίας εξαρτάται από τον σκοπό για τον οποίο προορίζονται και τη χρήση τους. Τιμές ευαισθησίας που υπολογίζονται με βάση την εξ. (2) έχουν τη μορφή των απόλυτων τιμών. Οι τιμές αυτές δεν είναι κατάλληλες για σύγκριση των τιμών ευαισθησίας, κι αυτό γιατί δεν είναι ανεξάρτητες από το μέγεθος των F_0 και F_i . Αν διαιρεθεί ο αριθμητής της εξ. (2) με F_0 και ο παρονομαστής με F_i , προκύπτει μια εκτίμηση της σχετικής μεταβολής του F_0 ως προς τη σχετική μεταβολή του F_i (McCuen, 1973):

$$S_R = \frac{\Delta F_0 / F_0}{\Delta F_i / F_i} = \frac{\Delta F_0}{\Delta F_i} \frac{F_i}{F_0} \quad (3)$$

Οι τιμές της σχετικής ευαισθησίας S_R είναι ανεξάρτητες από το μέγεθος των F_0 και F_i . Για αυτό αποτελούν έναν έγκυρο τρόπο για τη σύγκριση των παραγόντων της ευαισθησίας.

Αν οι τιμές S_R τοποθετηθούν στον άξονα των τεταγμένων ενός καρτεσιανού συστήματος και στον άξονα των τετμημένων τοποθετηθούν οι μεταβολές % της εισόδου, προκύπτει το διάγραμμα της συνάρτησης ευαισθησίας (Σχήμα 1). Όταν οι τιμές S_R για όλο το φάσμα των μεταβολών ΔF_i (5%, 10% κ.ο.κ.) είναι ίσες (Σχήμα 1α), η ευαισθησία είναι γραμμική και μπορεί να εκφραστεί μόνο με την τιμή S_R . Αν οι τιμές S_R διαφέρουν για τις μεταβολές ΔF_i (5%, 10% κ.ο.κ.), τότε η ευαισθησία εκφράζεται με το διάγραμμα συνάρτησης ευαισθησίας (Σχήμα 1β).



Σχήμα 1. Διαγράμματα συνάρτησης ευαισθησίας: (α) για γραμμική ευαισθησία, (β) για μη γραμμική ευαισθησία.

2.2. TO MONTELO WAVE

Το μοντέλο WAVE (Water and Agrochemicals in soil, crop and Vadose Environment) (Vanclooster et al., 1996), 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 (van Genuchten, 1980) (Εξ.3) και η υδραυλική αγωγιμότητα με τη σχέση των Mualem-van Genuchten (van Genuchten, 1980) (Εξ. 4)

$$\theta(h) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) / [1 + (a|h|)^n]^m \quad (4)$$

$$K(h) = K_s \{1 - (a|h|)^{n-1} [1 + (a|h|)^n]^{-m}\}^2 / [1 + (a|h|)^n]^{m/2} \quad (5)$$

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 και K_s είναι η υδραυλική αγωγιμότητα στον κορεσμό. Η δυνατότητα του μοντέλου να περιγράφει με ικανοποιητική ακρίβεια το ισοζύγιο του εδαφικού νερού στις Μεσογειακές συνθήκες έχει διαπιστωθεί από πολλούς ερευνητές (Muñoz-Carpena et al., 1998; Ducheyne et al., 2001; Fernández et al., 2002; Alexiou et al., 2002; Alexiou, 2005).

Για να περιγράψει το φαινόμενο της δραστικής μείωσης της πρόσληψης σε υψηλές τιμές ύψους πίεσης, που συμβαίνουν κοντά στον κορεσμό λόγω αναερόβιων συνθηκών που επικρατούν και σε χαμηλές τιμές του ύψους πίεσης, που οφείλονται σε μεγάλο έλλειμμα υγρασίας, το WAVE χρησιμοποιεί την αδιάστατη περιοριστική συνάρτηση $\alpha(h)$, οι τιμές της οποίας υπολογίζονται από τέσσερις χαρακτηριστικές τιμές του ύψους πίεσης h_a , h_{FC} , h_c , και h_{PWP} σε cm. Για την κρίσιμη τιμή του ύψους πίεσης, h_c , μπορεί να δεχτεί μια τιμή (h_{c1}) για τις περιπτώσεις που η ζήτηση για διαπνοή είναι μικρή και μια κατά απόλυτη τιμή μεγαλύτερη (h_{c2}) για τις περιπτώσεις που η ζήτηση για διαπνοή είναι μεγάλη.

2.3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Τα πειραματικά δεδομένα προέρχονται από πειραματικούς αγρούς του Σταθμού Γεωργικής Έρευνας Παλαμά Καρδίτσας, καλλιεργημένους με καλαμπόκι κατά τις καλλιεργητικές περιόδους 1998 και 1999. (Αλεξίου, 2005). Οι παράμετροι του μοντέλου χαρακτηριστικής καμπύλης του van Genuchten (Πίνακας 1) προσδιορίστηκαν από αδιατάρακτα εδαφικά δείγματα σε τρία βάθη 25, 60 και 110 cm με τη συσκευή πίεσεως της Soil moisture equipment και το πρόγραμμα RETC (van Genuchten et al., 1991). Στον Πίνακα 1 δίνονται επίσης οι μετρήσεις υδραυλικής αγωγιμότητας στον κορεσμό (K_s), που έγιναν σε διάφορα βάθη με το περατόμετρο Guelph.

Πίνακας 1. Τιμές των παραμέτρων της εξίσωσης XK του van Genuchten.

	Παράμετροι εξίσωσης van Genuchten για $m=1-1/n$					
	Πειραματικός 1998			Πειραματικός 1999		
Ορίζοντας	A	B	Γ	A	B	Γ
Βάθος ορίζοντα (cm)	0 - 30	30 - 95	95 - 140	0 - 48	48 - 75	75 - 140
θ_r ($cm^{-3} cm^{-3}$)	0,09467	0,08799	0	0	0,0927	0
θ_s ($cm^{-3} cm^{-3}$)	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
K_s ($cm day^{-1}$)	78,36	71,25	14,36	83,5	76,25	4,50

Η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας αναφοράς υπολογίστηκε με τη μέθοδο Penman-Monteith (Allen et al., 1998; Kotsopoulos et al., 2002; Παπαμιχαήλ και Γεωργίου, 1999) και η δυναμική εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας από την εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας αναφοράς και τους φυτικούς συντελεστές κατά στάδιο της καλλιέργειας όπως προτείνονται για τις Ελληνικές συνθήκες (Allen et al., 1998; Παπαζαφειρίου, 1999).

2.4. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ

Ο σκοπός της ανάλυσης ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκε, ήταν να διερευνηθεί η συμπεριφορά του μοντέλου WAVE στις μεταβολές όλων των παραμέτρων του, που είναι σταθερές στο χρόνο: Οι παράμετροι θ_r , θ_s και a της χαρακτηριστικής καμπύλης του εδάφους κατά ορίζοντα, οι τιμές της περιοριστικής συνάρτησης $\alpha(h)$ και η υδραυλική αγωγιμότητα κορεσμού K_s , είναι οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν.

Ως μέθοδος ανάλυσης χρησιμοποιήθηκε η τμηματική ή κατά βήματα ανάλυση ευαισθησίας για τα δεδομένα του πειραματικού καλαμποκιού του 1998 και του 1999 στην περιοχή του Παλαμά Καρδίτσας. Κάθε παράμετρος μεταβάλλονταν χωριστά με βήμα 5 % γύρω από την τιμή της που προέκυψε από τις πειραματικές μετρήσεις ή από τη βιβλιογραφία. Η αύξηση ή η μείωση της τιμής των παραμέτρων έφτανε μέχρι το 30 % της τιμής αναφοράς.

Η συμπεριφορά του μοντέλου εξετάστηκε σε τέσσερις μεταβλητές εξόδου: α) τη συνολική πραγματική διαπνοή (T_a) κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου. Συγκεκριμένα εξετάστηκε ο λόγος της συνολικής πραγματικής προς τη συνολική δυναμική διαπνοή (T_a/T_c), β) την ολική ροή (στράγγιση) από τον πυθμένα του εδαφικού προφίλ, γ) την ολική τριχοειδή ανύψωση από τα βαθύτερα τμήματα του εδαφικού προφίλ προς το αποτελεσματικό ριζόστρωμα της καλλιέργειας και δ) την υγρασία του εδάφους κατά ορίζοντα. Η ευαισθησία των μεταβλητών εκφράζεται με τη σχετική ευαισθησία S_R . Για τις τρεις πρώτες μεταβλητές χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω σχέση για τον υπολογισμό της σχετικής ευαισθησίας τους:

$$S_R = \frac{(\Psi_m - \Psi_{\text{αναφ}})/\Psi_{\text{αναφ}}}{(Z_m - Z_{\text{αναφ}})/Z_{\text{αναφ}}} \quad (6)$$

όπου: S_R είναι η σχετική ευαισθησία της μεταβλητής εξόδου Ψ , Ψ_m είναι η τιμή της μεταβλητής εξόδου, όταν ως τιμή εισόδου της παραμέτρου Z στο μοντέλο χρησιμοποιείται η μεταβολή της Z_m , $\Psi_{\text{αναφ}}$ η τιμή της μεταβλητής εξόδου Ψ , όταν ως τιμή εισόδου χρησιμοποιείται η τιμή αναφοράς της Z , που είναι η $Z_{\text{αναφ}}$.

Για τη μελέτη της τέταρτης μεταβλητής, της υγρασίας του εδάφους κατά ορίζοντα χρησιμοποιήθηκε για την έκφρασή της η παρακάτω ποσότητα:

$$S_R(\theta_i) = 1/n \sum_{j=1}^n \frac{(\theta_{ij} - \theta_{\text{αναφ}_{ij}})/\theta_{\text{αναφ}_{ij}}}{(Z_m - Z_{\text{αναφ}})/Z_{\text{αναφ}}} \quad (7)$$

όπου: $S_R(\theta_i)$ είναι η ευαισθησία της υγρασίας του ορίζοντα i , n είναι ο αριθμός ημερών της περιόδου προσομοίωσης, θ_{ij} είναι η υγρασία του ορίζοντα i κατά την $j^{\text{η}}$ ημέρα, όταν στην προσομοίωση χρησιμοποιείται η μεταβολή, Z_m , της παραμέτρου εισόδου Z και $\theta_{\text{αναφ}_{ij}}$ η αντίστοιχη υγρασία του ορίζοντα που προκύπτει από την προσομοίωση με τιμή παραμέτρου εισόδου την τιμή αναφοράς της Z , που είναι η $Z_{\text{αναφ}}$.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Τα αποτελέσματα της μονοδιάστατης ανάλυσης ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκε με μεγάλο αριθμό εκτελέσεων του μοντέλου δίνονται συγκεντρωτικά στους Πίνακες 2 και 3.

Οι παράμετροι θ_r , θ_s , και a της ΧΚ του εδάφους παρουσιάζουν μικρή ή μεγάλη επίδραση σ' όλες τις μεταβλητές εξόδου του μοντέλου που εξετάζονται. Η ευαισθησία όλων των μεταβλητών εξόδου στη μεταβολή των παραμέτρων θ_r , θ_s και a είναι γραμμική και δίνεται στους Πίνακες 2 και 3 με την τιμή της σχετικής ευαισθησίας S_R .

Όπως φαίνεται από τους Πίνακες 2 και 3, η υγρασία των τριών οριζόντων παρουσιάζει μεγαλύτερη ευαισθησία στη μεταβολή των παραμέτρων της ΧΚ του ίδιου του ορίζοντα και πολύ μικρότερη (πρακτικά μη σημαντική) στη μεταβολή των παραμέτρων στους άλλους ορίζοντες.

Πίνακας 2. Αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας για τον πειραματικό του 1998.

Ορίζον. Παράμ.	Τιμές παραμέτρων			Ευαισθησία για					
	T _{αναφ}	T _{χαμ}	T _{υψηλ}	Ta/Tc	Στράγγ.	Τριχ. Αν.	θ _(A)	θ _(B)	θ _(C)
A									
θ _r	0,094	0,067	0,123	-0,0214	0,1325	-0,0699	<u>0,2635</u>	0,0188	0,0046
θ _s	0,397	0,278	0,516	0,0900	-0,5860	0,2948	<u>0,6411</u>	-0,0800	-0,0193
a	0,008	0,006	0,010	-0,0044	0,0011	0,0006	<u>-0,1492</u>	0,0172	0,005
Ks	78,36	54,85	101,8	0,0044	0,0001	-0,0001	-0,0027	-0,0019	-0,0011
B									
θ _r	0,088	0,062	0,114	0,0042	0,0269	-0,0932	0,0222	<u>0,2273</u>	0,0137
θ _s	0,419	0,293	0,545	0,1949	-0,0879	0,4388	0,0996	<u>0,8923</u>	0,1080
a	0,016	0,011	0,020	-0,1068	0,0021	0,001	-0,0571	<u>-0,1807</u>	0,0336
Ks	71,25	49,88	92,63	-0,0213	0,0011	-0,0033	0,0155	-0,0384	-0,0219
C									
θ _r	0	-	0,030	0,0013	-0,0069	-0,0285	-0,0000	-0,0019	<u>0,0157</u>
θ _s	0,429	0,300	0,558	0,0203	0,1168	0,3738	-0,0005	0,0261	<u>0,9272</u>
a	0,014	0,010	0,019	0,0154	-0,0159	-0,0025	0,0126	0,0100	<u>-0,0641</u>
Ks	14,36	10,05	18,67	0,0075	-0,0078	0,0013	-0,0066	-0,0038	-0,0209
α(h)									
h _a	10	0	25	0	0	0	0	0	0
h _{FC}	25	10	200	0	0	0	0	0	0
h _{cl}	500	200	1000	0,0016	0	0,0085	-0,0068	-0,0015	0,0001
h _{c2}	1000	500	1500	0	0	0	0	0	0

Μονάδες: Ks [cm/ημέρα]· h_a, h_{FC} και h_c [-cm H₂O]· Τιμές εξόδου της προσομοίωσης αναφοράς: Ta/Tc=0,778· Στράγγιση= -12,4 mm· Τριχοειδής ανύψωση προς το ριζόστρωμα= 28,6 mm.

Πίνακας 3. Αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας για τον πειραματικό του 1999.

Ορίζον. Παράμ.	Τιμές παραμέτρων			Ευαισθησία για					
	T _{αναφ}	T _{χαμ}	T _{υψηλ}	Ta/Tc	Στράγγ.	Τριχ. Αν.	θ _(A)	θ _(B)	θ _(C)
A									
θ _r	0	-	0,06	-0,0041	0	0,0020	<u>0,2078</u>	0,0408	-0,0006
θ _s	0,399	0,279	0,518	0,1405	0	-0,0772	<u>1,0947</u>	0,2785	0,0028
a	0,008	0,006	0,010	-0,0168	0	-0,0226	<u>-0,2254</u>	-0,0567	0,0037
Ks	83,50	58,5	108,6	-0,0016	0	0	-0,0014	0,0013	-0,0013
B									
θ _r	0,093	0,065	0,121	-0,0132	0	-0,027	-0,0152	<u>0,241</u>	-0,0014
θ _s	0,400	0,280	0,521	0,0557	0	0,1015	0,0663	<u>0,2497</u>	0,0058
a	0,015	0,010	0,019	-0,0508	0	-0,5067	-0,0685	<u>-0,0685</u>	0,0164
Ks	76,25	53,4	99,1	0,0067	0	0,0101	0,0108	-0,0165	-0,0053
C									
θ _r	0	-	0,06	-0,0004	0	-0,0102	-0,0017	0,013	<u>0,0318</u>
θ _s	0,446	0,312	0,580	0,015	0	0,4061	0,0128	0,3823	<u>1,0282</u>
a	0,014	0,010	0,018	-0,0270	0	-0,7107	-0,0235	-0,0728	<u>-0,0746</u>
Ks	4,50	3,2	5,9	0,0107	0	0	0,0091	0,0165	-0,0231
α(h)									
h _a	10	0	25	0	0	0	0	0	0
h _{FC}	25	10	200	0	0	0	0	0	0
h _{cl}	500	200	1000	0,0035	0	0	-0,0064	-0,004	0,0001
h _{c2}	1000	500	1500	0	0	0	0	0	0

Μονάδες: Ks [cm/ημέρα]· h_a, h_{FC} και h_c [-cm H₂O]· Τιμές εξόδου της προσομοίωσης αναφοράς: Ta/Tc=0,904· Στράγγιση= -2,4 mm· Τριχοειδής ανύψωση προς το ριζόστρωμα= 19,7 mm.

Με τον ίδιο τρόπο οι παράμετροι της ΧΚ επηρεάζουν έμμεσα και τις υπόλοιπες μεταβλητές εξόδου [πραγματική διαπνοή (T_a/T_c), στράγγιση (D), τριχοειδή ανύψωση (CR)]. Η πραγματική διαπνοή επηρεάζεται περισσότερο από τη μεταβολή των παραμέτρων του Β ορίζοντα το 1998 (Πίνακας 2), ενώ το 1999 από τις παραμέτρους

του Α (Πίνακας 3). Αυτό συμβαίνει γιατί το 70% περίπου του βάθους 75 cm ενεργού ριζοστρώματος της καλλιέργειας (Αλεξίου, 2005), το 1998 βρίσκεται στην έκταση του Β ορίζοντα, ενώ το 1999 στην έκταση του Α ορίζοντα, όπως διαπιστώνεται από τον Πίνακα 1.

Η μεγαλύτερη ευαισθησία της υγρασίας των οριζόντων παρατηρείται στη μεταβολή της παραμέτρου θ_s και ακολουθούν με φθίνουσα σειρά μεγέθους η ευαισθησία στις παραμέτρους θ_r και a της ΧΚ (Πίνακας 2 και 3).

Όλες οι μεταβλητές εξόδου παρουσιάζουν μικρή ευαισθησία που πρακτικά είναι ασήμαντη στις μεταβολές της K_s . Ίσως αυτό να οφείλεται στο γεγονός ότι το εδαφικό προφίλ που προσομοιώθηκε δεν βρέθηκε σε κατάσταση κορεσμού, με εξαίρεση τις σύντομες χρονικές περιόδους κατά τις οποίες συνέβαινε άρδευση ή βροχόπτωση. Επιπλέον η χρονική μεταβολή της K_s , που κυρίως οφείλεται στη συμπίεση του εδάφους κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου, δεν λαμβάνεται υπόψη στους υπολογισμούς, αφού μόνο μια τιμή μπορεί να εισαχθεί για κάθε εδαφικό ορίζοντα ή πεδολογική στρώση. Χαμηλές τιμές σχετικής ευαισθησίας του μοντέλου WAVE στην K_s , αναφέρουν και οι Fernández et al., (2002). Συγκεκριμένα αναφέρουν τιμή σχετικής ευαισθησίας 0,005 για την εξατμισοδιαπνοή, 0,014 για τη στράγγιση και -0,017 για την υγρασία του εδάφους.

Οι παράμετροι της περιοριστικής συνάρτησης $\alpha(h)$ δεν παρουσιάζουν επίδραση στις μεταβλητές εξόδου. Μια πρακτικά ασήμαντη ευαισθησία διαπιστώθηκε στις μεταβολές του κρίσιμου ύψους πίεσης h_c . Κι εδώ ισχύει αυτό που αναφέρθηκε παραπάνω για την ευαισθησία στις μεταβολές της K_s ότι δηλαδή το προφίλ δεν βρέθηκε σε κατάσταση κορεσμού, ώστε να είναι δυνατή η διευκρίνιση για το αν οι μεταβλητές εξόδου επηρεάζονται από το σημείο αναεροβίωσης (h_a).

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου WAVE στις παραμέτρους της χαρακτηριστικής καμπύλης $\theta(h)$, στις τιμές της περιοριστικής συνάρτησης $\alpha(h)$ και στην υδραυλική αγωγιμότητα κορεσμού K_s , προέκυψε ότι:

- Η υγρασία των τριών οριζόντων παρουσιάζει μεγαλύτερη ευαισθησία στη μεταβολή των παραμέτρων της ΧΚ του ίδιου του ορίζοντα και πολύ μικρότερη (πρακτικά μη σημαντική) στη μεταβολή των παραμέτρων στους άλλους ορίζοντες.
- Η μεγαλύτερη ευαισθησία της υγρασίας των οριζόντων παρατηρείται στη μεταβολή της παραμέτρου θ_s .
- Όλες οι μεταβλητές εξόδου παρουσιάζουν μικρή ευαισθησία που πρακτικά είναι ασήμαντη στις μεταβολές της K_s .
- Οι παράμετροι της περιοριστικής συνάρτησης $\alpha(h)$ δεν παρουσιάζουν επίδραση στις μεταβλητές εξόδου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 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., σελ. 232.
- 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, pp. 387-395.
- 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.

- Diels, J., 1994. *A validation procedure accounting for model input uncertainty: methodology and application to the SWATRER model*. PhD Thesis, faculty of Agricultural and Applied Biological Sciences, K. U. Lueven, Belgium, 173 pp.
- Ducheyne, S., Schadeck, N., Vanongeval, L., Vandendriessche, H. and Feyen, J., 2001. *Assessment of the parameters of a mechanistic soil-crop-nitrogen simulation model using historic data of experimental field sites in Belgium*. *Agricultural Water Management*, 51: 53-78.
- Fernández, J.F., Slawinski, C., Moremo, F., Walczak, R.T. and Vanclooster, M., 2002. *Simulating the fate of water in a soil-crop system of a semi-arid Mediterranean area with the WAVE 2.1 and the EURO-ACCESS_II models*. *Agricultural Water Management*, 56: 113-129.
- Hall, J., Tarantola, S., Bates, P.D. and Horritt, M.S., 2005. *Distributed sensitivity analysis of flood inundation model calibration*. *Journal of Hydraulic Engineering* 131: 117-126.
- 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, pp 65-73.
- McCuen, R.H., 1973. *The role of sensitivity analysis in hydrologic modeling*. *Journal of Hydrology*, 18: 37-53.
- Muñoz-Carpena, R., Vanclooster, M. and Villacé-Reyes, E., 1998. *Evaluation of the WAVE model*. In: *Hydrologic/Water Quality Model: Use and Application Evaluation*, (eds. J. E. Parsons, R. Huffman and D. Thomas), Project SW21 Hydrology Group, ASAE, (URL: <http://www3.bae.ncsu.edu/s273/ModelProject/index.html>).
- Παπαζαφειρίου, Ζ., 1999. *Οι ανάγκες σε νερό των καλλιεργειών*. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, σελ 347.
- 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, σελ. 183-189.
- Sieber, A. and Uhlenbrook, S., 2005. *Sensitivity analyses of a distributed catchment model to verify the model structure*. *Journal of Hydrology*, 310: 216-235.
- Tang, Y., Reed, P., Wagener, T. and vanWerkhoven, K., 2007. *Comparing sensitivity analysis methods to advance lumped watershed model identification and evaluation*. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13: 503-517.
- 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.
- van Genuchten, M.T., 1980. *A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils*. *Soil Science Society of American Journal*, 44: 892-898.
- 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.

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΤΟΥ ΕΛΑΦΙΚΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΕ ΑΓΡΟ ΥΠΟ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΤΑΓΔΗΝ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΜΕ ΤΟ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ SWMS_3D

B.Z. Αντωνόπουλος* και Σ.Α. Κωτσόπουλος

Τομέας Εγγείων Βελτιώσεων, Εδαφολογίας και Γεωργικής Μηχανικής

Γεωπονική Σχολή Α.Π.Θ., 54124 Θεσσαλονίκη

*E-mail: vasanton@agro.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία γίνεται η προσομοίωση της χωροχρονικής κατανομής της εδαφικής υγρασίας και ο υπολογισμός του υδατικού ισοζυγίου του εδάφους, με το μαθηματικό μοντέλο SWMS_3D. Χρησιμοποιούνται πειραματικά δεδομένα από έναν αγρό καλλιεργούμενο με ηλίανθο και αρδευόμενο με στάγδην άρδευση, κατά την διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου 2003. Για τον προσδιορισμό των υδραυλικών ιδιοτήτων επιλύθηκε το αντίστροφο πρόβλημα με το μοντέλο HYDRUS_1D, χρησιμοποιώντας τις μετρημένες τιμές της εδαφικής υγρασίας της περιόδου πριν τις αρδεύσεις, όταν η ροή του νερού θεωρείται μονοδιάστατη στην κατακόρυφο διεύθυνση. Η σύγκριση των μετρημένων τιμών της εδαφικής υγρασίας με τις υπολογισμένες τιμές από το μοντέλο έδειξαν ότι υπάρχει μεταξύ τους ικανοποιητική συμφωνία, ειδικά για τα πρώτα 50 cm βάθους όπου η επίδραση του σταλακτήρα είναι πιο ισχυρή.

Λέξεις κλειδιά: Στάγδην άρδευση, τριδιάστατη ροή, SWMS_3D.

SOIL WATER DYNAMICS SIMULATION IN A FIELD UNDER DRIP IRRIGATION USING THE NUMERICAL MODEL SWMS_3D

V.Z. Antonopoulos* and S.A. Kotsopoulos

Department of Hydraulics, Soil Science and Agricultural Engineering

School of Agriculture A.U.Th.

*E-mail: vasanton@agro.auth.gr

ABSTRACT

In the present study, soil water dynamics and soil water budget are simulated using the three-dimensional numerical model SWMS_3D. The experimental data referred in a field cultivated with sunflower, under drip irrigation during the 2003 growing season. The soil hydraulic properties were determined by solving the inverse problem, using the numerical model HYDRUS_1D with the measured values of volumetric soil moisture content, for the time before the irrigation period, where the flow of water in soil could be considered one-dimensional in the vertical direction. The comparison between the computed and measured values of volumetric soil moisture content showed that there was good agreement between them, especially for the first 50 cm depth, where the effect of trickle emitter was stronger.

Keyword: drip irrigation, three-dimensional flow, SWMS_3D.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η άρδευση με σταγόνες είναι σήμερα μία από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους, ειδικά σε περιοχές με ξηρό και ημίξηρο κλίμα. Παρ' όλη την ευρεία εφαρμογή της μεθόδου και την εκτενή μελέτη της ως προς την αποδοτικότητα εφαρμογής της (Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη κ.α., 2006), οι εργασίες που αφορούν στην προσομοίωση της δυναμικής του νερού υπό συνθήκες στάγδην άρδευσης είναι πολύ λίγες, εξαιτίας της τριδιάστατης γεωμετρίας της ροής γύρω από τον σταλακτήρα και περιορίζονται κυρίως στην μελέτη του όγκου διαβροχής και των παραμέτρων που τον επηρεάζουν (Elmaloglou and Malamos, 2006).

Η τριδιάστατη ροή του νερού στο έδαφος περιγράφεται με την μη γραμμική μερική διαφορική εξίσωση του Richards, για την οποία δεν υπάρχουν αναλυτικές λύσεις για γενικευμένες αρχικές και οριακές συνθήκες. Οι λύσεις που δίνονται είναι αριθμητικές και βασίζονται είτε στην μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών (Ελμαλόγλου και Γρηγοράκης, 1993), είτε στην μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (Huyakorn et al., 1986; Ζήσης και Τερζίδης, 1995).

Στην μελέτη που ακολουθεί, το τριδιάστατο μοντέλο SWMS_3D χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της χωροχρονικής κατανομής της εδαφικής υγρασίας και τον υπολογισμό του υδατικού ισοζυγίου σε έναν αγρό καλλιεργούμενο με ηλίανθο, υπό συνθήκες στάγδην άρδευσης. Οι μετρήσεις της εδαφικής υγρασίας στα διάφορα βάθη του αγρού χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του μοντέλου.

2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

2.1. ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Το μοντέλο SWMS_3D αναπτύχθηκε από το USDA-Salinity Laboratory (Simunek et al., 1995) και είναι ένα αριθμητικό μοντέλο προσομοίωσης της τριδιάστατης κίνησης του νερού και της μεταφοράς μάζας των διαλυμένων ουσιών σε πορώδη μέσα μεταβαλλόμενου βαθμού κορεσμού. Η κίνηση του νερού στο έδαφος περιγράφεται από την μικτής μορφής εξίσωση του Richards, που έχει ως εξής:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[K \left(K_{ij}^A \frac{\partial h}{\partial x_j} + K_{iz}^A \right) \right] - S(x_i, h) \quad (1)$$

όπου θ είναι η περιεχόμενη κατ' όγκο εδαφική υγρασία [$L^3 L^{-3}$], h είναι το ύψος πίεσης [L], K είναι η υδραυλική αγωγιμότητα [LT^{-1}], K_{ij}^A είναι οι συνιστώσες του τανυστή ανισοτροπίας της υδραυλικής αγωγιμότητας του εδάφους, x_i ($i=1,2,3$) είναι οι διαστάσεις του χώρου [L], t είναι ο χρόνος [T] και $S(x_i, h)$ είναι η συνάρτηση πρόσληψης της εδαφικής υγρασίας από τις ρίζες των φυτών [$L^3 L^{-3} T^{-1}$].

Η χαρακτηριστική καμπύλη υγρασίας του εδάφους περιγράφεται με την εξίσωση του van Genuchten (van Genuchten, 1980) και η υδραυλική αγωγιμότητα με τη σχέση των Mualem-van Genuchten που δίνονται αντίστοιχα από τις σχέσεις:

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left[1 + (a|h|)^n \right]^{-m} \quad (2)$$

$$K(Se) = K_s Se^{1/2} \left[1 - (1 - Se^{1/m})^m \right]^2 \quad (3)$$

όπου θ_s είναι η εδαφική υγρασία κορεσμού [$L^3 L^{-3}$], θ_r είναι η υπολειμματική υγρασία [$L^3 L^{-3}$], K_s είναι η υδραυλική αγωγιμότητα κορεσμού [LT^{-1}], $Se = (\theta - \theta_r) (\theta_s - \theta_r)^{-1}$

είναι ο αποτελεσματικός βαθμός κορεσμού και α , n , m είναι παράμετροι προσαρμογής.

Η πρόσληψη της εδαφικής υγρασίας από τις ρίζες των φυτών, περιγράφεται ως συνάρτηση της μέγιστης πρόσληψης της εδαφικής υγρασίας από το φυτό και του περιοριστικού παράγοντα $a(h)$ λόγω υδατικής καταπόνησης (Feddes, 1978). Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται είναι οι εξής (Vrugt et al., 2001):

$$S(x_i, h) = a(h) S_{\max}(x_i) \quad (4)$$

$$S_{\max}(x_i) = x_1 x_2 \beta(x_i) T_{\text{pot}} \left[\int_0^{x_{3\max}} \int_0^{x_{2\max}} \int_0^{x_{1\max}} \beta(x_i) dx_1 dx_2 dx_3 \right]^{-1} \quad (5)$$

$$\beta(x_i) = \prod_{i=1}^3 (1 - x_i(t)/x_{i\max}) + c \quad (6)$$

όπου $S(x_i, h)$ είναι η πρόσληψη της εδαφικής υγρασίας από τα φυτά, $S_{\max}(x_i)$ είναι η μέγιστη κανονικοποιημένη πρόσληψη της εδαφικής υγρασίας [$L^3 L^{-3} T^{-1}$], T_p είναι η δυναμική διαπνοή [LT^{-1}], $\beta(x_i)$ είναι η συνάρτηση πυκνότητας των ριζών στο έδαφος [-], $x_{i\max}$ είναι το μέγιστο μήκος των ριζών σε κάθε χωρική διάσταση, και c είναι μία παράμετρος προσαρμογής. Η συνάρτηση $x_i(t)$ εκφράζει το μήκος των ριζών σε κάθε διάσταση του χώρου και σε κάθε χρονική στιγμή και δίνεται από την λογιστική εξίσωση (Αντωνόπουλος, 1999):

$$x_i(t) = x_{i\max} / (1 + a \exp(-b(t - t_0))) \quad (7)$$

όπου t_0 είναι η ιουλιανή ημέρα σποράς [T^{-1}], a και b είναι παράμετροι προσαρμογής.

Για την εκτίμηση της δυναμικής εξάτμισης και της διαπνοής χρησιμοποιείται η διαδικασία διαχωρισμού της δυναμικής εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας στις δύο συνιστώσες της, με την βοήθεια του δείκτη φυλλικής επιφάνειας, σύμφωνα με την οποία (Belmans et al., 1983; Αντωνόπουλος 1999):

$$E_p = ET_c \exp(-0.623 LAI_t) \quad (8)$$

$$T_p = ET_c - E_p \quad (9)$$

όπου ET_c είναι η δυναμική εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας (LT^{-1}), E_p είναι η δυναμική εξάτμιση (LT^{-1}), T_p είναι η δυναμική διαπνοή (LT^{-1}) και LAI_t είναι ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας στον χρόνο t ($L^2 L^{-2}$).

Η επίλυση της εξίσωσης (1) στον χώρο γίνεται με την κλασική Galerkin μέθοδο (Simunek et al., 1995) των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιώντας γραμμικά τετραεδρικά στοιχεία, ενώ η επίλυση στον χρόνο γίνεται χρησιμοποιώντας ένα πεπλεγμένο σχήμα προσέγγισης πίσω διαφορών των χρονικών παραγώγων

2.2. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων του μοντέλου αξιολογείται χρησιμοποιώντας τα στατιστικά κριτήρια του απολύτου σφάλματος (AE), του τυπικού σφάλματος (RMS), του σφάλματος του τετραγώνου των αποκλίσεων (RMSE), της αποδοτικότητας του μοντέλου (EF) και του συντελεστή του ελλείμματος μάζας (CRM). Η άριστη τιμή τους, είναι 0 εκτός από την αποδοτικότητα του μοντέλου που είναι η μονάδα (Loague and Green, 1991). Όταν η τιμή του συντελεστή ελλείμματος μάζας είναι αρνητική, υποδηλώνει υπερεκτίμηση της εδαφικής υγρασίας από το μοντέλο, ενώ αντίθετα όταν είναι

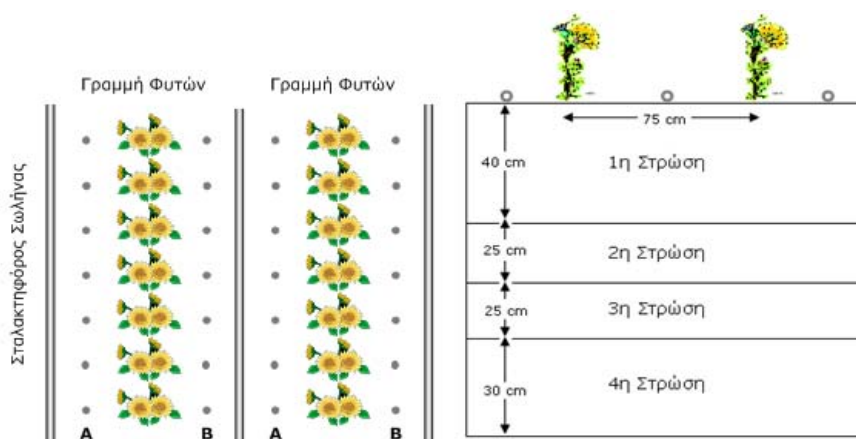
θετική υποδηλώνει υποεκτίμηση. Όταν η τιμή της αποδοτικότητας του μοντέλου είναι αρνητική τότε ο μέσος όρος περιγράφει τα δεδομένα με μεγαλύτερη ακρίβεια.

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

3.1. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ ΚΑΙ ΣΤΑ ΦΥΤΑ

Τα πειραματικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση της δυναμικής του νερού και τον υπολογισμό του υδατικού ισοζυγίου στον αγρό προέρχονται από τους (Rahil and Antonopoulos, 2007) και αφορούν μετρήσεις σε καλλιέργεια ηλίανθου. Το πείραμα διεξήχθη στον πειραματικό αγρό του Ι.Ε.Β. στην Σίνδο την χρονική περίοδο από τον Απρίλιο του 2003 έως και τον Μάρτιο του 2004. Η σπορά του ηλίανθου έγινε στις 30 Απριλίου 2003 με αποστάσεις μεταξύ των γραμμών 0.75 m και μεταξύ των φυτών 0.3 m. Για την εφαρμογή του νερού στο έδαφος χρησιμοποιήθηκε σύστημα στάγδην άρδευσης, με αγωγούς εφαρμογής, διαμέτρου Φ 20, ανάμεσα στις γραμμές των φυτών. Η πίεση, η παροχή και η απόσταση μεταξύ των σταλακτήρων ήταν 10 m, 4 L/h και 33 cm, αντίστοιχα.

Οι φυσικές ιδιότητες του εδάφους μετρήθηκαν σε δείγματα εδάφους σε τέσσερα βάθη (0-40, 40-65, 65-90 και 90-120 cm) αντιπροσωπευτικά της κάθε στρώσης, σε δύο θέσεις του πειραματικού αγρού, που σημειώνονται ως (Α) και (Β) και βρίσκονται στο ενδιάμεσο μεταξύ του αγωγού εφαρμογής και της γραμμής των φυτών (Rahil and Antonopoulos, 2007), ενώ καθ' όλη την διάρκεια της βλαστικής περιόδου, στις θέσεις αυτές γινόταν καταγραφή της εδαφικής υγρασίας χρησιμοποιώντας την σταθμική μέθοδο. Το έδαφος αποτελείται από τέσσερις ετερογενείς στρώσεις και γενικά χαρακτηρίζεται ως ιλυοπηλώδες από την επιφάνεια μέχρι τα 65 cm και αμμοπηλώδες έως πηλοαμμώδες από τα 65 cm έως τα 120 cm. Όλα τα παραπάνω συνοψίζονται στο Σχήμα 1 και στον Πίνακα 1 δίνονται οι φυσικές ιδιότητες του εδάφους στην αρχική του κατάσταση.



Σχήμα 1. Κάτοψη και τομή του πειραματικού αγρού.

Ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας (LAI) προσδιορίστηκε στον αγρό με το σύστημα Sun Scan Canopy Analysis κάθε δύο εβδομάδες. Η μέγιστη τιμή του LAI για τον ηλίανθο ήταν $5.1 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ μετά τη πάροδο 65 ημερών από τη σπορά, με πυκνότητα φυτών $53,000 \text{ ha}^{-1}$. Η κατανομή και το βάθος του ριζικού συστήματος του ηλίανθου προσδιοριζόταν κάθε δυο εβδομάδες με παρατήρηση του αποσπασμένου ριζικού συστήματος. Η μέτρηση του βάθους του ριζικού συστήματος έδειξε αύξηση του σε 43 cm σε 86 ημέρες από τη σπορά, με τη μεγαλύτερη κατανομή του στα πρώτα 30 cm εδάφους.

Πίνακας 1. Φυσικές ιδιότητες του εδάφους στην αρχική του κατάσταση.

Παράμετροι	Στρώσεις του εδάφους (cm)			
	0-40	40-65	65-90	90-120
Αργίλος %	12.90	6.40	15.90	4.00
Ιλύς %	50.90	41.40	53.80	12.90
Άμμος %	36.20	52.20	30.30	83.10
Φαινόμενη Πυκνότητα g/cm ³	1.33	1.26	1.35	1.48
Οργανική Ουσία g/100g soil	1.19	0.67	0.63	0.23

3.2. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

Οι παράμετροι της χαρακτηριστικής καμπύλης υγρασίας και η υδραυλική αγωγιμότητα κορεσμού της κάθε εδαφικής στρώσης, προσδιορίστηκαν πειραματικά με την μέθοδο των δίσκων πίεσης και με το περατόμετρο σταθερού φορτίου, σε εδαφικά δείγματα που προέρχονται από περισσότερες της μίας θέσης στο οριζόντιο επίπεδο, διαπιστώνοντας τη μεγάλη μεταβλητότητα των υδραυλικών ιδιοτήτων στον πειραματικό αγρό. Για την αύξηση της ακρίβειας των υπολογισμών και την αντιμετώπιση της μεγάλης μεταβλητότητας των υδραυλικών ιδιοτήτων στο πεδίο, έγινε έμμεση εκτίμηση των παραμέτρων της εξίσωσης του Van Genuchten για τη χαρακτηριστική καμπύλη και της υδραυλικής αγωγιμότητας κορεσμού της κάθε εδαφικής στρώσης, επιλύοντας το αντίστροφο πρόβλημα ως προς τις μετρημένες τιμές της εδαφικής υγρασίας για την χρονική περίοδο από την 90^η ημέρα του έτους έως την 174^η, που είναι η περίοδος πριν τις αρδεύσεις και η ροή του νερού στο έδαφος μπορεί να θεωρηθεί μονοδιάστατη ως προς την κατακόρυφη διεύθυνση, με το μοντέλο HYDRUS_1D (Simunek et al., 2005).

Για την επιτάχυνση της σύγκλισης του μοντέλου, το εύρος των τιμών της μεταβολής των παραμέτρων που εκτιμήθηκαν, καθορίστηκε ούτως ώστε το κάτω όριο του διαστήματος να αντιστοιχεί στην χαμηλότερη τιμή και το πάνω όριο να αντιστοιχεί στην υψηλότερη τιμή της παραμέτρου που μετρήθηκε στο εργαστήριο. Από τη διαδικασία αυτή εξαιρέθηκαν η παράμετρος της υπολειμματικής υγρασίας και της υδραυλικής αγωγιμότητας κορεσμού, για τις οποίες τέθηκε ως κάτω όριο η τιμή μηδέν και ως άνω όριο η μέση τιμή των παραμέτρων που μετρήθηκαν στο εργαστήριο. Οι τιμές των παραμέτρων της χαρακτηριστικής καμπύλης και της υδραυλικής αγωγιμότητας κορεσμού που προσδιορίστηκαν με αυτή την διαδικασία, δίνονται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2. Τιμές των παραμέτρων των υδραυλικών ιδιοτήτων του εδάφους.

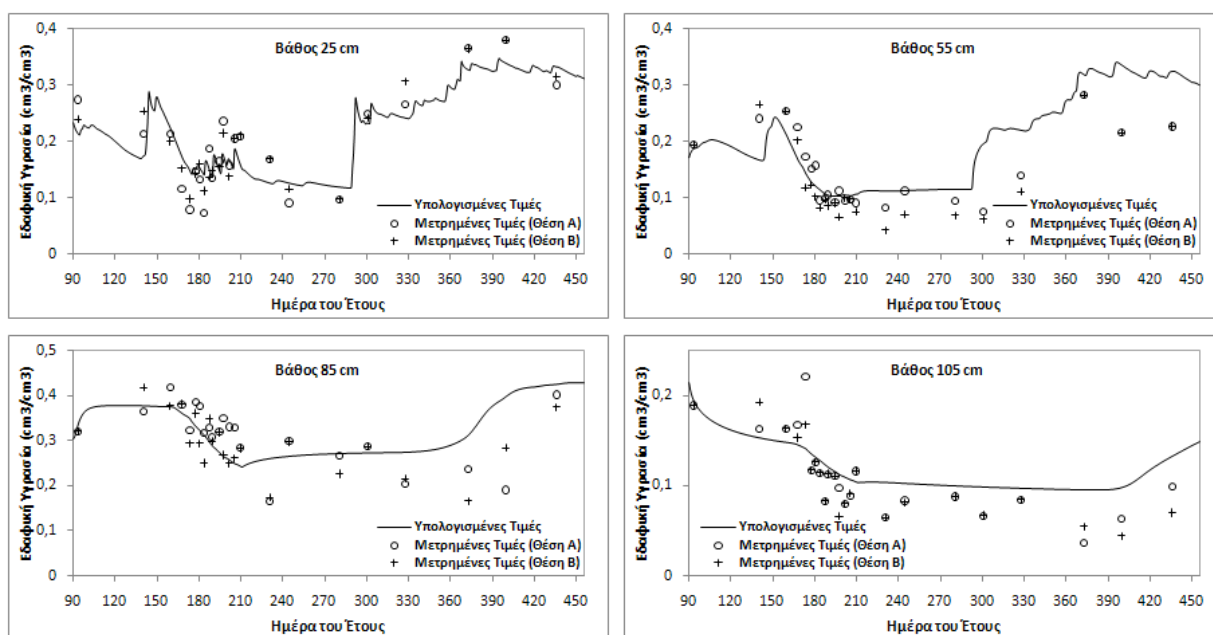
Βάθος (cm)	θ_s (cm ³ /cm ³)	θ_r (cm ³ /cm ³)	α (1/cm)	n (-)	K_s (cm/day)
0-40	0.0411	0.4860	0.0071	1.6806	21.00
40-65	0.0682	0.5830	0.0131	1.7108	331.21
65-90	0.1739	0.5861	0.0057	1.6698	0.15
90-120	0.0526	0.5102	0.0128	1.9788	21.74

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Η περιοχή λύσης του προβλήματος επιλέχθηκε ούτως ώστε να είναι αντιπροσωπευτική του αγρού υπό κλίμακα και έχει μήκος 38 cm, πλάτος 33 cm και βάθος 120 cm. Στην επιφάνεια του εδάφους οι σταλακτήρες είναι τοποθετημένοι στην αρχή των αξόνων στο σημείο με συντεταγμένες (x,y,z) (0,0,0) και στο σημείο (0,33,0), ενώ ο βλαστός του ηλίανθου βρίσκεται στο σημείο (38,0,0). Το έδαφος θεωρήθηκε ομογενές και ισότροπο, ως προς το οριζόντιο επίπεδο και διαστρωμένο ως προς το κατακόρυφο.

Στο κάτω όριο του εδαφικού προφίλ το έδαφος στραγγίζει ελεύθερα. Η περιοχή λύσης διακριτοποιήθηκε με 39 κόμβους στον άξονα x, με 17 στον άξονα y και 40 στον άξονα z. Το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων είναι πιο πυκνό σε σημεία όπου αναμένονται απότομες μεταβολές του ύψους πίεσης, όπως στην επιφάνεια του εδάφους και κοντά στον σταλακτήρα, όπως και στα όρια μεταξύ των εδαφικών στρώσεων. Το χρονικό βήμα που επιλέχθηκε είναι ίσο με 0.1 ημέρα με μέγιστο χρονικό βήμα 1 ημέρα και ελάχιστο 10^{-21} ημέρες, ενώ η περίοδος προσομοίωσης είναι από την 90^η Ιουλιανή ημέρα του έτους που αντιστοιχεί στην ημερομηνία 1/4/2003 μέχρι την 456^η ημέρα που αντιστοιχεί στην ημερομηνία 31/3/2004.

Στα διαγράμματα του Σχήματος 2 απεικονίζονται οι μετρημένες τιμές της εδαφικής υγρασίας στις δύο θέσεις (A) και (B) για τα αντιπροσωπευτικά βάθη των 25, 55, 85 και 105 cm, με τις αντίστοιχες υπολογισμένες τιμές από το μοντέλο. Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα, οι υπολογισμένες τιμές της εδαφικής υγρασίας ακολουθούν τις χρονικές διακυμάνσεις των μετρημένων τιμών με ικανοποιητική ακρίβεια.



Σχήμα 2. Υπολογισμένες και μετρημένες τιμές της εδαφικής υγρασίας για τα αντιπροσωπευτικά βάθη των 25, 55, 85 και 105 cm κατά τη διάρκεια της βλαστικής περιόδου του ηλιανθού

Οι αποκλίσεις που παρατηρούνται μεταξύ των υπολογισμένων και των μετρημένων τιμών πιθανώς να οφείλονται στην χωρική μεταβλητότητα των υδραυλικών ιδιοτήτων και στην μέθοδο δειγματοληψίας (Rahil and Antonopoulos, 2007). Οι αποκλίσεις αυτές προσδιορίζονται και ποσοτικοποιούνται με τα στατιστικά κριτήρια των οποίων οι τιμές δίνονται στον Πίνακα 3.

Πίνακας 3. Στατιστικά κριτήρια των μετρημένων και υπολογισμένων τιμών της εδαφικής υγρασίας.

Βάθος (cm)	n	AE (cm ³ /cm ³)	RMS (%)	RMSE (%)	EF	CRM
25	23	0.007	3.5690	18.2638	0.8050	0.0340
55	23	0.021	5.4579	38.8691	0.3378	-0.1489
85	23	0.006	5.5345	18.2337	0.1557	-0.0199
105	23	0.016	2.6243	24.8411	0.5382	-0.1486

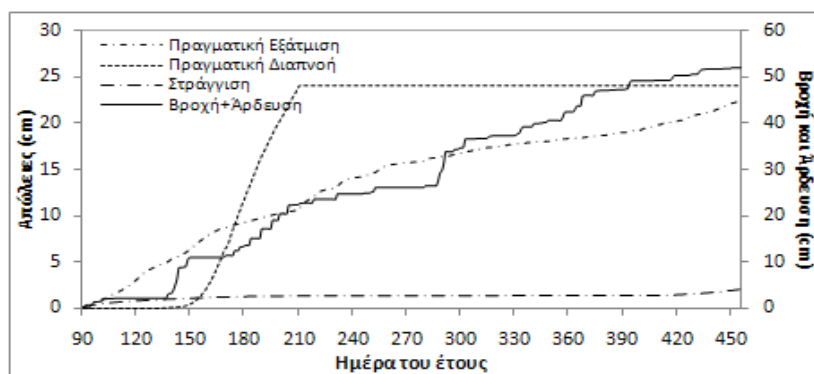
Από τις τιμές των στατιστικών κριτηρίων μεταξύ των μετρημένων και τον υπολογισμένων τιμών προκύπτει ότι το μοντέλο περιγράφει με ικανοποιητική ακρίβεια τις διακυμάνσεις της εδαφικής υγρασίας ιδιαίτερα στην πρώτη στρώση του εδάφους, όπου η επίδραση του σταλακτήρα είναι πιο ισχυρή. Οι αρνητικές τιμές του συντελεστή ελλείμματος μάζας υποδηλώνουν μία υπερεκτίμηση της εδαφικής υγρασίας από το μοντέλο στην 2^η, 3^η και 4^η στρώση.

Το υδατικό ισοζύγιο του αγρού εκτιμήθηκε από την εξίσωση του υδατικού ισοζυγίου από τη σχέση (Αντωνόπουλος, 1999):

$$\Delta\theta = P + IR + CR - ET - SRO - DP \quad (10)$$

όπου $\Delta\theta$ είναι η ημερήσια μεταβολή της περιεχόμενης υγρασίας του εδάφους, P είναι το ύψος του νερού που εισέρχεται στο έδαφος με τη βροχόπτωση, IR είναι το ύψος του νερού που εισέρχεται στο έδαφος με την άρδευση, CR είναι η ποσότητα του νερού που εισέρχεται στο έδαφος με τριχοειδή ανύψωση από την υπόγεια στάθμη, ET η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας, SRO είναι το ύψος του νερού που χάνεται λόγω επιφανειακής απορροής και DP είναι η απώλεια του νερού λόγω βαθιάς διήθησης.

Στο Σχήμα 3 απεικονίζονται οι αθροιστικές καμπύλες των συνιστωσών του υδατικού ισοζυγίου για την περίοδο προσομοίωσης, όπως αυτές υπολογίστηκαν από το μοντέλο.



Σχήμα 3. Συνιστώσες του υδατικού ισοζυγίου του αγρού για την περίοδο προσομοίωσης

Από το Σχήμα 3 προκύπτει ότι η αθροιστική βροχόπτωση και άρδευση της βλαστικής περιόδου ήταν 36.44 cm, ενώ για ολόκληρη την περίοδο προσομοίωσης ήταν 51.83 cm, η αθροιστική πραγματική εξατμισοδιαπνοή για την βλαστική περίοδο ήταν 40.87 cm και για την περίοδο προσομοίωσης 46.48 cm, ενώ το αθροιστικό ποσό στράγγισης ήταν 1.38 cm την βλαστική περίοδο και 2.14 cm συνολικά. Από τα παραπάνω παρατηρούμε ότι υπάρχει ένα έλλειμμα 5.81 cm κατά την βλαστική περίοδο στην αποθήκευση του εδαφικού νερού, που σημαίνει ότι οι αρδεύσεις κάλυψαν μόνο ένα μέρος των αναγκών της καλλιέργειας του ηλιάνθου σε νερό. Για την περίοδο προσομοίωσης η ποσότητα του αποθηκευμένου νερού στο έδαφος αυξήθηκε κατά 3.21 cm.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σκοπός της εργασίας ήταν η προσομοίωση της χωροχρονικής διακύμανσης της εδαφικής υγρασίας και η εκτίμηση των συνιστωσών του υδατικού ισοζυγίου σε έναν αγρό αρδευόμενο με σύστημα στάγδην άρδευσης, χρησιμοποιώντας το τριδιάστατο μαθηματικό μοντέλο SWMS_3D. Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης προκύπτει ότι:

- Η προσομοίωση της χωροχρονικής διακύμανσης της εδαφικής υγρασίας ήταν ικανοποιητική και στις τέσσερις εδαφικές στρώσεις, ιδιαίτερα στην 1^η.
- Οι αποκλίσεις μεταξύ των μετρημένων και των υπολογισμένων τιμών οφείλονται

κατά κύριο λόγο στην χωρική μεταβλητότητα των υδραυλικών ιδιοτήτων και κατά δεύτερο σε σφάλματα που αφορούν στην μέθοδο μέτρησης της εδαφικής υγρασίας.

- Από την εκτίμηση του υδατικού ισοζυγίου προκύπτει ότι οι αρδεύσεις κάλυψαν μόνο ένα μέρος των αναγκών της καλλιέργειας σε νερό.
- Το μοντέλο SWMS_3D είναι ένα αξιόπιστο μοντέλο προσομοίωσης της δυναμικής του εδαφικού νερού σε τρεις διαστάσεις και μπορεί να αποτελέσει πολύτιμο εργαλείο για την ορθή διαχείριση των υδατικών πόρων σε γεωργικές εκμεταλλεύσεις.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Αντωνόπουλος, Β., 1999. *Υδρολογία της Ακόρεστης Ζώνης του Εδάφους*. Έκδοση Υπηρεσία Δημοσιευμάτων Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, σελ. 265.
- Belmans, C., Wesseling J.G. and Feddes R.A., 1983. *Simulation of the water balance of a cropped soil: SWATRE*. Journal of Hydrology. 63: 271-286.
- Ελμαλόγλου, Σ. και Γρηγοράκης, Γ., 1993. *Ανάλυση της τοπικής διήθησης από: 1. Σημειακή επιφανειακή πηγή στάγδην άρδευσης, 2. Γραμμική επιφανειακή πηγή στάγδην άρδευσης*. Υδροτεχνικά Τόμος 3, Τεύχος 1: 59-74.
- Elmaloglou, S. and 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*. Irrigation and Drainage, 55(1): 99-111.
- Ζήσης, Θ. και Τερζίδης, Γ., 1995. *Δισδιάστατη ροή σε κορεσμένο-ακόρεστο έδαφος*. Πρακτικά 6^{ου} Πανελλήνιου Συνεδρίου Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης, Θεσσαλονίκη, σελ. 189-196.
- Feddes, R.A., Kowalik P.J. and Zaradny H., 1978. *Simulation of field water use and crop yield*. Pudoc, Simulation Monographs, Wageningen, The Netherlands, 189 p.
- Huyakorn, P.S., Springer, E.P., Guvanasen, V. and Wadsworth, T.D., 1986. *A three dimensional finite element model for simulating water flow in variably saturated porous media*. Water Resources. Research., 22: 1790-1808.
- Loague, K. and Green R.E., 1991. *Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: Overview and application*. Journal of Contaminant Hydrology, 7: 51-73.
- Rahil, M.H., Antonopoulos, V.Z., 2007. *Simulating soil water flow and nitrogen dynamics in a sunflower field irrigated with reclaimed wastewater*. Agricultural Water Management, 92:142 – 150.
- Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, Μ., Βλάχος, Β., Παπανικολάου, Χ., 2006. *Επίδραση διαφορετικών διατάξεων στάγδην άρδευσης στην ανάπτυξη και απόδοση του βάμβακος*. Πρακτικά 10^{ου} Πανελλήνιου Συνεδρίου Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης, Ξάνθη, σελ. 637-644.
- Simunek, J., Huang, K. and van Genuchten, M.T., 1995. *The SWMS-3D code for simulating water flow and solute transport in three-dimensional variable-saturated media*. Rep. No.139, U.S. Salinity Laboratory, U.S. Dept. of Agriculture, Agricultural Research
- Simunek, J., van Genuchten, M.Th. and Sejna, M., 2005. *The HYDRUS-1D software package for simulating the movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media*, version 3.0, HYDRUS software series 1. Riverside, CA: Department of Environmental Sciences, University of California Riverside.
- Van Genuchten, M.Th., 1980. *A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils*. Soil Science Society of America Journal, 44: 892-898.
- Vrugt, J.A., Hopmans, J.W., Simunek, J., 2001. *Calibration of a two dimensional root water uptake model*. Soil Science Society of America Journal, 65 (4) 1027–1037.

ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΤΟΥ MONTELOU SALT MED ΓΙΑ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΒΑΜΒΑΚΙΟΥ ΜΕ ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΤΑΓΔΗΝ ΑΡΔΕΥΣΗΣ

Δ. Καλφούντζος^{1*}, R. Ragab², Π. Βύρλας³, Π. Καλφούντζος¹ και Δ. Πατέρας³

¹ΕΘΙΑΓΕ-Ινστιτούτο Χαρτογράφησης και Ταξινόμησης Εδαφών Λάρισα,
Θεοφράστου 1, Λάρισα, 413 35,

²Centre for Ecology and Hydrology, Wallingford, Oxon, OX10 8BB, UK

³Τμήμα Μηχανικής Βιοσυστημάτων, Σχολή Τεχνολογίας Γεωπονίας,
ΤΕΙ Λάρισας, Λάρισα, 41110

*E-mail: kalfountzos@nagref.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα περισσότερα μοντέλα έχουν αναπτυχθεί για ειδικά συστήματα άρδευσης, για εξειδικευμένες διαδικασίες όπως η κίνηση του νερού και των διαλυμένων ουσιών, η διήθηση, η έκπλυση του νερού, η πρόσληψή του από της ρίζες των φυτών ή και συνδυασμούς αυτών. Το μοντέλο SALT MED έχει αναπτυχθεί έτσι ώστε να έχει γενική εφαρμογή σε όλα τα παραπάνω. Σε αυτή την εργασία παρουσιάζεται η βαθμονόμηση του μοντέλου σε καλλιέργεια βαμβακιού στο αγρόκτημα του ΕΘΙΑΓΕ Λάρισας, όπου εφαρμόστηκε καθαρό νερό σε διαφορετικά επίπεδα ύψους άρδευσης με το σύστημα της στάγδην άρδευσης. Το μοντέλο περιγράφει επιτυχώς την επίδραση του συστήματος άρδευσης, στην κατανομή της εδαφικής υγρασίας και στην παραγωγή της καλλιέργειας.

Λέξεις κλειδιά: μοντέλο saltmed, στάγδην άρδευση, προφίλ υγρασίας, παραγωγή καλλιέργειας.

CALIBRATION OF SALT MED MODEL FOR A COTTON PLANTATION USING A TRICKLE IRRIGATION SYSTEM

D. Kalfountzos^{1*}, R. Ragab², P. Vyrlas³, P. Kalfountzos¹ and D. Pateras³

¹NAGREF-Institute of Soil Mapping and Classification of Larissa,
1, Theophrastos str., Larissa 413 35, Greece

²Centre for Ecology and Hydrology, Wallingford, Oxon OX10 8BB, UK

³Department of Biosystems Engineering, School of Agricultural Technology,
TEI of Larissa, Larissa 41110, Greece

*E-mail: kalfountzos@nagref.gr

ABSTRACT

Most existing models are designed for a specific irrigation system, specific process such as water and solute movement, infiltration, leaching or water uptake by plant roots or a combination of them. SALT MED model has been developed for such generic applications. The SALT MED was calibrated using data of a cotton cultivated field of Larissa region, irrigated by fresh water at different water levels, by a trickle irrigation system. The model successfully illustrated the effect of the irrigation system on soil moisture distribution and crop yield.

Key words: saltmed model, trickle irrigation, soil moisture profile, crop yield.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η χρήση αλατούχου/υφάλμυρου νερού για άρδευση απαιτεί μια ολοκληρωμένη προσέγγιση όσο αφορά το έδαφος την καλλιέργεια και την διαχείριση του νερού ταυτόχρονα. Η προσέγγιση θα πρέπει να περιλαμβάνει: α) τις υδροδυναμικές παραμέτρους και τη διηθητικότητα οι οποίες επηρεάζουν την κίνηση του νερού και των διαλυμένων ουσιών στο έδαφος β) τα επίπεδα αντοχής σε αλατότητα των καλλιεργειών στα διάφορα στάδια, την επιλογή της πιο ανθεκτικής καλλιέργειας και την εφαρμογή υψηλής αλατότητας νερού κατά το λιγότερο ευαίσθητο στάδιο γ) εφαρμόζοντας την κατάλληλη στρατηγική διαχείρισης του νερού (Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη κ.α., 2003), αναμειγνύοντας με καθαρό νερό ή εναλλακτική χρήση καθαρού νερού κατά το πιο ευαίσθητο στάδιο και αλατούχου στα λιγότερο ευαίσθητα στάδια δ) επιλέγοντας το πιο κατάλληλο σύστημα άρδευσης (Dioudis et al., 2008) και ε) συνδυάζοντας έναν κατάλληλο υπολογισμό των απαιτήσεων σε νερό της καλλιέργειας (Κωτσόπουλος κ.α., 2001) και των αναγκών έκπλυσης, τα οποία είναι ουσιώδη για την εξοικονόμηση νερού, ελέγχοντας τα επίπεδα νερού, το νερό στράγγισης και φυσικά την τελική παραγωγή.

Τα περισσότερα υπάρχοντα μοντέλα είναι προσανατολισμένα σε μια εξειδικευμένη διαδικασία όπως: α) μοντέλα για τη διήθηση (Bresler, 1975; Vogel and Hopmans, 1992) β) μοντέλα για την πρόσληψη νερού απ' τις ρίζες (Cardon and Letey, 1992a; Coelho and Dani, 1996) γ) μοντέλα για έκπλυση ή μεταφορά του νερού και των διαλυμένων ουσιών (Cardon and Letey, 1992b; Babajimopoulos et al., 1995; Vanclooster et al., 1996; Antonopoulos, 1997) ή δ) μοντέλα για συγκεκριμένες εφαρμογές, π.χ. κύριο αρδευτικό συστήματα, εδάφος ή καλλιέργεια (Noborio et al., 1996; Minhas and Gupta, 1993). Συνεπώς υπάρχει ανάγκη για μοντέλα σύνθετα τα οποία θα έχουν εφαρμογή για διαφορετικές καλλιέργειες, πρακτικές διαχείρισης του νερού και του αγρού. Σκοπός αυτής της εργασίας είναι να βαθμονομήσει ένα γενικό μοντέλο το οποίο αναπτύχθηκε από τον Ragab (2000) και εφαρμόστηκε σε καλλιέργεια βαμβακιού στη περιοχή της Λάρισας.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

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 άρδευσης είχαν ισαποχή 1,95 m, μήκος 30 m και ήταν τύπου PC²/Φ16 της εταιρείας Eurodrip με ενσωματωμένους σταλάκτες. Οι σταλάκτες 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.

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε σε πειραματικό αγρό του αγροκτήματος του ΕΘΙΑΓΕ στη Λάρισα κατά τα έτη 2001-02 (Αλεξίου κ.α. 2003). Ο πειραματικός αγρός είχε έκταση 2400 m² (80 x 30) όπου έγινε σπορά βαμβακιού ποικιλίας Sandra (*Gossypium hirsutum*). 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).

Η εφαρμοζόμενη ποσότητα νερού σε κάθε άρδευση υπολογίζονταν από κλιματικά δεδομένα του αυτόματου μετεωρολογικού σταθμού που υπήρχε στη θέση του πειράματος με τη μέθοδο Penman-Moethieth FAO 56.

Από τις αναλύσεις του εδάφους και την ταξινόμηση που έγινε από το Ινστιτούτο χαρτογράφησης και Ταξινόμησης Εδαφών Λάρισας (ΙΧΤΕΛ), φαίνεται ότι είναι αργιλώδες σε όλη την κατατομή του και ανήκει στην υποομάδα των Calcic Chromoxerert των Vertisol. Στο Πίνακα 1 δίδονται οι φυσικές ιδιότητες του εδάφους.

Πίνακας 1. Φυσικές ιδιότητες του εδάφους

Βάθος (cm)	Μηχανική σύσταση			ΦΕΒ gr/cm ³	ΥΙ % κ.β	ΣΜ % κ.β
	Άμμος %	Ιλύς %	Αργίλλος%			
0-30	30	20	50	C	1,36	42,1
30-65	30	18	52	C	1,36	42,2
65-100	26	18	56	C	1,34	42,5
100+	28	16	56	C	1,33	44,5

Η κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα μετρήθηκε με το περατόμετρο Guelph και βρέθηκε 449,3 mm/d.

Από κάθε επανάληψη του πειράματος συλλέχθηκε και ζυγίστηκε χωριστά για κάθε γραμμή η παραγωγή από τμήμα της έκτασης εμβαδού 19 m² (4 γραμμές με ισαποχή 0,95 m και μήκος 5 μέτρα).

Μετά τη σπορά του βαμβακιού έγινε άρδευση για το φυτόωμα της καλλιέργειας, με αυτοπροωθούμενο εκτοξευτήρα και δόση άρδευσης 20 mm. Στον Πίνακα 2, δίνονται ύψη άρδευσης καθώς και το συνολικό νερό (άρδευση + βροχή + άρδευση φυτώματος) για κάθε πειραματικό έτος και η συγκομιζόμενη παραγωγή (Αλεξίου κ.α. 2003).

Πίνακας 2. Συνολικά ύψη άρδευσης και συνολικού νερού με την παραγωγή για κάθε μεταχείριση.

Επίπεδο άρδευσης	Πειραματικό έτος 2001			Πειραματικό έτος 2002		
	Άρδευση (mm)	Σύνολο νερού (mm)	Παραγωγή (kg/στρ.)	Άρδευση (mm)	Σύνολο νερού (mm)	Παραγωγή (kg/στρ.)
A	493,6	575,4	478,7	337,0	531,7	602,3
B	424,9	506,7	469,9	283,9	481,9	569,6
Γ	350,2	432,0	376,3	227,1	425,1	463,4
Δ	277,6	359,4	298,9	170,7	368,7	365,7

2.2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ SALTMED

Το μοντέλο SALTMED περιλαμβάνει τις ακόλουθες διαδικασίες: υπολογισμός της εξατμισοδιαπνοής, πρόσληψη νερού, μεταφορά νερού και διαλυμένων ουσιών κάτω από διαφορετικά αρδευτικά συστήματα, στράγγιση και τη σχέση μεταξύ παραγωγής καλλιέργειας και χρήσης νερού.

Η εξατμισοδιαπνοή υπολογίζεται με την εξίσωση Penman-Monteith σύμφωνα με την τροποποιημένη έκδοση του FAO-56, (Allen et al., 1998). Όταν υπάρχει έλλειψη μετεωρολογικών δεδομένων (θερμοκρασία, ακτινοβολία, ταχύτητα ανέμου κ.λπ.) η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς υπολογίζεται από τις μετρήσεις εξατμισιμέτρου τύπου A. Η εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας ET_c υπολογίζεται ως εξής:

$$ET_c = ET_r (K_{cb} + K_e) \quad (1)$$

Όπου: ET_r η εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας αναφοράς, K_{cb} ο συντελεστής διαπνοής της καλλιέργειας και K_e ο συντελεστής εξάτμισης του εδάφους.

Η πρόσληψη νερού από τις ρίζες των φυτών στο μοντέλο SALTMED υπολογίζεται με τη σχέση των Cardon and Letey (1992a), η οποία προσδιορίζει τον ρυθμό πρόσληψης S (d⁻¹) ως εξής:

$$S(z,t) = \left[\frac{S_{\max}(t)}{1 + \left(\frac{a(t)h + \pi}{\pi_{50}(t)} \right)^3} \right] \lambda(z,t) \quad (2)$$

όπου:

$$\lambda(z)=5/3L \text{ για } z<0,2L \quad (3)$$

$$\lambda(z)=25/12L \times (1-z/L) \text{ για } 0,2L < z < L \quad (3a)$$

$$\lambda(z)=0,0 \text{ για } z > L \quad (3b)$$

όπου $S_{\max}(t)$ είναι η μέγιστη δυνατή πρόσληψη νερού απ' τις ρίζες σε χρόνο t , z είναι το κατακόρυφο βάθος (θετικό προς τα κάτω), $\lambda(z,t)$ είναι το κλάσμα της ολικής ριζικής μάζας που εξαρτάται από το βάθος και το χρόνο, L είναι το μέγιστο βάθος του ριζικού συστήματος, h είναι το φορτίο πίεσης του εδαφικού νερού, π είναι η οσμωτική πίεση, $\pi_{50}(t)$ είναι η τιμή της οσμωτικής πίεσης που εξαρτάται απ' το χρόνο όταν $S_{\max}(t)$ μειώνεται κατά 50% και $\alpha(t)$ είναι ένας συντελεστής βαρύτητας ο οποίος εκφράζει την απόκριση της καλλιέργειας στην υδατική και οσμωτική καταπόνηση. Ο συντελεστής $\alpha(t)$ ισούται με $\pi_{50}(t)/h_{50}(t)$ όπου $h_{50}(t)$ είναι το ύψος πίεσης όταν το $S_{\max}(t)$ μειώνεται κατά 50%.

Η μέγιστη πρόσληψη νερού $S_{\max}(t)$ υπολογίζεται από τη σχέση:

$$S_{\max}(t) = ET_r(t) \times K_{cb}(t) \quad (4)$$

Το βάθος του ριζοστρώματος περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\text{Ριζικό βάθος}(t) = [\text{ριζικό βάθος}_{\min} + (\text{ριζικό βάθος}_{\max} - \text{ριζικό βάθος}_{\min})] \times K_c(t) / K_{c\max} \quad (5)$$

Το μέγιστο ριζικό βάθος είναι διαθέσιμο είτε από μετρήσεις είτε απ' τη βιβλιογραφία.

Η πραγματική παραγωγή AY δίνεται απλά από την εξίσωση:

$$AY = RY \times Y_{\max} \quad (6)$$

όπου $Y_{\max}$, η μέγιστη παραγωγή η οποία αναμένεται σε μια περιοχή κάτω από βέλτιστες συνθήκες και

$$RY = \frac{\sum S(x, z, t)}{\sum S_{\max}(x, z, t)} \quad (7)$$

2.2.1. Κίνηση νερού και διαλυτών ουσιών

Κυλινδρική ροή λαμβάνει χώρα κατά την άρδευση με σταγόνα (ροή από σταλακτήρα). Για σταθερά ισότροπα και ομογενή πορώδη μέσα, η δισδιάστατη ροή του νερού στο έδαφος περιγράφεται σύμφωνα με τον Bresler (1975) από την εξίσωση:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left[K(\theta) \frac{\partial \psi}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \frac{\partial (\psi + z)}{\partial z} \right] \quad (8)$$

όπου: x η οριζόντια συντεταγμένη, z είναι η κατακόρυφη συντεταγμένη (θετικό προς τα κάτω), $K(\theta)$ η ακόρεστη υδραυλική αγωγιμότητα, θ η εδαφική υγρασία, t ο χρόνος, ψ το ύψος πίεσης του εδαφικού νερού.

Αντίστοιχα η ροή των αλάτων στο έδαφος περιγράφεται από την εξίσωση:

$$\frac{\partial (C\theta)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{xx} \frac{\partial C}{\partial x} + D_{xz} \frac{\partial C}{\partial z} - q_x C \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{zz} \frac{\partial C}{\partial z} + D_{zx} \frac{\partial C}{\partial x} - q_z C \right) \quad (9)$$

όπου: C η συγκέντρωση διαλυτής ουσίας στο εδαφικό διάλυμα, q η πυκνότητα ροής εδαφικού νερού, D_{ij} συντελεστής υδροδυναμικής διασποράς.

Για την επίλυση των παραπάνω εξισώσεων απαιτούνται δυο σχέσεις του εδαφικού νερού δηλαδή, η δυναμική σχέση εδαφικής υγρασίας-πίεσης εδαφικού νερού και η δυναμική σχέση πίεσης εδαφικού νερού-υδραυλικής αγωγιμότητας. Αυτές περιγράφονται από τις σχέσεις του Van Genuchten (1980).

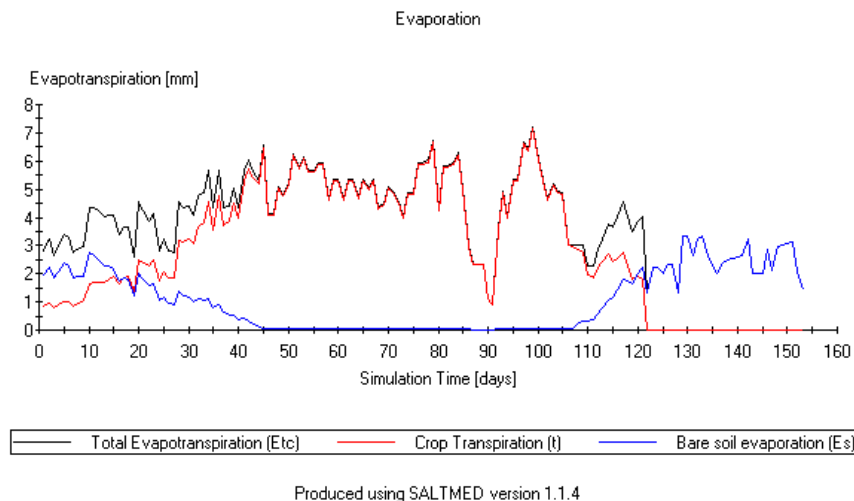
Για να αποφευχθεί μείωση της παραγωγής, όταν η συγκέντρωση των αλάτων ξεπεράσει τα όρια αντοχής, τα πλεονάζοντα άλατα πρέπει να εκπλυθούν κάτω απ' τη ριζική ζώνη με ελεύθερη στράγγιση. Το μοντέλο υπολογίζει τις απαιτήσεις έκπλυσης (LR).

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Το μοντέλο βαθμονομήθηκε με τη χρήση 100% καθαρού νερού σε καλλιέργεια βαμβακιού σε αγρό του ΕΘΙΑΓΕ Λάρισας. Τα μετεωρολογικά δεδομένα πάρθηκαν από το μετεωρολογικό σταθμό της Λάρισας. Το μοντέλο δέχεται τα αρχεία εισαγωγής δεδομένων σε μορφή (Excel), όπως το αρχείο των κλιματικών δεδομένων και το αρχείο άρδευσης το οποίο περιέχει μετρήσεις αγρού, όπως δόση άρδευσης και διάρκεια άρδευσης για κάθε μεταχείριση.

Οι φυτικοί συντελεστές K_c και K_{cb} αντίστοιχα, για το στάδιο (1), διάρκειας 35 ημερών είχαν την τιμή 0,35 και 0,30, κατά το στάδιο (2) διάρκειας 50 ημερών αυξάνονταν γραμμικά από 0,35 έως 1,17 και από 0,30 έως 1,2, κατά το στάδιο (3) διάρκειας 45 ημερών ήταν 1,17 και 1,2 και τέλος κατά το στάδιο (4) διάρκειας 23 ημερών μειώνονταν γραμμικά από 1,17 έως 0,60 και από 1,2 έως 0,45.

Οι παράμετροι της καλλιέργειας όπως το μέγιστο ύψος φυτού ήταν 1,1 m, το ελάχιστο και μέγιστο βάθος του ριζοστρώματος ήταν 0,1 και 1,1 m αντίστοιχα τα οποία βασίστηκαν σε μετρήσεις αγρού. Τα δεδομένα αυτά βρίσκονται στην δυναμική ηλεκτρονική βάση του μοντέλου και για την εφαρμογή τους γίνεται μόνο επιλογή της καλλιέργειας. Εδαφικές παράμετροι όπως η κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα λήφθηκαν από μετρήσεις αγρού, ενώ η χαρακτηριστική καμπύλη του εδάφους προσδιορίστηκε στο εργαστήριο. Από αυτή, με τη βοήθεια του προγράμματος RETC (Van Genuchten et al., 1991), προσδιορίστηκαν οι παράμετροι, όπως η υπολειμματική υγρασία θ_r και η υγρασία στον κορεσμό θ_s και οι τιμές τους βρέθηκαν 0,54 και 0,003 αντίστοιχα. Οι παράμετροι, α , n και λ (συντελεστής κατανομής μεγέθους εδαφικών πόρων) βρέθηκαν αντίστοιχα 0,0012, 1,3 και 0,3. Η τιμή του bubbling pressure που χρησιμοποιήθηκε από τη βάση δεδομένων του προγράμματος για αργιλλώδες έδαφος ήταν 37,3 cm. Οι μετρήσεις της κατ' όγκον υγρασίας έγιναν με τη συσκευή Trime η οποία λειτουργεί με τη μέθοδο TDR.

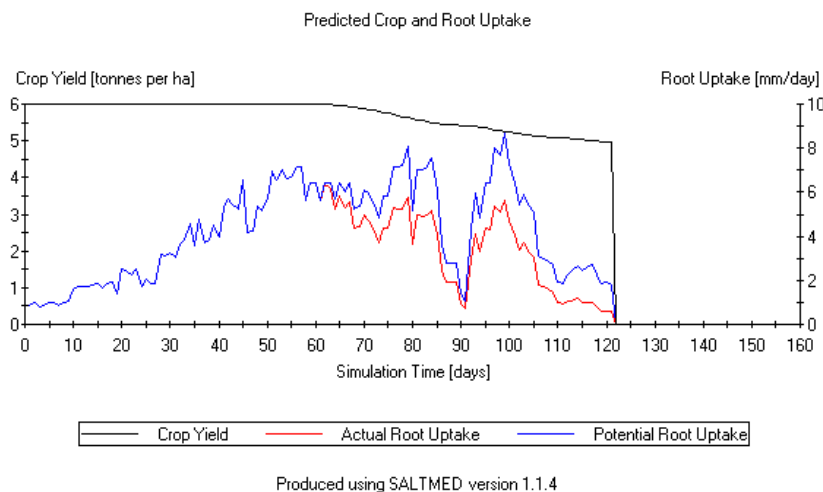


Σχήμα 1. Εξατμισοδιαπνοή, διαπνοή της καλλιέργειας και εξάτμιση από γυμνό έδαφος.

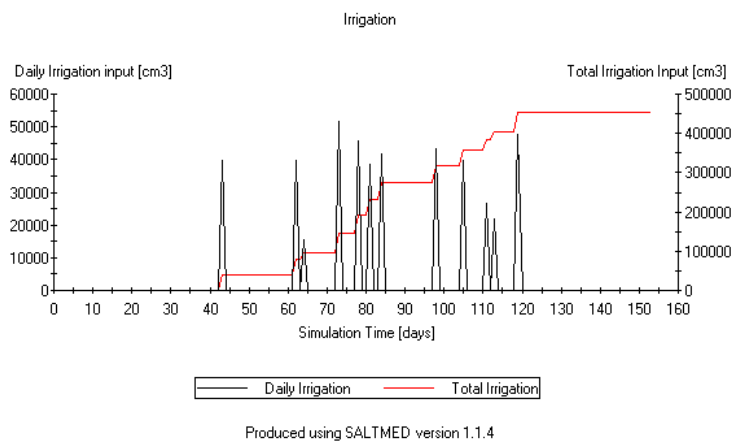
Στο Σχήμα 1, φαίνεται η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας, η διαπνοή και εξάτμιση από γυμνό έδαφος καθ' όλη την καλλιεργητική περίοδο κατά το έτος 2002. Στο διάγραμμα του Σχήματος 2, φαίνεται η υπολογισμένη από το μοντέλο παραγωγή σύσπορου βαμβακιού κατά την μεταχείριση του 100% εφαρμοζόμενου νερού καθώς και η πραγματική και η δυναμική πρόσληψη νερού από τις ρίζες των φυτών. Η υδατική καταπόνηση που δείχνει το Σχήμα 2 μετά την 65^η ημέρα, πιθανόν να οφείλεται στην ακρίβεια της μεθόδου υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής. Οι αρδεύσεις γινόνταν με τη χρήση του αυτόματου μετεωρολογικού σταθμού μετά την εξάντληση της οφέλιμης

υγρασίας όπως δείχνει το Σχήμα 3.

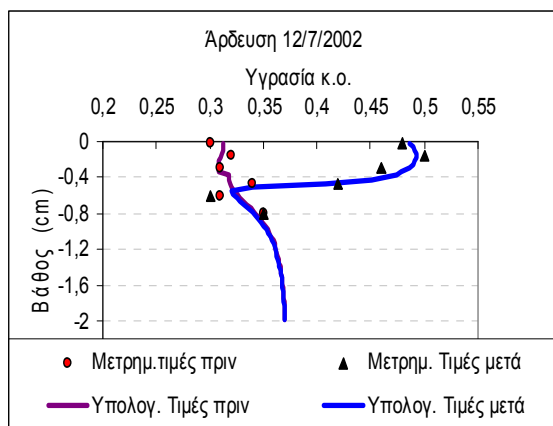
Το πρόγραμμα έχει την δυνατότητα κατά την διάρκεια της εφαρμογής του να απεικονίζει γραφικά τα προφίλ της εδαφικής υγρασίας σε διαφορετικές αποστάσεις από τον σταλάκτη σε ημερήσιο βήμα.



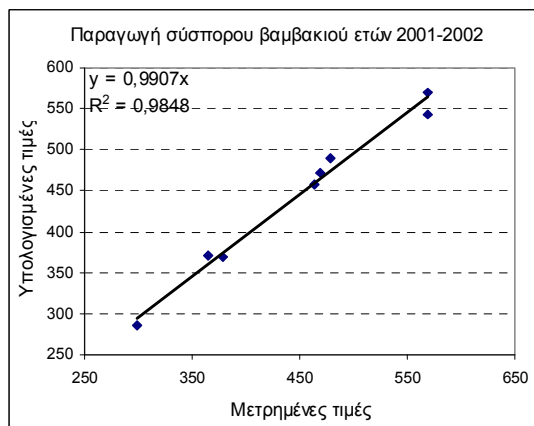
Σχήμα 2. Υπολογισμένη παραγωγή σύσπορου βαμβακιού κατά το έτος 2002.



Σχήμα 3. Συνολικός όγκος νερού κατά το έτος 2002.



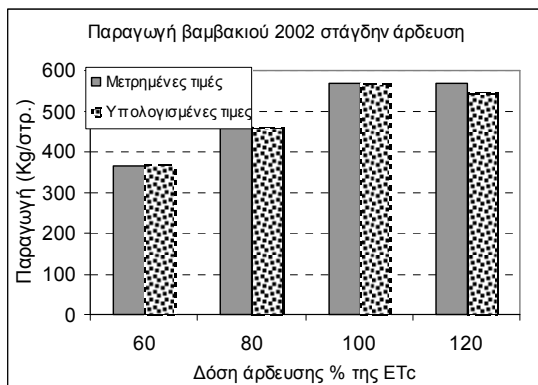
Σχήμα 4. Προφίλ εδαφικής υγρασίας πριν και μετά την άρδευση.



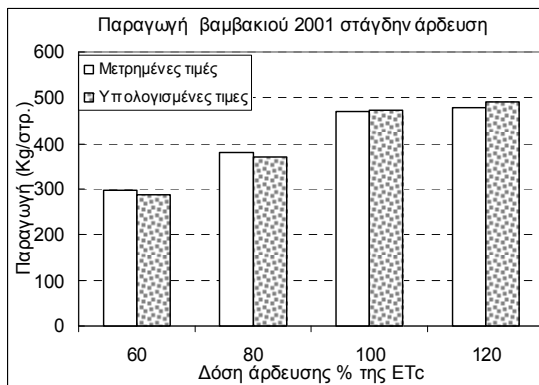
Σχήμα 5. Σύγκριση μεταξύ μετρημένων και υπολογισμένων τιμών παραγωγής.

Στο Σχήμα 4, φαίνεται το προφίλ της εδαφικής υγρασίας στη θέση του σταλάκτη με τις μετρημένες και υπολογισμένες τιμές της εδαφικής υγρασίας πριν και μετά την άρδευση με ικανοποιητική προσέγγιση.

Οι υπολογισμένες τιμές παραγωγής σύσπορου βαμβακιού από το μοντέλο δεν αποκλίνουν από τις μετρημένες σε όλα τα επίπεδα άρδευσης και για τα δύο έτη πειραματισμού όπως δείχνει η σύγκριση του Σχήματος 5, καθώς και τα γραφήματα των Σχημάτων 6 και 7.



Σχήμα 6. Μετρημένη και υπολογισμένη παραγωγή βαμβακιού έτους 2001.



Σχήμα 7. Μετρημένη και υπολογισμένη παραγωγή βαμβακιού έτους 2002.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε πρώτη φάση το μοντέλο SALTMED βαθμονομήθηκε με τη χρήση δεδομένων από πειραματικό αγρό καλλιέργειας βαμβακιού σε αργιλώδες έδαφος του αγροκτήματος ΕΘΙΑΓΕ στη Λάρισα για τα έτη 2001 και 2002, εφαρμόζοντας διαφορετικά επίπεδα καθαρού νερού σε σύστημα στάγδην άρδευσης.

Η βαθμονόμηση του μοντέλου έδειξε καλή εκτίμηση της εδαφικής υγρασίας και της παραγωγής σύσπορου βαμβακιού σε σύστημα στάγδην άρδευσης.

Το μαθηματικό μοντέλο SALTMED περιγράφει ικανοποιητικά την επίδραση του συστήματος άρδευσης στο υδατικό ισοζύγιο του εδάφους, γεγονός που το κάνει ένα αποτελεσματικό εργαλείο στην πρακτική διαχείρισης του αρδευτικού νερού.

Μια επόμενη εργασία θα εμφανίσει τα αποτελέσματα λειτουργίας του μοντέλου χρησιμοποιώντας δεδομένα από καλλιέργειες αρδευόμενες με αλατούχο νερό και διαφορετικά συστήματα άρδευσης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Αλεξίου, Ι., Καλφούντζος, Δ., Κωτσόπουλος, Σ., Βύρλας, Π., Καμπέλη, Σ., 2003. Σύγκριση της υποεπιφανειακής και της επιφανειακής στάγδην άρδευσης σε καλλιέργεια βαμβακιού. 9^ο Πανελλήνιο Συνέδριο, Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης Θεσσαλονίκη, Πρακτικά τεύχος Α σελ. 199-206.
- 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.
- Antonopoulos V.Z., 1997. *Simulation of soil moisture dynamics on irrigated cotton in semi-arid climates*. Agr. Water. Manag. 34, 233-246.
- Babatjimopoylos, C., Budina, A., Kalfountzos, D., 1995. SWBACROS: *A model for the estimation of the water balance of cropped soil*. Environ. Soft. 10(3), 211-220.
- Bresler, E., 1975. *Two-dimensional transport of solute during non-steady infiltration for trickle source*. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 39, 604-613.

- Cardon, E.G., Letey, J., 1992a. *Plant water uptake terms evaluated for soil water and solute movement models*. Soil Sci. Soc. Am. J. 56, 1876-1880.
- Cardon, E.G., Letey, J., 1992b. *Soil-based irrigation and salinity management models: II, water and solute movement calculations*. Soil Sci. Soc. Am. J. 56, 1887-1892.
- Coelho, F.E., Dani, Oe., 1996. *A parametric model for two-dimensional water uptake intensity by corn roots under drip irrigation*. Soil Sci. Soc. Am. J. 60, 1039-1049.
- Dioudis, P., Filintas, Ag.Th., Papadopoulos, A.H., 2008. *Corn yield in response to irrigation interval and the resultant savings in water and other overheads*, Irrigation and Drainage J., DOI: 10.1002/ird.395, pp.9.
- Κωτσόπουλος, Σ., Αλεξίου, Ι., Καλφούντζος, Δ. και Βύρλας, Π., 2001. *Σχέσεις νερού και παραγωγής βαμβακιού σε περιοχές της Θεσσαλίας*. 4^ο Εθνικό Συνέδριο ΕΕΔΥΠ Βόλος, Πρακτικά Τεύχος Α' σελ. 177-182.
- Minhas, P.S., Gupta, R.K., 1993. *Conjunctive use of saline and non saline waters, II. Validation and application of a transient model for wheat*. Agric. Water Manag. 23 149-160.
- Noborio, K., McInnes, K.J. Heilman, J.L., 1996. *Two dimensional model for water, heat, and solute transport in furrow-irrigated soil: I Theory*. Soil Sci. Soc. Am. J. 60, 1001-1009.
- Ragab, R., 2002. *A holistic generic integrated approach for irrigation, crop and field management: the SALTMED model*. Environ. Mod. & Soft. 17 345-361.
- Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, Μ., Τέντας, Ι., Κολιού, Α., Καλφούντζος, Δ., Παπανίκος, Ν. 2003. *Άρδευση πρασίνου με επεξεργασμένα υγρά αστικά απόβλητα*. 3^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωργικής Μηχανικής, Θεσσαλονίκη, Πρακτικά τεύχος Α' σελ. 265-272.
- Vanclooster M., Viaene P., Christiaens and Ducheyne S., 1996. *A mathematical model for simulating water and agrochemicals in the soil and vadose environment (WAVE)*. Reference and user's manual.
- 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.
- Van Genuchten, M.Th., Leij, F.J. and Yates, S.R., 1991. *The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils*. U.S. Environmental Protection Agency, Oklahoma.
- Vogel, T., Hopmans, J.W., 1992. *Two-dimensional analysis of furrow infiltration*. J. Irrigation Drainage Eng. 118, 791-806.

ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΑΡΔΕΥΤΙΚΗΣ ΠΡΑΚΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΟΥ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΑΡΤΑΣ

Ι.Λ. Τσιρογιάννης* και Σ. Τριάντος

Τμ. Ανθοκομίας – Αρχιτεκτονικής Τοπίου, Σχολή Τεχνολογίας Γεωπονίας,
ΤΕΙ Ηπείρου, Τ.Θ. 110, 47100 Άρτα

*E-mail: itsirog@teiep.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία παρουσιάζονται στοιχεία που προέκυψαν από καταγραφή της αρδευτικής πρακτικής καλλιεργειών στο νομό της Άρτας. Τα δεδομένα έδειξαν ότι τα περισσότερα συστήματα άρδευσης έχουν προβλήματα σχεδιασμού και εγκατάστασης που οδηγούν σε χαμηλή αποτελεσματικότητα ενώ ο προγραμματισμός των αρδεύσεων γίνεται εμπειρικά. Με τη δεδομένη υποδομή, αυτό που θα μπορούσε να οδηγήσει άμεσα σε αύξηση της αποτελεσματικότητας των αρδεύσεων είναι η ορθότερη διαχείριση των συστημάτων. Σε αυτό το πλαίσιο αναπτύχθηκε ένα διαδικτυακό εργαλείο που παρέχει στοιχεία για την εξαμυσοδιαπνοή της προηγούμενης ημέρας καθώς και δυνατότητα εκτίμησης σχετικά με το χρόνο και τη δόση της επόμενης άρδευσης. Το εργαλείο λειτουργεί από το Μάιο του 2008 και υπάρχουν θετικές αναφορές σχετικά με τη χρήση του.

Λέξεις κλειδιά: αρδευτική πρακτική, υδατικό ισοζύγιο, προγραμματισμός αρδεύσεων.

EVALUATION OF IRRIGATION PRACTICE AND DEVELOPMENT OF A WEB TOOL FOR IRRIGATION MANAGEMENT IN THE AREA OF ARTA / GREECE

I. L. Tsirogiannis* and S. Triantos

Dept. of Floriculture and Landscape Architecture, Technological Educational
Institution of Epirus, P.O. Box 110, 47100 Arta, Greece

*E-mail: itsirog@teiep.gr

ABSTRACT

In this study information is presented regarding the design, installation and management of irrigation systems for the main cultivations of the prefecture of Arta (citrus, olives and kiwi). Data revealed the typical problems of irrigation practice in Greece: illegal drillings, empirical system design and sub or over irrigation. With the given infrastructure, irrigation systems efficiency could promptly increased, if more reasonable water management was applied. Based on this assumption a relevant web tool was developed. From this web site, information regarding daily evapotranspiration –based on actual meteorological data- is provided along with an estimator –based on water balance calculations- for the time and duration of the next irrigation event. The feedback from the users is very positive.

Key words: irrigation practice, water balance, irrigation scheduling.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην Ελλάδα εκτιμάται ότι το 80% των υδατικών πόρων χρησιμοποιείται για άρδευση και για το λόγο αυτό ο βέλτιστος προγραμματισμός των αρδεύσεων αποτελεί ένα ολοένα και αυξανόμενης σημασίας καλλιεργητικό στόχο (Τσοτσόλης, 2008). Επαρκής εφοδιασμός των καλλιεργειών με νερό οδηγεί σε αποτελεσματικότερη χρήση του, βοηθά τα φυτά να αποφύγουν ή να ξεπεράσουν καταστάσεις καταπόνησης και αυξάνει την παραγωγή (Allen κ.α., 1998). Η μεγάλη πλειοψηφία των προσεγγίσεων που χρησιμοποιούνται για την κατάρτιση προγραμμάτων άρδευσης βασίζεται στην εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής με βάση ισοζύγια ενέργειας και μάζας (Allen κ.α., 1998; Donatelli κ.α., 2006) και καταλήγει σε προτάσεις σχετικά με τη συχνότητα και τη διάρκεια των αρδευτικών γεγονότων. Σε αυτό το πλαίσιο και ιδιαίτερα στην εποχή μας όπου εμφανίζονται έντονα φαινόμενα λειψυδρίας και ζητούνται πρωτοβουλίες για την αποτελεσματικότερη χρήση του νερού (Οδηγία 2000/60/EK) θεωρήθηκε σκόπιμη η καταγραφή της αρδευτικής πρακτικής στο νομό της Άρτας ώστε να εκτιμηθεί η κατάσταση όσο αφορά το σχεδιασμό, την εγκατάσταση και την διαχείριση των συστημάτων άρδευσης. Τελικός σκοπός της έρευνας αυτής ήταν σε περίπτωση που εντοπιστούν προβλήματα να προταθούν και υλοποιηθούν οικονομικές και πρακτικά εφαρμόσιμες ενέργειες που θα είχαν την προοπτική άμεσης βελτίωσης της κατάστασης.

Στο πλαίσιο αυτό η ανάπτυξη ενός διαδικτυακού εργαλείου το οποίο θα υπολογίζει την εξατμισοδιαπνοή χρησιμοποιώντας πραγματικά δεδομένα που θα συλλέγονται αυτόματα και θα παράγει σχετικές πληροφορίες αλλά και συμβουλές όσο αφορά τον προγραμματισμό των αρδεύσεων είναι μεγάλης σημασίας. Το εργαλείο πρέπει να ρυθμίζεται για τις τοπικές συνθήκες και αυτό προϋποθέτει την γνώση των ειδικών χαρακτηριστικών των καλλιεργειών και της τοπικής καλλιεργητικής και αρδευτικής πρακτικής (Παπαζαφειρίου, 1984; Maton κ.α., 2005). Στατικό ή δυναμικό λογισμικό έχει ήδη αναπτυχθεί με σκοπό την υποστήριξη των γεωπόνων στον υπολογισμό εξατμισοδιαπνοής και αναγκών των φυτών σε νερό στο πλαίσιο σχεδιασμού και διαχείρισης αρδευτικών συστημάτων. Καλά παραδείγματα αποτελούν τα CropWat (FAO, 2008), CIMIS (DWR, 2008) και WeatherTRAK (Aquacraft Inc., 2001). Στην Ελλάδα σχετικές προσπάθειες έχουν ως αποτέλεσμα έως τώρα την παραγωγή στατικού κυρίως λογισμικού (Χαρτζουλάκης κ.α., 2007; Σαμαράς, 2008). Τελευταία στην Περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας, δεδομένα εξατμισοδιαπνοής που βασίζονται σε μετρήσεις μετεωρολογικών σταθμών διατίθενται στο κοινό (Αραμπατζής και Μαλιτσίδου, 2009).

Η αξιολόγηση των εργαλείων αυτών έχει να επιδείξει εντυπωσιακά αποτελέσματα μια και αναφέρεται μείωση της κατανάλωσης νερού σε επίπεδα του 20% για ελαιοκαλλιέργεια στην Κρήτη (Χαρτζουλάκης κ.α., 2007), του 15-45% για αγροτικές καλλιέργειες στην Μακεδονία (Αραμπατζής και Μαλιτσίδου, 2009) και του 44% για άρδευση χώρων πράσινου στην Καλιφόρνια (CIMIS, 2008).

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Η εργασία αφορά την περιοχή της Άρτας (Βόρειο-Δυτική Ελλάδα). Το ενδιαφέρον εστιάστηκε σε τρεις από τις κύριες καλλιέργειες της περιοχής, την πορτοκαλιά, την ελιά και το ακτινίδιο που αντιπροσωπεύουν το 24%, 25% και 12% της συνολικής γεωργικής γης της Άρτας αντίστοιχα (Ν.Α. Άρτας, 2008).

2.1. ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΑΡΔΕΥΤΙΚΗΣ ΠΡΑΚΤΙΚΗΣ

Οι μετρήσεις αφορούν την αρδευτική περίοδο 2008 (Μάιος – Σεπτέμβριος). Για την καταγραφή της αρδευτικής πρακτικής ακολουθήθηκαν δύο παράλληλες διαδικασίες:

- συμπλήρωση ενός ειδικά προετοιμασμένου ερωτηματολογίου καταγραφής

αρδευτικής πρακτικής μέσω συνεντεύξεων και

- εγκατάσταση υδρομέτρων και μικρών καταγραφικών μετεωρολογικών παραμέτρων σε επιλεγμένες εκμεταλλεύσεις (μία για κάθε καλλιέργεια) με σκοπό τη σύγκριση της εφαρμοζόμενης με την θεωρητικά εκτιμώμενη ποσότητα νερού

Το ερωτηματολόγιο περιελάμβανε ερωτήσεις που αφορούσαν τις ακόλουθες πληροφορίες: θέση αγροτεμαχίου και καλλιέργεια, πηγή νερού, περιγραφή αρδευτικού δικτύου (σχεδιασμός, εγκατάσταση, συντήρηση), διαχείριση άρδευσης και γενικές παρατηρήσεις. Έγιναν συνεντεύξεις σε 300 παραγωγούς.

Για τη μέτρηση της εφαρμοζόμενης ποσότητας νερού χρησιμοποιήθηκαν απλά υδρόμετρα ριπής 1'' (SISMAR, Italy) που τοποθετήθηκαν σε 4 χαρακτηριστικούς αγωγούς εφαρμογής των συστημάτων άρδευσης. Παράλληλα τοποθετήθηκαν και καταγραφικά θερμοκρασίας (°C) και σχετικής υγρασίας (%) αέρα (model H08-032-08, HOBO instruments, USA) με σκοπό την εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής μέσω της μεθόδου FAO / Hargreaves [Εξ. 1] (Allen κ.α., 1998; Κουτσογιάννης, 2000). Οι παραγωγοί συμπλήρωναν ειδικό φύλλο καταγραφής αρδευτικών γεγονότων ενώ ανά τακτά χρονικά διαστήματα γίνονταν επισκέψεις με σκοπό την καταγραφή των ενδείξεων των υδρομέτρων.

2.2. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΗΣ ΑΡΔΕΥΣΗΣ

Για την μέτρηση κλιματικών παραμέτρων και την εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής στην περιοχή της Άρτας, χρησιμοποιήθηκαν δύο μετεωρολογικοί σταθμοί (model Vantage Pro2 Wireless, Fan-aspirated, DAVIS instruments, USA), ένας στη Βλαχέρνα (39° 10' 21.74''B, 21° 05' 01.87''A) και ένας στο Κομπότι (39° 10' 21.74''B, 20° 59' 57.92''A). Οι σταθμοί είχαν αισθητήρια για μέτρηση θερμοκρασίας και υγρασίας αέρα, ηλιακής ακτινοβολίας (πυρανόμετρο), ύψους βροχής, ταχύτητας και διεύθυνσης ανέμου). Με βάση αυτά γίνεται σε ημερήσια βάση υπολογισμός της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς και στην συνέχεια των επιλεγμένων καλλιεργειών με βάση τη μέθοδο FAO / Penman-Monteith [Εξ. 2] (Allen κ.α., 1998) με χρήση κατάλληλων φυτικών συντελεστών (Δημουλάς, 1988; Ποντίκης, 2003; Μπαλατσούρας, 1992; Michelakis κ.α., 1996; Holzapfel κ.α., 2000; Palomo κ.α., 2002; Grattan κ.α., 2006; Orgaz κ.α., 2006; Moriana κ.α., 2007).

$$ET_c = K_c \times ET_o = K_c \times 0,0023(T_{mean} + 17,8)(T_{max} - T_{min})^{0,5} R_a \quad (1)$$

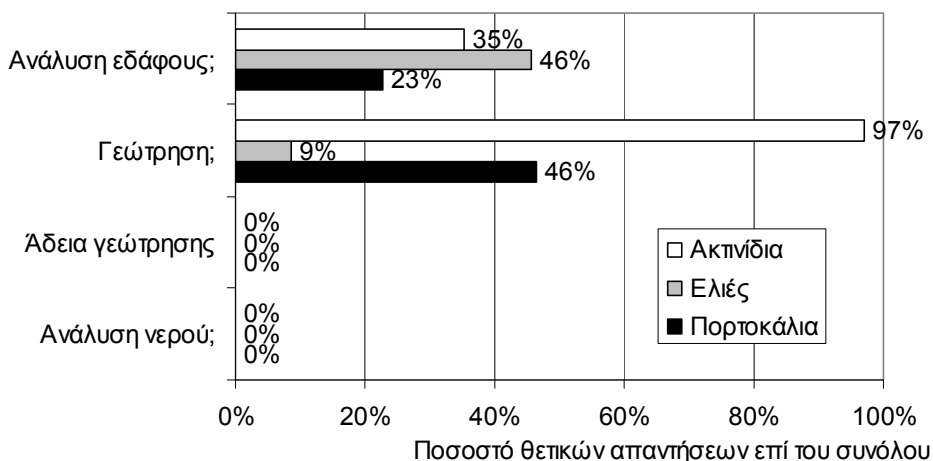
$$ET_c = K_c \times ET_o = K_c \times \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_{mean} + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (2)$$

όπου: ET_c : δυνητική εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας (mm day^{-1}), K_c : φυτικός συντελεστής, ET_o : εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (mm day^{-1}), T_{mean} , T_{max} , T_{min} : μέση, μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία αέρα αντίστοιχα (°C), R_a : ακτινοβολία στο εξωτερικό της ατμόσφαιρας (mm day^{-1}), R_n : καθαρή ακτινοβολία ($\text{MJ m}^{-2} \text{day}^{-1}$), G : ροή θερμότητας στο έδαφος ($\text{MJ m}^{-2} \text{day}^{-1}$), u_2 : ταχύτητα ανέμου (m s^{-1}), $e_s - e_a$: έλλειμμα πίεσης κορεσμού (kPa), Δ : κλίση της καμπύλης κορεσμού πίεσης υδρατμών ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), γ : ψυχομετρική σταθερά ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$).

Στο πλαίσιο λειτουργίας του εργαλείου διαχείρισης θεωρήθηκε σκόπιμο να ενταχθεί και πρόγνωση των αναγκών των καλλιεργειών σε νερό η οποία βασίζεται σε μετεωρολογικές παραμέτρους που προκύπτουν από εφαρμογή του προγνωστικού μοντέλου BO.L.A.M. (Lagouvardos κ.α., 2003) και παρέχονται αυτόματα σε ηλεκτρονική μορφή από το Αστεροσκοπείο Αθηνών.

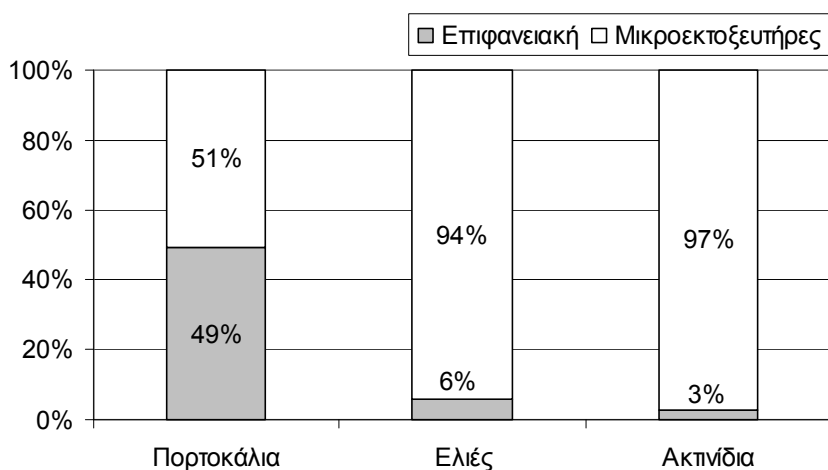
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ

Όπως ήδη αναφέρθηκε η καταγραφή της αρδευτικής πρακτικής αφορούσε τρεις από τις κυριότερες καλλιέργειες του νομού Άρτας. Η καλλιέργεια πορτοκαλιών αφορούσε το 59% του δείγματος, ενώ τα αντίστοιχα ποσοστά για ελιά και ακτινίδιο ήταν 21% και 20%. Η πυκνότητα φύτευσης ήταν 51, 30 και 57 φυτά/1000m² ενώ η μέση ηλικία των φυτών ήταν 26, 17 και 8,2 έτη για τα πορτοκάλια, τις ελιές και τα ακτινίδια αντίστοιχα.



Εικόνα 1. Στοιχεία σχετικά με τις υδροληψίες και το έδαφος.

Όσο αφορά την πηγή του νερού (Εικόνα 1) η καταγραφή έδειξε ότι ενώ οι γεωτρήσεις αποτελούν την υδροληψία σε μεγάλο ποσοστό των συστημάτων, για καμία από τις γεωτρήσεις του δείγματος που καταγράφηκε δεν είχε ολοκληρωθεί διαδικασία αδειοδότησης. Ένα ακόμη βασικό στοιχείο είναι ότι ανάλυση του νερού που χρησιμοποιείται για την άρδευση καθώς και του εδάφους (βασικά δεδομένα τόσο για το σχεδιασμό του συστήματος όσο και τη διαχείριση της άρδευσης) γίνεται σε πρακτικά μηδενικά και μικρά ποσοστά αντίστοιχα (Εικόνα 1). Ένα εντυπωσιακό στοιχείο που προέκυψε από τις συνεντεύξεις είναι ότι πολλοί αγρότες αντλούν νερό για άρδευση από τις τάφρους αποστράγγισης του κάμπου της Άρτας.



Εικόνα 2. Τύποι συστημάτων άρδευσης.

Όσο αφορά τα συστήματα, η καταγραφή έδειξε ότι χρησιμοποιούνται κυρίως συστήματα με μικροεκτοξευτήρες (Εικόνα 2). Στα εσπεριδοειδή αλλά και στα ακτινίδια το σύστημα των μικροεκτοξευτήρων χρησιμοποιείται και για αντιπαγετική προστασία.

Είναι χαρακτηριστικό ότι κανείς δεν χρησιμοποιούσε στάγδην άρδευση.

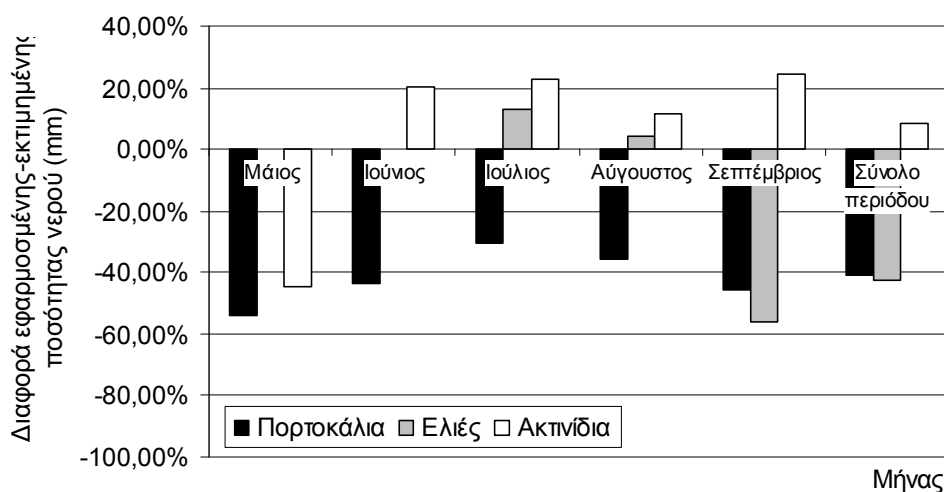
Τα συστήματα σχεδιάζονται και εγκαθίστανται σχεδόν αποκλειστικά από τους ίδιους τους παραγωγούς ή εμπειροτέχνες με αποτέλεσμα να παρουσιάζονται προβλήματα λειτουργίας και χαμηλή αποτελεσματικότητα. Η διαχείριση των συστημάτων γίνεται σχεδόν αποκλειστικά με εμπειρικό τρόπο χωρίς συμβουλές ειδικών. Δεν υπάρχουν εγκατεστημένα υδρόμετρα, πιεσόμετρα ή άλλα συστήματα παρακολούθησης του συστήματος ούτε χρησιμοποιούνται συσκευές ελέγχου της εδαφικής υγρασίας. Στο 100% των συστημάτων για ακτινίδια και στο 50% των συστημάτων για πορτοκαλιές υπάρχουν αυτοματισμοί κυρίως λόγω της παράλληλης χρήσης τους και για αντιπαγετική προστασία.

Ο Πίνακας 1 παρουσιάζει τυπικά χαρακτηριστικά (συχνότητα και δόση) προγραμμάτων άρδευσης των τριών καλλιέργειών για τον Ιούλιο.

Πίνακας 1. Τυπικά χαρακτηριστικά προγραμμάτων άρδευσης συστημάτων με μικροεκτοξευτήρες για τον μήνα Ιούλιο.

Καλλιέργεια	Συχνότητα (αρδεύσεις/μήνα)	Διάρκεια (h)
Πορτοκάλια	4	7,5
Ελιές	4	15
Ακτινίδια	11	4

Όσο αφορά την καταγραφή εφαρμοζόμενης ποσότητας νερού, αυτή δείχνει αποκλείσεις από τις θεωρητικά εκτιμώμενες ανάγκες [Εξ. 1]. Οι μετρήσεις -αφορούν ενδεικτικό και όχι αντιπροσωπευτικό δείγμα- δείχνουν συστηματικές αποκλίσεις σε μηνιαία βάση και για τις τρεις καλλιέργειες, ενώ στο σύνολο φαίνεται να χορηγείται μικρότερη από την απαιτούμενη ποσότητα νερού σε πορτοκάλια και ελιές ενώ το αντίθετο συμβαίνει στα ακτινίδια (Εικόνα 3). Πιο συγκεκριμένα φαίνεται να χορηγείται μικρότερη από την απαιτούμενη ποσότητα νερού σε πορτοκάλια και ελιές (-30%) ενώ το αντίθετο συμβαίνει στα ακτινίδια (+15%).



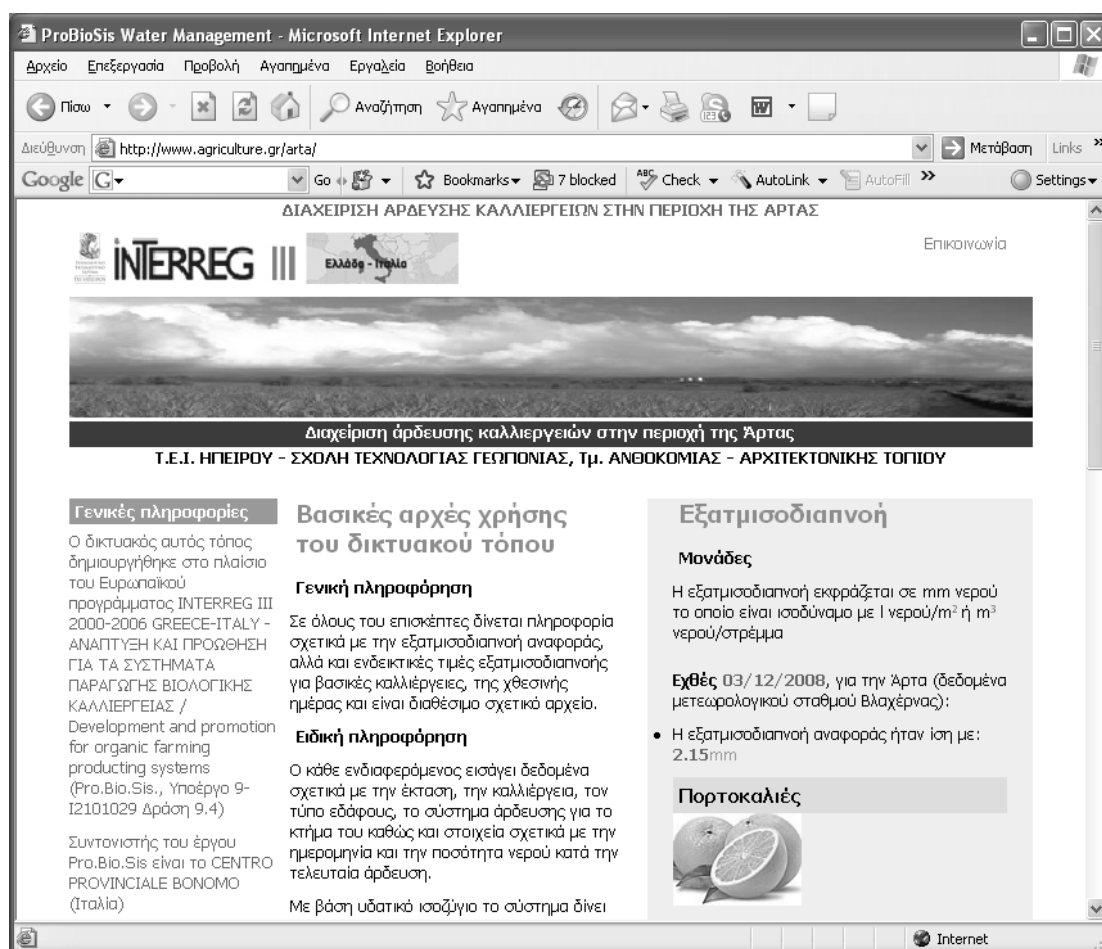
Εικόνα 3. Ποσοστιαία διαφορά μεταξύ εφαρμοσμένης και θεωρητικά εκτιμημένης ως ανάγκη ποσότητας νερού.

4. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΑΡΔΕΥΣΗΣ

Έχοντας κατά νου ότι με τη δεδομένη υποδομή αυτό που θα μπορούσε να οδηγήσει άμεσα σε αύξηση της αποτελεσματικότητας των αρδεύσεων είναι η ορθότερη

διαχείριση των συστημάτων, αναπτύχθηκε και παρουσιάζεται εδώ ένα διαδικτυακό εργαλείο που σκοπεύει ακριβώς σε αυτό. Μέσα από τον δυναμικό διαδικτυακό τόπο που αναπτύχθηκε σε γλώσσα PHP παρέχονται στοιχεία για την εξατμισοδιαπνοή –που υπολογίζονται με βάση δεδομένα από τους μετεωρολογικούς σταθμούς- καθώς και δυνατότητα υπολογισμού -που βασίζεται στο υδατικό ισοζύγιο- σχετικά με το χρόνο και τη δόση της επόμενης άρδευσης. Το εργαλείο φιλοξενείται στη διεύθυνση www.agriculture.gr/arta (Εικόνα 4) και παρέχει:

- Πληροφορία σχετικά με την εξατμισοδιαπνοή της προηγούμενης ημέρας (αναφοράς και επιλεγμένων καλλιεργειών).
- Ιστορικά δεδομένα σχετικά με την εξατμισοδιαπνοή.
- Σύνδεση προς τον υπολογιστή επόμενης άρδευσης.
- Βοήθεια σχετικά με τη χρήση του και την εισαγωγή δεδομένων που ζητούνται από το χρήστη και συνδέσμους προς σχετικούς δικτυακούς τόπους.



Εικόνα 4. Αρχική σελίδα δικτυακού εργαλείου για διαχείριση αρδεύσεων.

Η φιλοσοφία λειτουργίας του συνοψίζεται στο ότι τα δεδομένα (ένταση ηλιακής ακτινοβολίας, θερμοκρασία και σχετική υγρασία αέρα, ταχύτητα ανέμου και ύψος βροχής) συλλέγονται στο τέλος κάθε ημέρας από τους μετεωρολογικούς σταθμούς. Με βάση αυτά γίνεται ο υπολογισμός της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς και των επιλεγμένων καλλιεργειών [Εξ. 2]. Εκτός από τις τρεις κύριες καλλιέργειες σχετικές πληροφορίες δίνονται και για χλοοτάπητα (θερμής και ψυχρής περιόδου). Η πληροφορία αυτή είναι άμεσα διαθέσιμη στην αρχική σελίδα. Ακόμη διατηρείται αρχείο ιστορικών δεδομένων εξατμισοδιαπνοής σε ειδική σελίδα την οποία μπορεί να αποθηκεύσει ή να τυπώσει κάθε ενδιαφερόμενος.

Ένα από τα καινοτόμα χαρακτηριστικά του εργαλείου είναι η συμβουλή άρδευσης. Δίνοντας μια σειρά από πληροφορίες (τοποθεσία, έκταση, επιλογή καλλιέργειας, βάθος ενεργού ριζοστρώματος (εάν είναι γνωστό), τύπο εδάφους (ελαφρύ, μέσο, βαρύ), τύπο συστήματος άρδευσης (επιφανειακή άρδευση, καταιονισμός, μικροάρδευση με μικροεκτοξευτήρες, μικροάρδευση με σταλάκτες), παροχή συστήματος, ημερομηνία, ώρα και διάρκεια τελευταίας άρδευσης καθώς και υγρασία του εδάφους πριν την τελευταία άρδευση (εάν υπάρχει μέτρηση ή εκτίμηση)) ο χρήστης θα πάρει ως απάντηση το ισοζύγιο νερού (Allen κ.α., 1998) από την ημέρα της τελευταίας άρδευσης έως 3 ημέρες από την ημέρα συμβουλής. Ακόμη θα λάβει συμβουλή σχετικά με εάν και πότε πρέπει να αρδεύσει και πόσο θα πρέπει να διαρκέσει η άρδευση ώστε το έδαφος να φτάσει στην υδατοικανότητα.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα δεδομένα έδειξαν ότι τα περισσότερα συστήματα άρδευσης τριών βασικών καλλιεργειών της Άρτας έχουν προβλήματα σχεδιασμού και εγκατάστασης που οδηγούν σε χαμηλούς συντελεστές απόδοσης ενώ ο προγραμματισμός των αρδεύσεων γίνεται εμπειρικά στηριζόμενος σε παραδοσιακές επιλογές.

Με σκοπό τη συμβολή σε ορθολογικότερη χρήση του νερού στην περιοχή αναπτύχθηκε ένας διαδικτυακός τόπος ο οποίος χρησιμοποιώντας πραγματικά μετεωρολογικά δεδομένα, εκτιμά την ημερήσια υδατοκατανάλωση των τυπικών καλλιεργειών της Άρτας και παρέχει συμβουλές σχετικά με τον προγραμματισμό των αρδεύσεων.

Η απήχηση του εργαλείου είναι σημαντική και η εμπειρία από την έως τώρα χρήση του είναι πολύ θετική. Σε κάθε περίπτωση όμως τα περιθώρια βελτίωσης είναι μεγάλα και ο στόχος παραμένει η υλοποίηση μίας ολοκληρωμένης υπηρεσίας για τη διαχείριση της άρδευσης. Αυτό θα επιτευχθεί μέσω επέκτασης του δικτύου των μετεωρολογικών σταθμών με σκοπό την κάλυψη περιοχών σε επίπεδο υδρολογικής λεκάνης, πρόσθεση δεδομένων (με χρήση GIS) σχετικά με την τοπογραφία και την υδρολογική κατάσταση της περιοχής, εκπαίδευσης των τελικών χρηστών αλλά και των συμβούλων τους σχετικά με τη χρήση του εργαλείου και συστηματικής αξιολόγησης της χρήσης του εργαλείου με σκοπό τη συνεχή βελτίωσή του.

Ευχαριστίες

Η εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο του έργου «ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΠΡΟΩΘΗΣΗ ΓΙΑ ΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΒΙΟΛΟΓΙΚΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ - Pro.Bio.Sis., Υπόεργο 9 (I2101029)», της ΚΠ INTERREG IIIA ΕΛΛΑΔΑ - ΙΤΑΛΙΑ 2000-2006 (χρηματοδότηση 75% από το Ευρωπαϊκό Ταμείο Περιφερειακής Ανάπτυξης και 25% Εθνικοί πόροι).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M., 1998. *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO, Rome, 290 pp.
- Aquacraft Inc., 2001. *WeatherTRAK 2001 Study Report: Performance Evaluation of WeatherTRAK®*. Irrigation Controllers in Colorado.
www.aquacraft.com/weathert.html. Προσπελάστηκε: 20 Ιαν 2009.
- Αραμπατζής, Γ. και Μαλιτσίδου, Α., 2009. *Εξοικονόμηση νερού μέσω διαδικτύου*. Agronews Προσπελάστηκε: 2 Απρ. 2009.
- California Department of Water Resources, 2008. *CIMIS - California Irrigation Management Information System*. <http://www.cimis.water.ca.gov>. Προσπελάστηκε: 15 Μαρ 2008.

- Δημουλάς, Ι., 1988. *Ακτινίδιο*. Αγροτική Τράπεζα της Ελλάδας, Αθήνα.
- Donatelli, M., Bellochi, G. and Carlini, L., 2006. *Sharing knowledge via software components: Models on reference evapotranspiration*. European Journal of Agriculture, 24:186–192.
- ΕΕ, 2003. *Οδηγία 2000/60/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου*.
- FAO, 2008. *CropWat*. http://www.fao.org/nr/water/infores_databases_cropwat.html. Προσπελάστηκε: 15 Μαρ 2009.
- Grattan, S.R., Berenguer, M.J., Connell, J.H., Polito, V.S. and Vossen, P.M., 2006. *Olive oil production as influenced by different quantities of applied water*. Agricultural Water Management, 85:133–140.
- Holzapfel, E.A., Merino, R., Marino, M.A. and Matta, R., 2000. *Water production functions in kiwi*. Irrigation Science, 19:73–79.
- Κουτσογιάννης, Δ., 2000. *Σημειώσεις Υδρομετεωρολογίας - Μέρος Ι*. Έκδοση 2, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, σελ. 157.
- Lagouvardos, K., Kotroni, V., Koussis, A., Feidas, H., Buzzi, A. and Malguzzi, P., 2003. *The Meteorological Model BOLAM at the National Observatory of Athens: Assessment of Two-Year Operational Use*. Journal of Applied Meteorology, 42:1667–1678.
- Maton, L., Leenhardt, D., Goulard, M. and Bergez, J.E., 2005. *Linking irrigation strategy and farm systems: an attempt in south western France*. Agricultural Systems, 86:293–31.
- Michelakis, N., Vouyoukalou, E. and Clapaki, G., 1996. *Water use and soil moisture depletion by olive trees under different irrigation conditions*. Agricultural Water Management, 29: 315–325.
- Moriana, A., Perez-Lopez, D., Gomez-Rico, A., de los Desamparados, S.M., Olmedilla, N., Ribas, F. and Fregapane, G., 2007. *Irrigation scheduling for traditional, low-density olive orchards: Water relations and influence on oil characteristics*. Agricultural Water Management, 87:171–179.
- Μπαλατσούρας, Γ., 1992. *Η ελιά, καλλιέργεια με σύγχρονες μεθόδους*. Εκδόσεις Πελεκάνος, Αθήνα, σελ. 160.
- Νομαρχία Άρτας, 2008. *Στατιστικά στοιχεία καλλιεργειών 2008*. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <http://www.nomarxia-artas.gr/2EA679C2.el.aspx>
- Orgaz, F., Testi, A.F., Villalobos, J. and Fereres, E., 2006. *Water requirements of olive orchards: II determination of crop coefficients for irrigation scheduling*. Irrigation Science, 24:77–84.
- Palomo, M.J., Moreno, F., Fernandez, J.E., Diaz-Espejo, A. and Giron, I.F., 2002. *Determining water consumption in olive orchards using the water balance approach*. Agricultural Water Management, 55:15–35.
- Παπαζαφειρίου, Ζ.Γ., 1984. *Αρχές και πρακτική των αρδεύσεων*. Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη, σελ. 484.
- Ποντίκης, Κ., 2003. *Ειδική Δενδροκομία τόμος Δ' Εσπεριδοειδή*. Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθήνας, Αθήνα, σελ. 315.
- Σαμαράς, Ν., 2008. *Σχεδιασμός και ανάπτυξη ασύρματου δικτύου αισθητήρων για τη διαχείριση της άρδευσης στο πλαίσιο της γεωργίας ακριβείας*. <http://archimidis.teilar.gr> Προσπελάστηκε: 3 Απρ. 2009.
- Τσοτσόλης, Ν., 2008. *Ορθολογική διαχείριση των υδάτων—Το παράδειγμα της Περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας*. 4^ο Business ECO FORUM/Δημόσιες αρχές και περιβάλλον -ΔΕΘ, 7-9 Σεπτεμβρίου 2008.
- Χαρτζουλάκης Κ., Ψαρά Γ. και Κασπάκης Ι., 2007. *Ανάπτυξη λογισμικού για το σχεδιασμό άρδευσης της ελιάς*. 23^ο Συνέδριο της Ελληνικής Εταιρείας Επιστήμης των Οπωροκηπευτικών, Χανιά 23-26 Οκτωβρίου 2007, σελ. 410–417.

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ WET ΣΕ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΑΝΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ

Γ. Κάργας¹ και Π. Κερκίδης²

Τομέας Διαχείρισης Υδατικών Πόρων,
Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων & Γεωργ. Μηχανικής,
Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Ιερά Οδός 75, 118 55 Αθήνα
E-mails: ¹lhyd4kag@aua.gr, ²kerkides@aua.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται στο εργαστήριο ο τρόπος υπολογισμού της διηλεκτρικής σταθεράς (K) και της σχέσης ανάμεσα στην K και την περιεκτικότητα σε υγρασία (θ) σε τέσσερα εδαφικά δείγματα σε συνθήκες ανομοιόμορφης υγρασίας από τον αισθητήρα WET. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι για τον υπολογισμό της K πιο κοντά στις μετρούμενες τιμές βρίσκεται το “αριθμητικό καθεστώς” (arithmetic regime) και ότι η σχέση θ - K είναι γραμμική. Αποδεικνύεται ότι η μέθοδος διήθησης που χρησιμοποιείται ευρέως για την βαθμονόμηση των συσκευών TDR (Time Domain Reflectometry) δεν δίνει τα ίδια αποτελέσματα με την μέθοδο των ξεχωριστών δειγμάτων τα οποία χαρακτηρίζονται από ομοιόμορφη υγρασία, λόγω του διαφορετικού τρόπου υπολογισμού της K , για τις συσκευές που λειτουργούν σε χαμηλές συχνότητες, όπως η WET.

Λέξεις κλειδιά: Διηλεκτρική σταθερά, εδαφική υγρασία, αισθητήρας WET.

PERFORMANCE OF THE WET SENSOR IN THE PRESENCE OF NONUNIFORM SOIL MOISTURE PROFILES

G. Kargas¹ and P. Kerkides²

Dept. of Natural Resources Management and Agricultural Engineering,
Agricultural University of Athens, Iera str 75, 11855, Votanikos
E-mails: ¹lhyd4kag@aua.gr, ²kerkides@aua.gr

ABSTRACT

In the present work the way one calculates the dielectric constant (K) and the relationship between K and the volumetric moisture θ in four porous media, under non-uniform moisture regimes is investigated in the laboratory, using the WET sensor. The results show that for the calculation of K , close to the measured by the WET values are those predicted according to the arithmetic regime and that the K - θ relationship is linear. It is further shown that the upward infiltration method which is widely used for the calibration of the TDR devices, does not give similar results when separate samples characterized by uniform moisture contents are used, due to the different way of calculating K from the devices which operate in lower frequencies as that of the WET.

Key words: Dielectric constant, soil moisture, WET sensor.

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο εργαστήριο συνήθως χρησιμοποιούνται δύο μεθοδολογίες για την βαθμονόμηση των αισθητήρων υπολογισμού της εδαφικής υγρασίας (θ) οι οποίοι στηρίζονται στον έμμεσο υπολογισμό της υγρασίας διαμέσου της διηλεκτρικής σταθεράς (K). Πιο συχνά εφαρμόζεται εκείνη η οποία χρησιμοποιεί πολλά ξεχωριστά δείγματα διαφορετικής αλλά γνωστής περιεκτικότητας σε νερό, όπου με την εισαγωγή του αισθητήρα σε κάθε δείγμα αποκτούνται τιμές της K και εξάγεται η σχέση μεταξύ της πραγματικής θ και της K . Για την σχέση αυτή έχουν προταθεί πολλές εμπειρικές και ημιεμπειρικές εξισώσεις (Topp et al., (1980); Dirksen and Dasberg (1993)) και έχει δειχθεί ότι η σχέση $\theta - \sqrt{K}$ είναι γραμμική. Η μεθοδολογία όμως αυτή είναι χρονοβόρα, τα πειραματικά δεδομένα που μπορούν να αποκτηθούν είναι σχετικά λίγα ενώ η φαινομενική πυκνότητα (ρ_p) των ξεχωριστών δειγμάτων μπορεί να μην είναι ίδια. Η άλλη μέθοδος που εφαρμόζεται και η οποία προτάθηκε από τους Young et al. (1997), καλείται μέθοδος διήθησης και βασίζεται στην διαβροχή του δείγματος από την κάτω επιφάνειά του. Η μέθοδος αυτή είναι λιγότερο χρονοβόρα, δίνει την δυνατότητα απόκτησης μεγάλου αριθμού πειραματικών δεδομένων σ' ένα ορισμένο εύρος τιμών θ ενώ η φαινομενική πυκνότητα είναι σταθερή. Κατά την μέθοδο αυτή όμως σχηματίζονται εντός του δείγματος δύο διακριτές υγρασιακά στρώσεις σε αντίθεση με την πρώτη μέθοδο όπου υγρασιακά το δείγμα είναι ομοιογενές. Στις συσκευές TDR έχει μελετηθεί με μια σχετική πληρότητα ο τρόπος υπολογισμού της K στην περίπτωση που τοποθετείται κατακόρυφα και υπάρχει μεταβολή της υγρασίας με το βάθος. Στην περίπτωση αυτή αν υπάρχουν δύο διαφορετικές από πλευράς υγρασίας στρώσεις, έχει αποδειχθεί ότι η K υπολογίζεται από την εξίσωση (Topp et al., 1982).

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

όπου L_1 , L_2 το πάχος κάθε στρώσης και K_1 και K_2 οι διηλεκτρικές τους σταθερές. Η τρόπος αυτός ονομάστηκε “διαθλαστικό καθεστώς” (refractive index regime). Έχει αποδειχθεί για τις TDR ότι η συνολική K ισούται με τον αριθμητικό μέσο όρο (arithmetic regime) στην περίπτωση που υπάρχουν πολλές και μικρού πάχους στρώσεις για υψηλές συχνότητες λειτουργίας καθώς επίσης και στην περίπτωση χαμηλών συχνοτήτων λειτουργίας (Chan and Knight, 2001; Schaap et al., 2003).

$$K = \frac{\sum_{i=1}^N L_i K_i}{\sum_{i=1}^N L_i} \quad (2)$$

Για τις συσκευές TDR αποδείχθηκε ότι η πρώτη μέθοδος βαθμονόμησης (ομοιογενής υγρασία) έδωσε τα ίδια αποτελέσματα όσον αφορά την πρόβλεψη της θ με την μέθοδο διήθησης (δύο υγρασιακά διακριτές στρώσεις) (Young et al., 1997).

Για την περίπτωση των αισθητήρων υγρασίας που υπολογίζουν την θ διαμέσου της K αλλά βασίζονται σε άλλους τρόπους υπολογισμού της K και λειτουργούν σε χαμηλές συχνότητες (μικρότερες ή ίσες με 100 MHz) δεν έχει γίνει μέχρι τώρα σημαντική έρευνα για το πια μέθοδος υπολογισμού βρίσκεται πιο κοντά στις μετρούμενες τιμές (διαθλαστικό ή αριθμητικό) (Kargas and Kerkides, 2009 a,b). Στην παρούσα εργασία εξετάζεται σε τέσσερα πορώδη μέσα ο τρόπος υπολογισμού της K σε καθεστώς ανομοιογενούς υγρασίας από τις συσκευές WET και ιδιαίτερα η μέθοδος της διήθησης.

2.ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ WET

Ο αισθητήρας χρησιμοποιήθηκε σε συνδυασμό με το μετρητή HH2 διαμέσου του οποίου αποκτήθηκαν οι τιμές των παραμέτρων. Ο αισθητήρας έχει τρεις ακίδες μήκους 6.8 cm και δίνει σήμα συχνότητας 20 MHz στη κεντρική ακίδα με αποτέλεσμα να δημιουργείται ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο μέσα στο έδαφος. Με τον τρόπο αυτό αναγνωρίζονται οι διηλεκτρικές ιδιότητες του εδάφους και αποστέλλονται οι πληροφορίες στο HH2.

Ο υπολογισμός της θ γίνεται σύμφωνα με την εξίσωση (Delta-T Device, 2005)

$$\theta = (\sqrt{K} - \alpha_0) / \alpha_1 \quad (2.1)$$

όπου K είναι η διηλεκτρική σταθερά του μέσου που έχουν τοποθετηθεί οι ακίδες και α_0, α_1 είναι σταθερές οι οποίες εξαρτώνται από τον τύπο του μέσου.

Στον Πίνακα 1 δίνονται οι τιμές των παραμέτρων όπως προτείνονται από τον κατασκευαστή για τις διάφορες περιπτώσεις πορώδων μέσων.

Πίνακας 1. Τιμές των παραμέτρων α_0, α_1 που προτείνονται από τον κατασκευαστή.

	α_0	α_1
Ανόργανα εδάφη	1.8	10.1
Οργανικά εδάφη	1.4	8.4
Αμμώδη εδάφη	1.4	8.4
Αργιλώδη εδάφη	2	11

Έτσι ανάλογα με την κατηγορία του πορώδους μέσου, προτείνονται διαφορετικές τιμές των α_0, α_1 άρα και διαφορετική εξίσωση υπολογισμού της θ από την WET. Η συγκεκριμένη βαθμονόμηση της WET γίνεται ευκολότερα σε διαταραγμένα εδαφικά δείγματα (Kargas 2008).

2.2. ΕΔΑΦΙΚΑ ΔΕΙΓΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία εξετάστηκαν τέσσερα διαταραγμένα εδαφικά δείγματα (Αμμώδες, αμμοπηλώδες, πηλώδες και αργιλώδες). Η κοκκομετρική σύσταση των εδαφικών δειγμάτων και η φαινομενική πυκνότητα τους παρουσιάζονται στον πίνακα 2.

2.3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ

2.3.1. Σύστημα αέρας-νερό, αέρας-κορεσμένο πορώδες μέσο

Οι ακίδες της WET εισαγόταν σταδιακά και κατακόρυφα σε απεσταγμένο νερό με βήματα περίπου 5 mm μέχρι το βάθος των 68 mm. Με τον τρόπο αυτό μετρίονταν η τιμή της K σε κάθε βάθος εισχώρησης 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 ($K_{\text{αέρα}}=1$ και $K_{\text{νερού}}=80$). Το πείραμα πραγματοποιήθηκε και με αιθανόλη και βουτανόλη με διηλεκτρικές σταθερές $K_{\text{αιθ}}=24.3$ και $K_{\text{βουτ}}=16.8$ αντίστοιχα.

Για τις ανάγκες του πειράματος στα εδάφη χρησιμοποιήθηκαν συσκευές Haines. Στις συσκευές τοποθετήθηκε δείγμα ξηρού εδάφους ίσου ύψους με τις ακίδες της συσκευής, το οποίο κορέστηκε από την κάτω επιφάνεια. Μετά το πέρας του κορεσμού εισαγόταν σταδιακά η WET στο έδαφος με τον ίδιο τρόπο όπως στο πείραμα αέρας/νερό και καταγραφόταν οι τιμές της K και της θ . Η K στον κορεσμό υπολογιζόταν

όταν είχαν εισχωρήσει ολόκληρες οι ακίδες του αισθητήρα στο δείγμα.

2.3.2. Διαμόρφωση δύο υγρασιακά διαφορετικών στρώσεων (ξηρό-κορεσμένο έδαφος) και κορεσμένο-ξηρό έδαφος.

Στην περίπτωση αυτή τα πορώδη μέσα σε ξηρή κατάσταση ($\theta=0$) τοποθετήθηκαν μέσα στην συσκευή Haines σε ύψος ίσο με το μήκος των ακίδων της WET και ο αισθητήρας τοποθετήθηκε στο κέντρο του χωνιού. Ο όγκος του νερού που εισέρχεται στο δείγμα από την κάτω επιφάνειά του, διαμέσου του πορώδους διαφράγματος, καταγράφεται συνεχώς από προχοίδα. Η είσοδος του νερού γινόταν σε φορτία πίεσης από 0 έως -5 cm. Έτσι μέσα στο δείγμα διαμορφώθηκαν δύο στρώσεις, ξηρή επάνω και υγρή κάτω. Ανά τακτά χρονικά διαστήματα, ανάλογα με το είδος του δείγματος, λαμβανόταν μετρήσεις της K και προσδιοριζόταν η θ . Μόλις το νερό εμφανιζόταν και κάλυπτε την επάνω επιφάνεια του δείγματος τότε σταματούσαν οι μετρήσεις διότι πρακτικά είχε σταματήσει η ύπαρξη των δύο υγρασιακά διαφορετικών στρώσεων.

Για τη δεύτερη περίπτωση σε αρχικά υγρό δείγμα όπου έχει τοποθετηθεί η WET αφαιρούνται σταδιακά 5 έως 10 mm δείγματος και στην θέση τους προστέθηκε αεροξηρανθέν δείγμα και έτσι διαμορφώθηκε μία κατατομή όπου στο επάνω μέρος (προς την συσκευή) υπάρχει μια υγρή περιοχή και στο κάτω μέρος ξηρό δείγμα. Συνεπώς δημιουργήθηκε ένα προφίλ με δύο υγρασιακά διακριτές στρώσεις (Y/Ξ) όπου το ύψος της κάθε μίας μεταβαλλόταν σταδιακά. Από κάθε προφίλ λήφθηκε η τιμή της K που δίνει η συσκευή και γινόταν οι υπολογισμοί με βάση τα δύο σχέδια.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

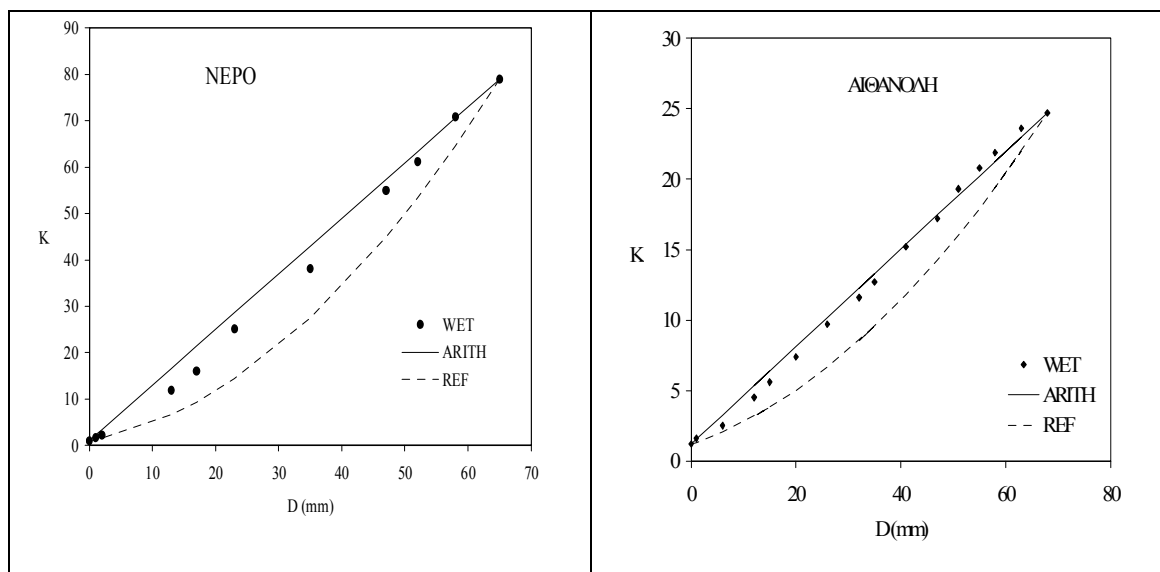
Στον πίνακα 2 παρουσιάζεται η κοκκομετρική σύσταση και η φαινομενική πυκνότητα των εδαφικών δειγμάτων.

Πίνακας 2. Κοκκομετρική σύσταση και φαινομενική πυκνότητα ρ_ϕ (gr/cm³) των εδαφικών δειγμάτων.

Τύπος Εδάφους		Άμμος	Ιλύς	Άργιλος	Φαινομενική πυκνότητα (gr/cm ³)
1	Αμμώδες	100			1,42
2	Αμμοπηλώδες	78.8	8	13.2	1,44
3	Πηλώδες	42	38	20	1,27
4	Αργιλώδες	17	36	47	1,20

3.1. ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΕΡΑΣ-ΝΕΡΟ ΚΑΙ ΑΕΡΑΣ-ΚΟΡΕΣΜΕΝΟ ΠΟΡΩΔΕΣ ΜΕΣΟ

Στο σχήμα 1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την σταδιακή είσοδο της WET στο νερό και στην αιθανόλη (για την βουτανόλη δεν παρουσιάζονται γιατί είναι ίδια). Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα η WET ακολουθεί καθαρά τον αριθμητικό τρόπο υπολογισμού της K . Τα αποτελέσματα αυτά είναι αντίθετα από αυτά με την TDR τα οποία παρουσίασαν οι Schaap et al., (2003) και ίδια με αυτά που παρουσίασαν οι Kargas and Kerkides (2009b). Στην περίπτωση της TDR με τρία ραβδία μήκους 20 cm τα δεδομένα έδειξαν ότι η διηλεκτρική σταθερά ακολουθεί καθαρά το διαθλαστικό καθεστώς (Schaap et al., (2003)). Επίσης η μέγιστη τιμή της K όταν έχουν εισχωρήσει πλήρως οι ακίδες στο νερό, στην αιθανόλη και την βουτανόλη είναι αντίστοιχα περίπου 80, 24.7 και 17.4, δηλαδή τιμές πολύ κοντά στις πραγματικές τιμές της διηλεκτρικής σταθεράς κάθε υγρού.



Σχήμα 1. Μεταβολές της K ανάλογα με το βάθος εισχώρησης των ακίδων στο αντίστοιχο υγρό. Τα σημεία είναι τιμές της K που μετρά η WET. ARITH: Οι τιμές της K που υπολογίστηκαν με τον αριθμητικό τρόπο. REF: Οι τιμές της K που υπολογίστηκαν με το διαθλαστικό τρόπο.

Στο σχήμα 2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την σταδιακή είσοδο των ακίδων της WET στο σύστημα αέρας-κορεσμένο πορώδες μέσο. Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι και σ' αυτή την περίπτωση το σύστημα ακολουθεί τον αριθμητικό τρόπο υπολογισμού της K . Στην περίπτωση όμως του αμμοπηλώδους εδάφους οι τιμές που δίνει η WET είναι λίγο μικρότερες από αυτές του αριθμητικού τρόπου υπολογισμού και βρίσκονται κάπως ενδιάμεσα σε σχέση με το διαθλαστικό τρόπο. Σε σχέση με την συσκευή ML2 η οποία λειτουργεί στα 100 MHz και ακολουθεί τον αριθμητικό τρόπο υπολογισμού (Kargas and Kerkides, 2009b) η WET ακολουθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια τον αριθμητικό τρόπο υπολογισμού. Ίσως αυτό να οφείλεται στην συχνότητα λειτουργίας της WET η οποία είναι πολύ μικρή (20 MHz) (Schaap et al., 2003). Είναι φανερό από το σχήμα 2 ότι αν η WET ακολουθούσε το διαθλαστικό τρόπο υπολογισμού τότε οι τιμές της K για κάθε βάθος εισχώρησης θα έπρεπε να είναι μικρότερες.

3.2. ΚΟΡΕΣΜΕΝΟ-ΞΗΡΟ ΚΑΙ ΞΗΡΟ ΚΟΡΕΣΜΕΝΟ ΕΛΑΦΟΣ

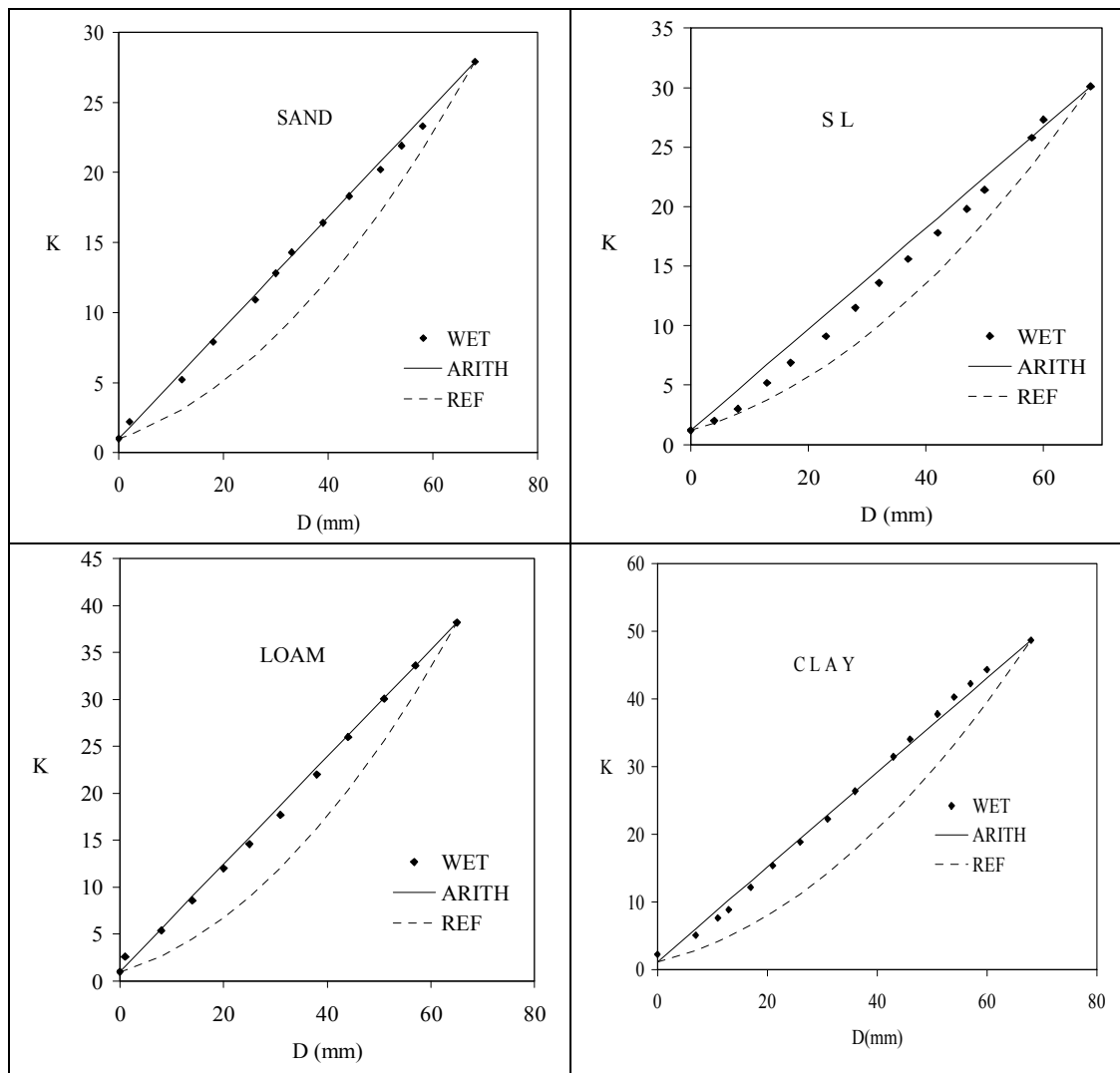
Στο σχήμα 3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την περίπτωση του αμμοπηλώδους εδάφους όπου η αλληλουχία των στρώσεων είναι κορεσμένο-ξηρό έδαφος. Φαίνεται ότι και σ' αυτή την περίπτωση ακολουθείται ο αριθμητικός τρόπος υπολογισμού της K .

Στο σχήμα 4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων για τα τέσσερα πορώδη μέσα για την περίπτωση της διήθησης από την κάτω επιφάνεια με την συσκευή Haines. Στο σχήμα παρουσιάζεται η σχέση K - θ , όπου φαίνεται ότι η σχέση αυτή είναι γραμμική σε αντίθεση με την υπόθεση ότι η σχέση $\sqrt{K}$ - θ είναι γραμμική. Στο πίνακα 3 φαίνονται οι παράμετροι της γραμμικής σχέσης και ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 .

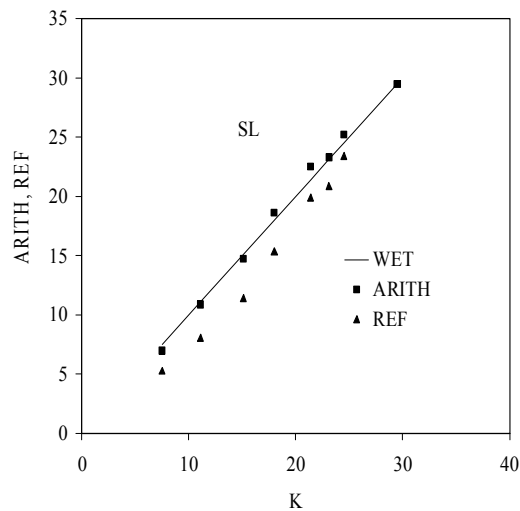
Έτσι ενώ στην περίπτωση της TDR η βαθμονόμηση είτε με την κλασσική μέθοδο των ξεχωριστών δειγμάτων, είτε με την μέθοδο της διήθησης από κάτω (Young et al., 1997) για δύο υγρασιακά διακριτές στρώσεις δίνει τα ίδια αποτελέσματα για τους συντελεστές της γραμμικής σχέσης $\sqrt{K}$ - θ , στην περίπτωση της WET αυτό δεν ισχύει γιατί η σχέση είναι διαφορετική ανάλογα με την μέθοδο βαθμονόμησης. Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι για την ίδια υγρασία όπου παρατηρείται ανομοιογενής

κατατομή η τιμή της K που μετρίεται από την WET είναι διαφορετική από την τιμή της K στην περίπτωση της ομοιογενούς κατατομής.

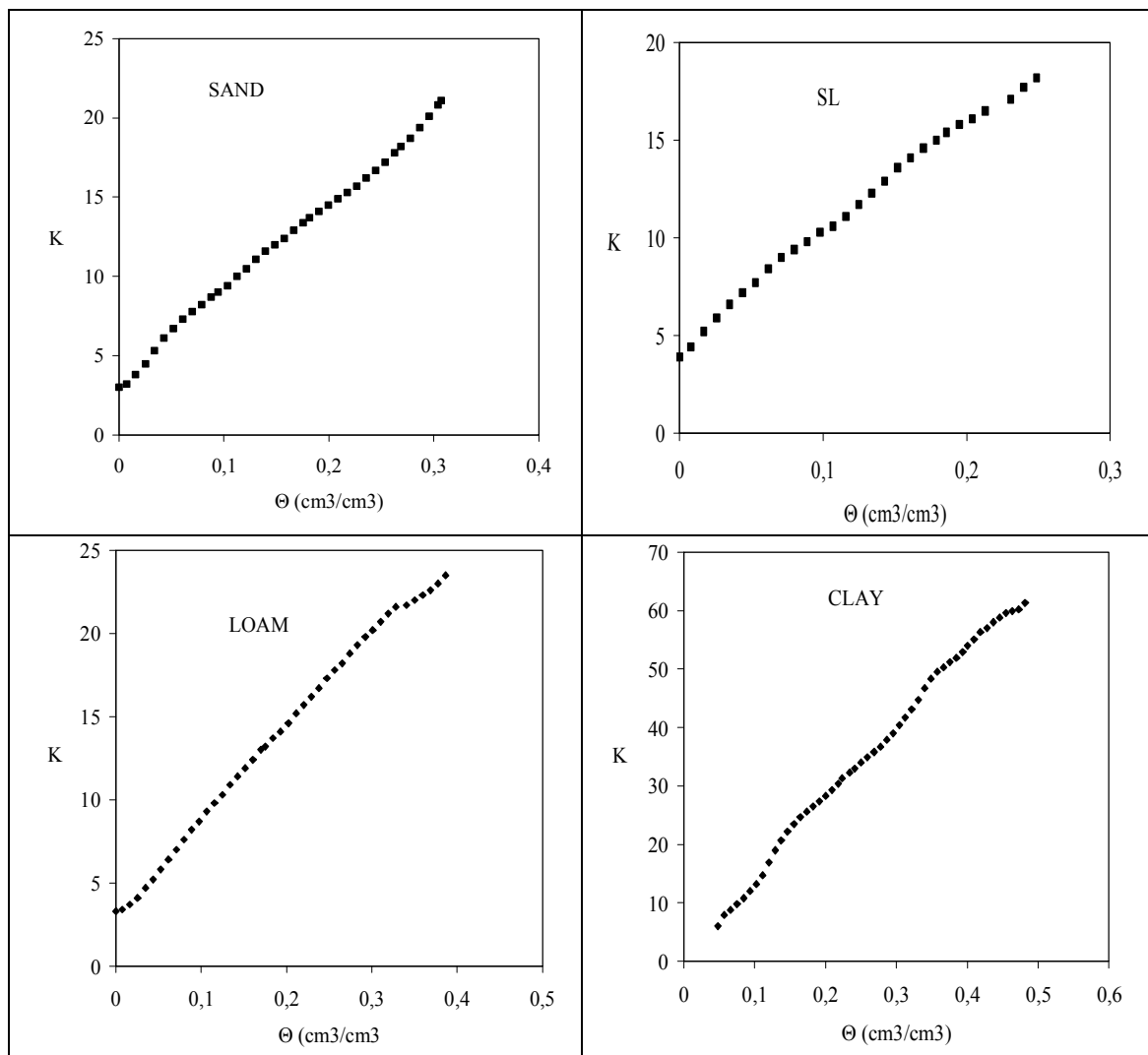
Συνεπώς όταν συμβαίνουν απότομες αλλαγές της υγρασίας με το βάθος και έχει γίνει βαθμονόμηση της WET με την κλασσική μέθοδο, για να λαμβάνονται αξιόπιστες τιμές της θ , οι ράβδοι του αισθητήρα πρέπει να τοποθετούνται οριζόντια.



Σχήμα 2. Σχέσεις K και βάθους εισχώρησης (D) των ακίδων του αισθητήρα για την περίπτωση αέρας-κορεσμένο πορώδες μέσω για τα τέσσερα πορώδη μέσα.



Σχήμα 3. Τρόπος υπολογισμού της K για την περίπτωση κορεσμένο-ξηρό πορώδες μέσω για την περίπτωση του αμμοπηλώδους εδάφους. WET: Οι τιμές της K που δίνει η WET. ARITH: Οι τιμές της K που προκύπτουν με τον αριθμητικό τρόπο. REF: Οι τιμές της K που προκύπτουν με τον διαθλαστικό τρόπο.



Σχήμα 4. Η σχέση K - θ για τα τέσσερα πορώδη μέσα στην περίπτωση της διήθησης από κάτω (ξηρό-υγρό μέσο).

Πίνακας 3. Η γραμμική σχέση K-θ και οι συντελεστές προσδιορισμού R².

Αμμος	Αμμοπηλώδες	Πηλώδες	Αργιλλώδες
K=55.55θ+3.50	K=56.86θ+4.57	K=54.93θ+3.29	K=129.59θ+1.52
R ² =0.996	R ² =0.994	R ² =0.995	R ² =0.995

Εάν τοποθετούνται κατακόρυφα τότε πρέπει να λαμβάνεται υπόψη για την εκτίμηση της θ η βαθμονόμηση που προκύπτει από το πείραμα διήθησης.

Από τον πίνακα 3 φαίνεται ότι οι τιμές των κλίσεων των ευθειών καθώς και το σημείο τομής με τον κατακόρυφο άξονα για τα τρία πρώτα μέσα είναι παραπλήσιες ενώ μεγάλη διαφορά παρατηρείται στο αργιλλώδες. Χρειάζεται επιπλέον έρευνα και σε άλλα μέσα για να υπολογιστεί η σχέση K-θ ώστε αν τιμές είναι παραπλήσιες να μπορεί να προταθεί ένας μέσος όρος τιμών για τους συντελεστές της γραμμικής σχέσης για κάθε κατηγορία μέσων.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι σε καθεστώς ανομοιόμορφης υγρασίας, ακόμα και στην περίπτωση μόνο δύο διαφορετικών υγρασιακά στρώσεων, η K υπολογίζεται από τον αριθμητικό μέσο και ότι η σχέση θ-K είναι γραμμική. Συνεπώς η μέθοδος των Young et al. (1997) στην οποία διαμορφώνονται δύο διαφορετικές υγρασιακά στρώσεις δεν δίνει τα ίδια αποτελέσματα με την μέθοδο των ξεχωριστών δειγμάτων τα οποία χαρακτηρίζονται από ομοιόμορφη υγρασία. Στην πρώτη περίπτωση η σχέση θ-K είναι γραμμική ενώ στην δεύτερη η σχέση $\sqrt{K}$ -θ. Η διαφορετική αυτή συμπεριφορά των συσκευών WET σε σχέση με την TDR πιθανότατα οφείλεται στις μικρές συχνότητες λειτουργίας των WET.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Chan, C.Y. and Knight, R.J., 2001. *Laboratory measurements of electromagnetic wave velocity in layered sands*. Water Res. Research 57 (4): 1099-1105.
- Delta- T Device Ltd, 2005. *User manual for the WET sensor (type WET-2)*.www.delta-t.co.uk.
- Dirksen, C. and Dasberg, S., 1993. *Improved calibration of time domain reflectometry soil water content measurements*. Soil Science Soc. Amer. Journal 57: 660-667.
- Kargas, G. and Kerkides, P., 2008. *Water content determination in mineral and organic porous media by ML2 theta probe*. Irrigation and Drainage 57:435-449.
- Kargas, G. and Kerkides, P., 2009a. *Discussion of "Soil water content and salinity determination using different dielectric methods in saline gypsiferous soil"* by Bouksila et. al. (2008). Hydrological sciences Journal 54(1):210-212.
- Kargas, G. and Kerkides, P., 2009b. *Performance of the theta probe ML2 in the presence of nonuniform soil water profiles*. Soil and Tillage Res. 103(2): 425-432.
- Schaap, M.G., Robinson, D.A., Friedman, S.P. and Lazar, A., 2003. *Measurement and modeling of the TDR signal propagation through layered dielectric media*. Soil Sci. Soc. Am J. 67: 1113-1121.
- Topp, G.C., Davis, J.I. and Annan, A.P., 1980. *Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines*. Water Resour. Res. 16:574-582.
- Topp, G.C., Davis J.I. and Annan, A.P., 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.
- Young, M.H, Fleming, J.B., Wierenga, P.J. and Warrick, A.W., 1997. *Rapid laboratory calibration of time domain reflectometry using upward infiltration*. Soil Science Soc. Amer. Journal 61: 707-712.

ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΕΣΣΕΡΕΙΣ ΔΙΑΔΟΧΙΚΟΥΣ ΜΗΝΕΣ ΣΤΗΝ ΑΘΗΝΑ ΚΑΙ ΤΗΝ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥΠΟΛΗ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

Κ.Π. Μουστρής¹, Ι.Κ. Λαρίσση² και Α.Γ. Παλιατσός³

¹Τμήμα Μηχανολογίας,

²Τμήμα Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστικών Συστημάτων,

³Γενικό Τμήμα Μαθηματικών,

Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πειραιά, Θηβών 250 & Π. Ράλλη,
12244 Αιγάλεω

E-mails: ¹kmoustris@teipir.gr, ¹kmoustris@yahoo.gr,

²jklar@teipir.gr, ³agpal@in.teipir.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή γίνεται προσπάθεια πρόγνωσης της βροχόπτωσης για τέσσερις διαδοχικούς μήνες στις πόλεις της Αθήνας και της Αλεξανδρούπολης με τη χρήση Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων (ΤΝΔ). Συγκεκριμένα, γίνεται πρόγνωση της μέγιστης, της ελάχιστης και της μέσης μηνιαίας καθώς επίσης και της συνολικής-αθροιστικής ποσότητας βροχόπτωσης, για τέσσερις διαδοχικούς μήνες. Τα αποτελέσματα της πρόγνωσης δείχνουν μια αρκετά καλή προσαρμογή μεταξύ των παρατηρούμενων και των προβλεπόμενων ποσοτήτων βροχόπτωσης σε επίπεδο στατιστικής σημαντικότητας $p < 0.01$, τόσο για την πόλη της Αθήνας όσο και για την Αλεξανδρούπολη.

Λέξεις κλειδιά: πρόγνωση βροχόπτωσης, τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, Ελλάδα.

RAINFALL PREDICTION FOR FOUR CONSECUTIVE MONTHS IN ATHENS AND ALEXANDROUPOLIS USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

K.P. Moustris¹, I.K. Larissi² and A.G. Paliatsos³

¹Department of Mechanical Engineering,

²Department of Electronic-Computer Systems Engineering,

³General Department of Mathematics,

Technological Educational Institute of Pireaus, 250 Thivon and P. Ralli Str.,
12244 Aegaleo, Greece

E-mails: ¹kmoustris@teipir.gr, ¹kmoustris@yahoo.gr,

²jklar@teipir.gr, ³agpal@in.teipir.gr

ABSTRACT

In this work an effort is being made in order to predict the rainfall of four consecutive months in the cities of Athens and Alexandroupolis by using Artificial Neural Networks. Specifically, the prediction concerns the monthly minimum and maximum, as well as the average and the total-cumulative of the amount of rainfall for the above mentioned time-period. The results of forecasting procedure show a fairly good agreement between the observed and predicted amounts of rainfall at a statistical significance level of $p < 0.01$, in both sites of research.

Key words: rainfall prediction, artificial neural networks, Greece.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τις τελευταίες δεκαετίες λόγω των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής, η μείωση της ποσότητας του νερού που είναι αναγκαίο για τις ανθρώπινες δραστηριότητες έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση του φαινομένου της λειψυδρίας σε όλο και περισσότερες περιοχές του πλανήτη, με συνεχώς αυξανόμενη ένταση. Η πρόγνωση της βροχόπτωσης είναι πολύ σημαντική για τομείς όπως η γεωργία, οι κοινωνικο-οικονομικές δραστηριότητες αλλά και ο σχεδιασμός και η διαχείριση των πηγών νερού σε μια περιοχή.

Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν τα τελευταία χρόνια αρκετές επιστημονικές εργασίες σχετικές με την πρόγνωση των ποσοτήτων βροχόπτωσης, που δεν φτάνουν όμως στο βάθος χρόνου της πρόγνωσης τεσσάρων μηνών.

Συγκεκριμένα, οι Sahai et al. (2000) χρησιμοποίησαν ΤΝΔ για την πρόγνωση της βροχόπτωσης την καλοκαιρινή περίοδο των μουσώνων συνολικά σε όλη την Ινδία. Ως δεδομένα εισαγωγής χρησιμοποίησαν τη βροχόπτωση των μηνών Ιουνίου-Ιουλίου-Αυγούστου και Σεπτεμβρίου, της χρονικής περιόδου 1871-1994, όπως αυτή καταγράφηκε από 306 διαφορετικούς σταθμούς καταγραφής της βροχόπτωσης σε ολόκληρη την Ινδία. Η πρόγνωση βασίστηκε στη γνώση του συνολικού ποσού βροχόπτωσης, των αντίστοιχων τεσσάρων μηνών, των προηγούμενων τεσσάρων ετών. Το παραγόμενο αποτέλεσμα από τα ΤΝΔ είναι η πρόγνωση της συνολικής-αθροιστικής βροχόπτωσης των τεσσάρων αυτών μηνών του τρέχοντος ημερολογιακού έτους. Οι Chantasut et al. (2004) χρησιμοποίησαν ΤΝΔ που εκπαιδεύτηκαν ώστε να κάνουν πρόγνωση της βροχόπτωσης χρησιμοποιώντας μηνιαίες τιμές βροχόπτωσης της χρονικής περιόδου 1941-1999, από 245 σταθμούς καταγραφής κατά μήκος της περιοχής του ποταμού Chao Phraya (Ταϊλάνδη). Η πρόγνωση αφορούσε την ποσότητα βροχής για τον επόμενο μήνα, χρησιμοποιώντας ως δεδομένα εισαγωγής τη μηνιαία βροχόπτωση των προηγούμενων δέκα μηνών. Οι Freinwan and Cigizoglu (2005) ανέπτυξαν ένα πλήθος διαφορετικών ΤΝΔ πολυστρωματικής αντίληψης-νόησης που εκπαιδεύτηκαν με τη μέθοδο της οπισθοδρομικής διάδοσης του λάθους ώστε να κάνουν πρόγνωση της βροχόπτωσης για τον επόμενο μήνα, χρησιμοποιώντας ως δεδομένα εισαγωγής τη βροχόπτωση των δύο προηγούμενων μηνών και ένα συντελεστή περιодικότητας για κάθε μήνα. Η πρόγνωση αφορούσε την περιοχή του αεροδρομίου στο Αμάν της Ιορδανίας και τη χρονική περίοδο 1924-2000. Οι Iseri et al. (2005) δημιούργησαν διάφορων τύπων προγνωστικά μοντέλα πρόγνωσης της βροχόπτωσης στην περιοχή της Fukuoka (Ιαπωνία), μεταξύ των οποίων και ΤΝΔ. Η πρόγνωση βασιζόταν σε δεδομένα της χρονικής περιόδου 1901-1997 και αφορούσε το συνολικό ποσό βροχόπτωσης τον Αύγουστο. Ως δεδομένα εισαγωγής-εκπαίδευσης των ΤΝΔ χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές της μεταβολής της επιφανειακής θερμοκρασίας της θάλασσας και οι τιμές τριών κλιματικών δεικτών, για τρεις μέχρι δώδεκα μήνες πριν το μήνα πρόγνωσης. Τέλος, οι Mar and Naing (2008) χρησιμοποίησαν ΤΝΔ για την πρόγνωση της μηνιαίας ποσότητας βροχόπτωσης στην περιοχή Yangon (Μιανμάρ-Νοτιοανατολική Ασία). Για το σκοπό αυτό χρησιμοποίησαν μηνιαίες τιμές βροχόπτωσης που κάλυπταν τη χρονική περίοδο 1970-2006. Ανέπτυξαν ένα σύνολο διαφορετικών ΤΝΔ με διαφορετικό αριθμό τεχνητών νευρώνων το καθένα, τόσο στο στρώμα εισαγωγής όσο και στο κρυφό στρώμα.

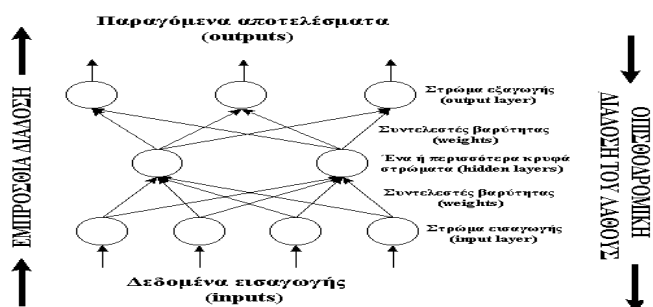
Σκοπός της εργασίας αυτής είναι να διερευνηθεί η δυνατότητα πρόγνωσης της βροχόπτωσης, με τη χρήση ΤΝΔ, για τέσσερις διαδοχικούς μήνες του έτους. Το διάστημα των τεσσάρων διαδοχικών μηνών ως χρονικό βήμα πρόγνωσης επιλέχτηκε μετά από ένα πλήθος δοκιμών. Συγκεκριμένα, δημιουργήθηκαν και «εκπαιδεύτηκαν» διαφορετικά ΤΝΔ πρόγνωσης της βροχόπτωσης για έναν, δύο, τρεις και τέσσερις διαδοχικούς μήνες. Έτσι, βρέθηκε ότι η καλύτερη πρόγνωση γίνεται για τέσσερις διαδοχικούς μήνες και κυρίως σε ότι αφορά την πρόγνωση της μέσης και την αθροιστικής ποσότητας βροχόπτωσης.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1. ΤΕΧΝΗΤΑ ΝΕΥΡΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ

Τα ΤΝΔ είναι εμπνευσμένα από τη δομή και τη λειτουργία του ανθρώπινου εγκεφάλου. Βασικό δομικό στοιχείο του ανθρώπινου εγκεφάλου είναι οι νευρώνες, οι οποίοι είναι ουσιαστικά νευρικά κύτταρα τα οποία δημιουργούν μεταξύ τους ένα πυκνό δίκτυο επικοινωνίας. Τα συνήθη ΤΝΔ χρησιμοποιούν πολύ απλοποιημένα μοντέλα νευρώνων, που μπορούν να διατηρούν μόνο τα πολύ αδρά χαρακτηριστικά των ανθρώπινων νευρώνων (Διαμαντάρας, 2007).

Τα πρώτα μοντέλα ΤΝΔ εμφανίστηκαν τις δεκαετίες του 1940 και 1950 με το βασικό μοντέλο τεχνητού νευρώνα των McCulloch and Pitts (1943) και τον πρώτο αλγόριθμο εκπαίδευσης ΤΝΔ του Rosenblatt (1958). Στις επόμενες δεκαετίες ακολούθησε μια ύφεση στη χρήση των ΤΝΔ λόγω της μεγάλης υπολογιστικής ισχύος που απαιτούσε η χρήση τους και που δεν ήταν εύκολα διαθέσιμη από τους ηλεκτρονικούς υπολογιστές της εποχής εκείνης. Την ύφεση αυτή ακολούθησε η αναγέννηση των ΤΝΔ με την εισαγωγή του μοντέλου ΤΝΔ του Hopfield (1982, 1987). Αυτά τα ΤΝΔ είναι γνωστά και ως ΤΝΔ πολυστρωματικής αντίληψης-νόησης (Multi-Layer Perceptron ή MLP), που σε συνδυασμό με τον αλγόριθμο εκπαίδευσης της οπισθοδρομικής διάδοσης του λάθους που προτάθηκε από τον Werbos (1974) προκάλεσαν ξανά το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας. Το ενδιαφέρον αυτό συνδυάστηκε με την παράλληλη ραγδαία αύξηση των δυνατοτήτων των ηλεκτρονικών υπολογιστών.



Σχήμα 1. Αρχιτεκτονική δομή ΤΝΔ πολυστρωματικής αντίληψης-νόησης και ο αλγόριθμος εκπαίδευσης της οπισθοδρομικής διάδοσης του λάθους.

Στο Σχήμα 1 δίνεται η αρχιτεκτονική δομή ενός ΤΝΔ-MLP και του αλγόριθμου εκπαίδευσης της οπισθοδρομικής διάδοσης του λάθους. Το πρώτο στρώμα είναι το στρώμα εισαγωγής των δεδομένων με έναν ή περισσότερους νευρώνες, ανάλογα με τον αριθμό των στοιχείων-δεδομένων εισαγωγής που είναι απαραίτητα για τη σωστή εκπαίδευση του ΤΝΔ. Ακολουθούν ένα ή περισσότερα κρυφά στρώματα (hidden layers) με έναν αριθμό τεχνητών νευρώνων που είναι απαραίτητοι για την επεξεργασία των σημάτων εισόδου. Κάθε νευρώνας του κρυφού στρώματος επικοινωνεί με όλους τους νευρώνες τόσο του στρώματος εισαγωγής όσο και των υπόλοιπων κρυφών στρωμάτων, έχοντας σε κάθε σύνδεση του έναν χαρακτηριστικό συντελεστή βαρύτητας. Τελικά, το σήμα φτάνει στο στρώμα εξαγωγής αποτελεσμάτων όπου εκεί συγκρίνεται η παραγόμενη τιμή από το ΤΝΔ με την τιμή στόχο και υπολογίζεται το λάθος. Έτσι τροποποιούνται κατάλληλα οι τιμές των συντελεστών βαρύτητας και επαναλαμβάνεται ο κύκλος εκπαίδευσης, μέχρις ότου το λάθος-σφάλμα στον υπολογισμό της τιμής στόχου να καταστεί αποδεκτό, ανάλογα με την εφαρμογή.

2.2. ΤΕΧΝΗΤΑ ΝΕΥΡΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΠΡΟΓΝΩΣΗΣ ΤΗΣ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ

Στην εργασία αυτή δημιουργήθηκαν οκτώ ΤΝΔ (ΤΝΔ#1-ΤΝΔ#8). Τα τέσσερα πρώτα (ΤΝΔ#1-ΤΝΔ#4) προβλέπουν τη μέγιστη, την ελάχιστη, τη μέση μηνιαία και τη συνολική-αθροιστική ποσότητα βροχόπτωσης για τους επόμενους τέσσερεις διαδοχικούς μήνες, στην πόλη της Αθήνας. Τα επόμενα τέσσερα ΤΝΔ (ΤΝΔ#5-ΤΝΔ#8) προβλέπουν τις αντίστοιχες ποσότητες βροχόπτωσης, για τους επόμενους τέσσερεις διαδοχικούς μήνες, για την πόλη της Αλεξανδρούπολης. Τα οκτώ αυτά ΤΝΔ έχουν ένα στρώμα εισαγωγής με επτά συνολικά τεχνητούς νευρώνες (δεδομένα εισαγωγής), ένα κρυφό στρώμα με πέντε συνολικά τεχνητούς νευρώνες και το στρώμα εξαγωγής αποτελεσμάτων, με έναν νευρώνα που είναι ουσιαστικά η τιμή στόχος-πρόγνωσης.

Γενικά για την επιλογή του βέλτιστου αριθμού κρυφών στρωμάτων και κρυφών νευρώνων σε ένα ΤΝΔ δεν υπάρχει μια συγκεκριμένη διαδικασία-μεθοδολογία ή αλγόριθμος. Γνωρίζουμε ότι ένα καλό ΤΝΔ του οποίου οι προγνώσεις μπορούν να θεωρηθούν αξιόπιστες και εφαρμόσιμες, είναι αυτό που έχει το μικρότερο αριθμό κρυφών στρωμάτων και τον μικρότερο αριθμό κρυφών τεχνητών νευρώνων σε καθένα από τα κρυφά στρώματα. Έτσι, ξεκινάει η εκπαίδευση του ΤΝΔ με έναν αριθμό κρυφών νευρώνων και μετά την ολοκλήρωσή της μειώνεται κατά ένας, κάθε φορά, ο αριθμός των κρυφών νευρώνων. Ακολουθεί νέα εκπαίδευση και αν η ικανότητα πρόγνωσης του ΤΝΔ είναι καλύτερη από πριν συνεχίζεται η μείωση του αριθμού των κρυφών νευρώνων μέχρι τη στιγμή που το ΤΝΔ δεν θα «μαθαίνει» το πρόβλημα καλύτερα από ότι πριν. Είναι δηλαδή μια εμπειρική-πειραματική διαδικασία επαναλαμβανόμενων εκπαιδεύσεων. Αυτή η διαδικασία ακολουθήθηκε και στην συγκεκριμένη εργασία και βρέθηκε σε όλες τις περιπτώσεις ότι ο βέλτιστος αριθμός κρυφών νευρώνων είναι 5 με ένα κρυφό στρώμα.

Για την εκπαίδευση των ΤΝΔ χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα βροχόπτωσης που αφορούσαν μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο κάθε πόλης. Για την αξιολόγηση των δυνατοτήτων πρόγνωσης της βροχόπτωσης από τα εκπαιδευμένα πλέον ΤΝΔ, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα βροχόπτωσης, διαφορετικής χρονικής περιόδου, σε σχέση με αυτή της εκπαίδευσης, για κάθε πόλη. Συγκεκριμένα, για την πόλη της Αθήνας, ως δεδομένα εκπαίδευσης χρησιμοποιήθηκαν οι μηνιαίες ποσότητες βροχόπτωσης της χρονικής περιόδου 1891-1989 και ως δεδομένα για την αξιολόγηση των δυνατοτήτων πρόγνωσης οι μηνιαίες ποσότητες βροχόπτωσης της χρονικής περιόδου 1990-2006. Για την πόλη της Αλεξανδρούπολης, ως δεδομένα εκπαίδευσης χρησιμοποιήθηκαν οι μηνιαίες ποσότητες βροχόπτωσης της χρονικής περιόδου 1947-1993 και ως δεδομένα για την αξιολόγηση των δυνατοτήτων πρόγνωσης οι μηνιαίες ποσότητες βροχόπτωσης της χρονικής περιόδου 1994-2004.

Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται για κάθε ένα από τα οκτώ ΤΝΔ τα δεδομένα εισαγωγής και τα παραγόμενα από αυτά αποτελέσματα. Ο αθροιστικός συντελεστής περιοδικότητας που εμφανίζεται στον Πίνακα 1, ως στοιχείο-δεδομένο εισαγωγής για την εκπαίδευση των ΤΝΔ, είναι το άθροισμα των συντελεστών περιοδικότητας του κάθε μήνα που ανήκει στο τετράμηνο για το οποίο πρόκειται να γίνει η πρόγνωση της βροχόπτωσης. Συγκεκριμένα, σε κάθε μήνα δόθηκε ένας αριθμός (συντελεστής περιοδικότητας) με βάση την εποχικότητα που εμφανίζουν τα ποσά βροχόπτωσης στη διάρκεια του ημερολογιακού έτους. Έτσι, για τους μήνες Ιούνιο, Ιούλιο και Αύγουστο δόθηκε ο αριθμός μηδέν (0), για τους μήνες Απρίλιο, Μάιο και Σεπτέμβριο ο αριθμός ένα (1), για τους μήνες Φεβρουάριο, Μάρτιο και Οκτώβριο ο αριθμός δύο (2) και τέλος για τους μήνες Νοέμβριο, Δεκέμβριο και Ιανουάριο ο αριθμός τρία (3). Στην περίπτωση λοιπόν της πρόγνωσης για παράδειγμα του τετράμηνου Ιανουάριος-Απρίλιος, ο αθροιστικός συντελεστής περιοδικότητας των επόμενων τεσσάρων μηνών θα είναι $3+2+2+1=8$, ενώ ο αθροιστικός συντελεστής περιοδικότητας των προηγούμενων τεσσά-

ρων μηνών, Σεπτέμβριος-Δεκέμβριος, θα είναι $1+2+3+3=9$.

Πίνακας 1. Δεδομένα εισαγωγής, απαραίτητα για την εκπαίδευση των ΤΝΔ, καθώς και τα παραγόμενα από αυτά αποτελέσματα πρόγνωσης της βροχόπτωσης.

Δεδομένα εισαγωγής	ΤΝΔ#1	ΤΝΔ#2	ΤΝΔ#3	ΤΝΔ#4	ΤΝΔ#5	ΤΝΔ#6	ΤΝΔ#7	ΤΝΔ#8
Μέγιστη μηνιαία ποσότητα βροχόπτωσης των προηγούμενων τεσσάρων μηνών	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Ελάχιστη μηνιαία ποσότητα βροχόπτωσης των προηγούμενων τεσσάρων μηνών	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Μέση μηνιαία ποσότητα βροχόπτωσης των προηγούμενων τεσσάρων μηνών	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Τυπική απόκλιση της μέσης μηνιαίας ποσότητας βροχόπτωσης των προηγούμενων τεσσάρων μηνών	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Συνολική-αθροιστική βροχόπτωση των προηγούμενων τεσσάρων μηνών	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Αθροιστικός συντελεστής περιοδικότητας των προηγούμενων τεσσάρων μηνών	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Αθροιστικός συντελεστής περιοδικότητας των επόμενων τεσσάρων μηνών	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Αποτελέσματα πρόγνωσης								
Μέγιστη μηνιαία ποσότητα βροχόπτωσης των επόμενων τεσσάρων μηνών	✓				✓			
Ελάχιστη μηνιαία ποσότητα βροχόπτωσης των επόμενων τεσσάρων μηνών		✓				✓		
Μέση μηνιαία ποσότητα βροχόπτωσης των επόμενων τεσσάρων μηνών			✓				✓	
Συνολική-αθροιστική βροχόπτωση των επόμενων τεσσάρων μηνών				✓				✓

2.3. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΠΡΟΓΝΩΣΗΣ

Η αξιοπιστία ενός προγνωστικού μοντέλου και γενικότερα η ικανότητά του στην πρόγνωση διαπιστώνεται με τη χρήση ενός πλήθους στατιστικών δεικτών αξιοπιστίας. Στην εργασία αυτή, για την διαπίστωση της αξιοπιστίας και γενικότερα της ικανότητας σωστής πρόγνωσης από μέρους των ΤΝΔ, χρησιμοποιήθηκαν ως στατιστικοί δείκτες αξιοπιστίας η απόκλιση της μέσης τετραγωνικής τιμής-RMSE, ο συντελεστής προσδιορισμού- R^2 και ο δείκτης συμφωνίας-IA (Willmot, 1982; Willmot et al., 1985; Comrie, 1997; Walker et al., 1999; Kolehmainen et al., 2001).

Η απόκλιση της μέσης τετραγωνικής τιμής-RMSE είναι ένα συχνά χρησιμοποιούμενο μέτρο των διαφορών μεταξύ των τιμών που προβλέπονται από ένα προγνωστικό μοντέλο ή έναν εκτιμητή και των τιμών που έχουν καταγραφεί πραγματικά για το μέγεθος που γίνεται η πρόβλεψη-υπολογισμός. Το RMSE χρησιμεύει σε ένα ενιαίο μέτρο που δείχνει την ικανότητα της πρόγνωσης και έχει τις ίδιες μονάδες μέτρησης με το μέγεθος για το οποίο γίνεται πρόγνωση από το μοντέλο. Όσο μικρότερη είναι η αριθμητική τιμή του RMSE, τόσο πιο κοντά στις πραγματικές τιμές είναι οι προβλεπόμενες από το προγνωστικό μοντέλο τιμές. Ο συντελεστής προσδιορισμού- R^2 , δίνει πληροφορίες για το πόσο λαμβάνεται υπόψη και υπολογίζεται από το προγνωστικό μοντέλο η παρατηρούμενη μεταβλητότητα των τιμών για τις οποίες γίνεται η πρόγνωση. Παίρνει τιμές μεταξύ του μηδέν και της μονάδας ($0 \leq R^2 \leq 1$). Όσο πιο κοντά στη μονάδα είναι η τιμή του, τόσο καλύτερη και ακριβέστερη είναι η πρόγνωση από το μοντέλο. Ο δείκτης συμφωνίας-IA είναι ένα αδιάστατο μέγεθος με τιμές μεταξύ του μηδενός και της μονάδας ($0 \leq IA \leq 1$). Όταν $IA=0$ δεν υπάρχει καμία απολύτως συμφωνία μεταξύ της πρόβλεψης και της παρατήρησης. Αντίθετα, όταν $IA=1$ τότε έχουμε πλήρη συμφωνία μεταξύ πρόβλεψης και παρατήρησης.

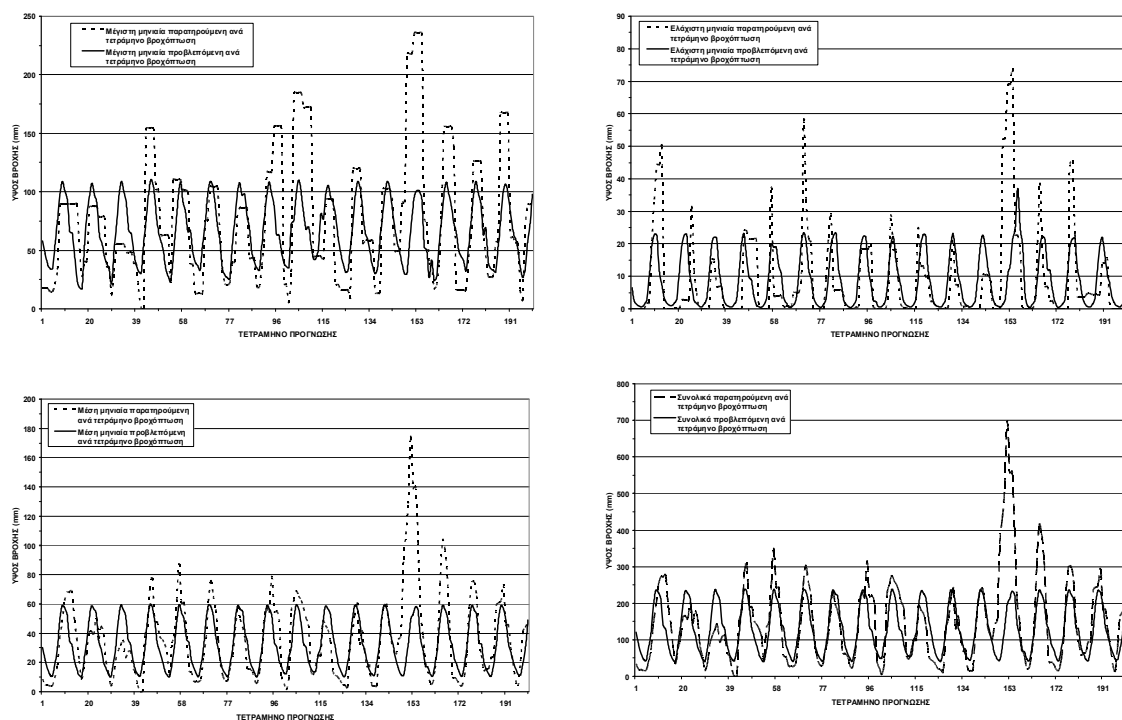
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στον Πίνακα 2, δίνονται οι τιμές των προαναφερθέντων δεικτών αξιοπιστίας της πρόγνωσης των οκτώ ΤΝΔ, τόσο για την πόλη της Αθήνας όσο και για την πόλη της Αλεξανδρούπολης.

Πίνακας 2. Τιμές δεικτών αξιοπιστίας για την πρόγνωση της βροχόπτωσης στην Αθήνα και στην Αλεξανδρούπολη.

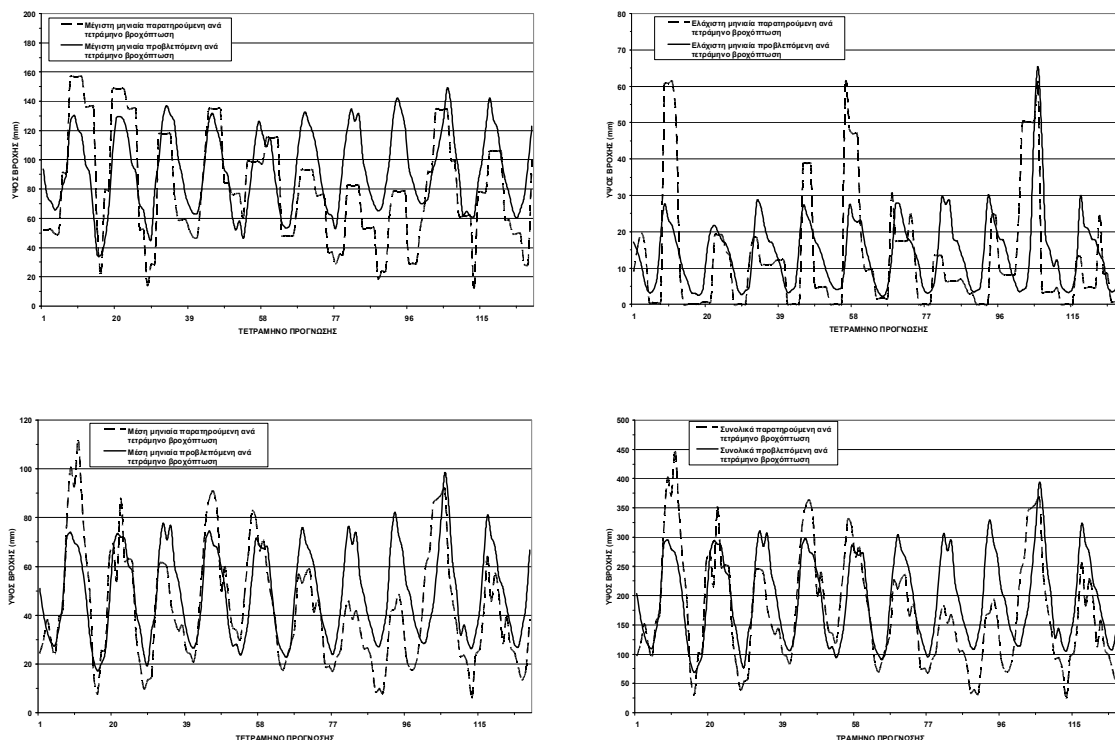
Αθήνα	R ²	IA	RMSE (mm)	Αλεξανδρούπολη	R ²	IA	RMSE (mm)
TNΔ#1	0.371	0.660	±45.9	TNΔ#5	0.415	0.751	±31.1
TNΔ#2	0.244	0.635	±12.5	TNΔ#6	0.251	0.663	±14.3
TNΔ#3	0.471	0.756	±21.3	TNΔ#7	0.508	0.812	±17.4
TNΔ#4	0.472	0.756	±85.3	TNΔ#8	0.508	0.812	±69.8

Σύμφωνα με τις τιμές των δεικτών αξιοπιστίας (Πίνακας 2) φαίνεται πως η χρήση των ΤΝΔ για την πρόγνωση της βροχόπτωσης, σε βάθος χρόνου τεσσάρων μηνών, δίνει αξιόλογα αποτελέσματα σε επίπεδο στατιστικής σημαντικότητας $p < 0.01$, τόσο για την πόλη της Αθήνας, όσο και για την πόλη της Αλεξανδρούπολης. Στην περίπτωση δε της Αλεξανδρούπολης, η αξιοπιστία των ΤΝΔ είναι λίγο καλύτερη σε σχέση με αυτή των ΤΝΔ για την πόλη της Αθήνας, είτε η πρόγνωση αφορά τη μέγιστη μηνιαία ή την ελάχιστη μηνιαία ή τη μέση μηνιαία ή ακόμα και τη συνολική-αθροιστική ποσότητα βροχής για τους επομένους τέσσερεις διαδοχικούς μήνες.



Σχήμα 2. Πρόγνωση μέγιστης, ελάχιστης και μέσης μηνιαίας τιμής βροχόπτωσης ανά τετράμηνο και συνολικής-αθροιστικής βροχόπτωσης τετράμηνου για την πόλη της Αθήνας. Περίοδος πρόγνωσης τα έτη 1990-2006.

Στα Σχήματα 2 και 3 απεικονίζονται οι χρονοσειρές πρόγνωσης της μέγιστης, της ελάχιστης και της μέσης μηνιαίας αντίστοιχα βροχόπτωσης, καθώς και της συνολικής-αθροιστικής ποσότητας βροχόπτωσης για τους επόμενους τέσσερεις διαδοχικούς μήνες. Με τη συνεχή γραμμή απεικονίζονται οι προβλεπόμενες από τα ΤΝΔ τιμές βροχόπτωσης και με τη διακεκομμένη γραμμή οι αντίστοιχες καταγραφείσες τιμές βροχόπτωσης.



Σχήμα 3. Πρόγνωση μέγιστης, ελάχιστης και μέσης μηνιαίας τιμής βροχόπτωσης ανά τετράμηνο και συνολικής-αθροιστικής βροχόπτωσης τετράμηνου για την πόλη της Αλεξανδρούπολης. Περίοδος πρόγνωσης τα έτη 1994-2004.

Από τα Σχήματα 2 και 3 διαπιστώνεται ότι η δυναμικότητα των ΤΝΔ ως προγνωστικών μοντέλων βροχόπτωσης, για τέσσερις διαδοχικούς μήνες, είναι αρκετά ικανοποιητική. Βέβαια, εμφανίζουν μια αδυναμία στην επιτυχή πρόβλεψη των αιχμών, ιδιαίτερα για την πόλη της Αθήνας. Η αδυναμία αυτή ενδεχομένως να οφείλεται στο γεγονός ότι απαιτούνται και άλλες παράμετροι-στοιχεία εισόδου για την καλύτερη εκπαίδευση των ΤΝΔ. Επίσης, σε ότι αφορά κυρίως την πόλη της Αθήνας, τέτοιες αιχμές εμφανίζονται με μικρή σχετικά συχνότητα. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι το γεγονός των αιχμών δεν δημιουργεί μια σταθερή «εμπειρία» για την πόλη της Αθήνας, με αποτέλεσμα τα ΤΝΔ που κατά κύριο λόγο εκπαιδεύονται για την απόκτηση εμπειρίας, να μην μπορούν να προβλέπουν με ακρίβεια τέτοιου είδους αιχμές. Αντίθετα, για την πόλη της Αλεξανδρούπολης, η συχνότητα εμφάνισης αιχμών βροχόπτωσης είναι σαφώς μεγαλύτερη. Έτσι, τα ΤΝΔ φαίνεται ότι μπορούν για την πόλη αυτή να αποκτήσουν την «εμπειρία» των αιχμών, με αποτέλεσμα να είναι σαφώς καλύτερη η πρόγνωσή τους, σε σχέση με την πόλη της Αθήνας.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα ΤΝΔ είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν ως προγνωστικά μοντέλα τόσο για την πρόγνωση της εποχιακής, όσο και της μηνιαίας βροχόπτωσης. Η πρόγνωση της βροχόπτωσης είναι πολύ σημαντική για το σχεδιασμό και τη διαχείριση των αναγκών για τη ζωή ποσοτήτων νερού μιας περιοχής και ειδικότερα σε ξηρές και ημίξηρες περιοχές.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Chantasut, N., Charoenjit, C. and Tranprasert, C., 2004. *Predictive mining of rainfall predictions using artificial neural networks for Chao Phraya River*. Proceedings of the 4th International Conference of the Asian Federation of Information Technology in Agricultur, Bangkok, Thailand, pp. 117-122.
- Comrie, A.C., 1997. *Comparing neural networks and regression models for ozone forecasting*. Journal of Air and Waste Management Association, 47: 653-663.
- Διαμαντάρας, Κ., 2007. *Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα*. Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα (ISBN 978-960-461-080-8).
- Freiwan, M and Cigizoglu, H.K., 2005. *Prediction of total monthly rainfall in Jordan using feed forward backpropagation method*. Fresenius Environmental Bulletin, 14, 2: 142-151.
- Hopfield, J.J., 1982. *Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities*. Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA, 9, pp. 2554.
- Hopfield, J.J., 1987. *Learning algorithms and probability distributions in feed-forward and feed-back networks*. Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA, 84, pp. 8429-8433.
- Iseri, Y., Dandy, G.C., Maier, H.R., Kawamura, A. and Jinno, K., 2005. *Medium term forecasting of rainfall using artificial neural networks*. Proceedings of the International Congress on Modeling and Simulation. Advances and Applications for Management and Decision Making. The Modeling and Simulation Society of Australia and New Zealand Inc., Melbourne, Australia, pp. 1834-1840.
- Kolehmainen, M., Martikainen, H. and Ruuskanen, J., 2001. *Neural networks and periodic components used in air quality forecasting*. Atmospheric Environment, 35: 815-825.
- Mar, K.W. and Naing T.T., 2008. *Optimum neural network architecture for precipitation prediction of Myanmar*. Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology, 36: 875-879.
- McCulloch, W. and Pitts, W., 1943. *A logical calculus of the ideas imminent in nervous activity*. Bulletin of Mathematical Biophysics, 5: 33-115.
- Rosenblatt, F., 1958. *The Perceptron: A Probabilistic model for information storage and organization in the brain*. Cornell Aeronautical Laboratory. Psychological Review, 65, 6, pp. 386-408.
- Sahai, A.K., Soman, M.K. and Satyan, V., 2000. *All India summer monsoon rainfall prediction using an artificial neural network*. Climate Dynamics, 16: 291-302.
- Walker, S-E., Slordal, H.L., Guerreiro, C., Gram, F. and Grønskei, E.K., 1999. *Air pollution exposure monitoring and estimation Part II. Model evaluation and population exposure*. Journal of Environmental Monitoring, 1: 321-326.
- Werbos, P., 1974. *Beyond Regression: New Tools for Prediction and Analysis on the Behavior Sciences*. Ph.D. Thesis, Harvard University.
- Wilmot, C.J., 1982. *Some comments on the evaluation of model performance*. Bulletin American Meteorology Society, 63, 11: 1309-1313.
- Willmott, C.J., Ackleson, S.G., Davis, R.E., Feddema, J.J., Klink, K.M., Legates, D.R., O'Donnell, J. and Rowe, C., 1985. *Statistics for the evaluation and comparison of models*. Journal of Geophysical Research, 90, pp. 8995-9005.

ΥΨΗΛΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΕΣ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΠΡΟΓΝΩΣΕΙΣ ΚΑΙΡΟΥ ΓΙΑ ΑΓΡΟΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

I. Πυθαρούλης

Τομέας Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας, Τμήμα Γεωλογίας,
Α.Π.Θ., 54124, Θεσσαλονίκη
E-mail: pyth@geo.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο Τομέας Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας του Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης χρησιμοποιεί επιχειρησιακά τα περιοχικά αριθμητικά μοντέλα πρόγνωσης καιρού ΣΚΙΡΩΝ και MM5 για την παροχή 3-ήμερων προγνώσεων στις περιοχές της Ευρώπης-Μεσογείου και Ελλάδας. Στην παρούσα μελέτη αρχικά περιγράφονται τα χαρακτηριστικά λειτουργίας των μοντέλων. Στη συνέχεια, ερευνάται η επίδοση του μοντέλου ΣΚΙΡΩΝ και η χρονική της μεταβλητότητα μέσω στατιστικής αξιολόγησης των προγνώσεων που πραγματοποιήθηκαν από τον Ιούνιο 2007 έως τον Απρίλιο 2009, στις τοποθεσίες 21 μετεωρολογικών σταθμών επιφάνειας που καλύπτουν όλο τον Ελλαδικό χώρο. Το μοντέλο ΣΚΙΡΩΝ παρουσιάζει αξιοσημείωτη διατήρηση της προγνωστικής του ικανότητας κατά τη διάρκεια της προγνωστικής περιόδου.

Λέξεις κλειδιά: επιχειρησιακή αριθμητική πρόγνωση καιρού, ΣΚΙΡΩΝ, MM5, στατιστική αξιολόγηση.

HIGH-RESOLUTION OPERATIONAL NUMERICAL WEATHER FORECASTS FOR AGROMETEOROLOGICAL APPLICATIONS

I. Pytharoulis

Department of Meteorology and Climatology, School of Geology,
Aristotle University of Thessaloniki, Thessaloniki 54124, Greece
E-mail: pyth@geo.auth.gr

ABSTRACT

The Department of Meteorology and Climatology of the Aristotle University of Thessaloniki utilizes operationally the regional numerical weather prediction models SKIRON and MM5, in order to produce 3-day forecasts for Europe-Mediterranean and Greece. In this study, the model characteristics are initially described. Subsequently, the performance of SKIRON and its temporal variability are investigated through statistical analysis of the forecasts produced from June 2007 to April 2009 at positions corresponding to 21 surface meteorological stations covering Greece. SKIRON model exhibits a remarkable maintenance of its skill throughout the forecast period.

Key words: operational numerical weather prediction, SKIRON, MM5, statistical evaluation.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο Τομέας Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας (ΤΜΚ) του Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης (Α.Π.Θ.) χρησιμοποιεί επιχειρησιακά τα περιοχικά αριθμητικά μοντέλα πρόγνωσης καιρού ΣΚΙΡΩΝ και MM5 για την παροχή 3-ήμερων προγνώσεων στις περιοχές της Ευρώπης-Μεσογείου και Ελλάδας. Οι προγνώσεις διατίθενται καθημερινά στο διαδίκτυο, οπτικοποιημένες σε μορφή χαρτών ή χρονοσειρών, μέσω της ιστοσελίδας του ΤΜΚ (<http://meteo.geo.auth.gr/skiron/>). Η χρήση των προγνώσεων γίνεται κυρίως για εκπαιδευτικούς και ερευνητικούς σκοπούς. Επίσης, χρησιμοποιούνται επικουρικά από τους προγνώστες διαφόρων μετεωρολογικών κέντρων, όπως η Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (ΕΜΥ). Η παροχή αριθμητικών προγνώσεων καιρού γίνεται ανελλιπώς από το Μάιο του 2007, αρχικά με τη χρήση μόνο του μοντέλου ΣΚΙΡΩΝ και από το Νοέμβριο του 2008 και με το μοντέλο MM5.

Οι προγνώσεις περιλαμβάνουν ένα μεγάλο αριθμό μετεωρολογικών πεδίων όπως η θερμοκρασία αέρα, η υγρασία αέρα, η πίεση στη μέση στάθμη της θάλασσας, η νεφοκάλυψη, η ταχύτητα και διεύθυνση ανέμου, ο ολικός υετός, η χιονόπτωση, το γεωδυναμικό ύψος, ο στροβιλισμός και οι επιφανειακές ροές αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας. Ένας μεγάλος αριθμός από τις παραπάνω παραμέτρους, σε συνδυασμό με πιο εξειδικευμένα προγνωστικά πεδία όπως η θερμοκρασία επιφάνειας και εδάφους, η υγρασία εδάφους, η ηλιακή και γήινη ακτινοβολία και η απορροή, έχουν ερευνητική και πρακτική αξία για τη γεωργία. Οι επιχειρησιακές μετεωρολογικές προγνώσεις επιτρέπουν τον καλύτερο σχεδιασμό της άδρευσης και την πρόληψη κινδύνων (π.χ. παγετού, έντονων επεισοδίων υετού) για τις καλλιέργειες. Σημαντική παράμετρος για τη χρήση των αριθμητικών προγνώσεων καιρού είναι η ποιότητά τους, η οποία πρέπει να ελέγχεται διαρκώς τόσο μέσω της μελέτης συγκεκριμένων περιπτώσεων (Kallos and Pytharoulis, 2005) όσο και με στατιστικές μεθόδους (Wilks, 1995; Casati et al., 2008; Gofa et al., 2008).

Με βάση τα παραπάνω, οι στόχοι της παρούσας εργασίας είναι:

- Η συνοπτική παρουσίαση των αριθμητικών μοντέλων του ΤΜΚ
- Η στατιστική αξιολόγηση των αριθμητικών προγνώσεων καιρού του ΤΜΚ.

2. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΓΝΩΣΗΣ ΚΑΙΡΟΥ

2.1. ΣΚΙΡΩΝ

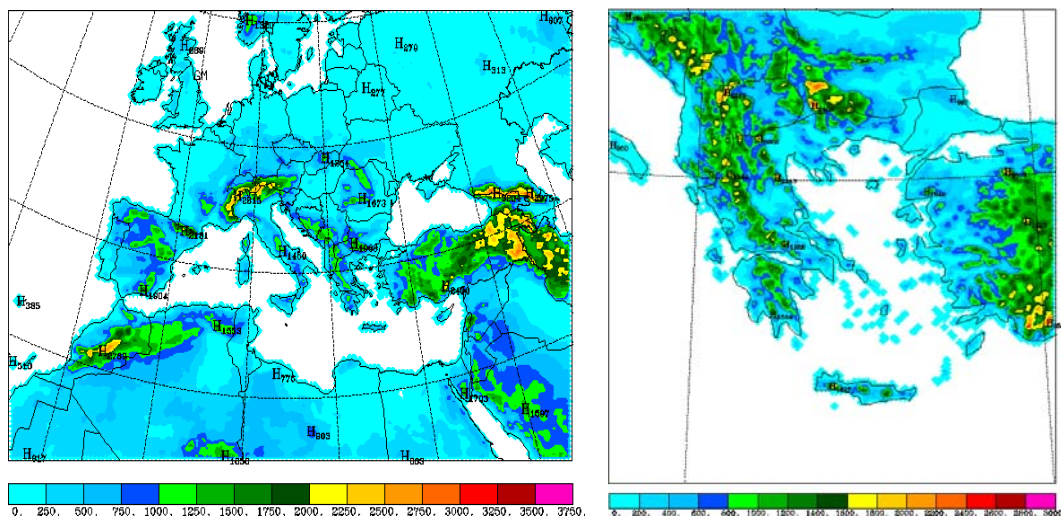
Το αριθμητικό μοντέλο ΣΚΙΡΩΝ (Kallos, 1997) αναπτύχθηκε από την Ομάδα Ατμοσφαιρικών Μοντέλων και Πρόγνωσης Καιρού του Πανεπιστημίου Αθηνών (<http://forecast.uoa.gr>) και βασίζεται στο μοντέλο Eta/NCEP. Το μοντέλο λειτουργεί επιχειρησιακά και ερευνητικά σε ένα μεγάλο αριθμό ινστιτούτων και μετεωρολογικών κέντρων όπως το Πανεπιστήμιο Αθηνών, το Α.Π.Θ., η ΕΜΥ, το Εθνικό Κέντρο Θαλασσίων Ερευνών, το University of Albany στις Ηνωμένες Πολιτείες, και αλλού.

Ο ΣΚΙΡΩΝ είναι ένα μη-υδροστατικό μοντέλο κατάλληλο για περιοχικές προγνώσεις σε περιοχές με ανομοιογενή φυσικά χαρακτηριστικά. Οι μεταβλητές αναπαριστώνται οριζοντίως σύμφωνα με το πλέγμα-E του Arakawa και κατακόρυφα χρησιμοποιώντας την βαθμωτή συντεταγμένη Ήτα (Eta). Το μοντέλο περιλαμβάνει κατάλληλες παραμετροποιήσεις για να αναπαραστήσει τις φυσικές διεργασίες όπως εκείνες που λαμβάνουν χώρα στο οριακό στρώμα και στο έδαφος (μέχρι το βάθος των 2.55 μ.), την ακτινοβολία, την κατακόρυφη μεταφορά και τα νέφη και τον υετό μεγάλης κλίμακας. Για τον καθορισμό των φυσιογραφικών χαρακτηριστικών της περιοχής ολοκλήρωσης χρησιμοποιούνται υψηλής ανάλυσης (30''x30'') δεδομένα ορογραφίας, κατανομής ξηράς-θάλασσας, φυτοκάλυψης και τύπου εδάφους.

Το μοντέλο χρησιμοποιείται επιχειρησιακά στον ΤΜΚ από τον Μάιο του 2007, παρέχοντας 3-ήμερες προγνώσεις καιρού σε δύο περιοχές ολοκλήρωσης. Η μία περιοχή

(ΣΚΙΡΩΝ20) καλύπτει την Ευρώπη και τη Μεσόγειο με χωρική ανάλυση $0.2^\circ \times 0.2^\circ$ (Σχήμα 1α), ενώ η άλλη περιοχή (ΣΚΙΡΩΝ5) καλύπτει την Ελλάδα με χωρική ανάλυση $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ (Σχήμα 1β). Στην κατακόρυφη διεύθυνση χρησιμοποιούνται 38 επίπεδα από την επιφάνεια έως το επίπεδο των 25 hPa (~20 χλμ).

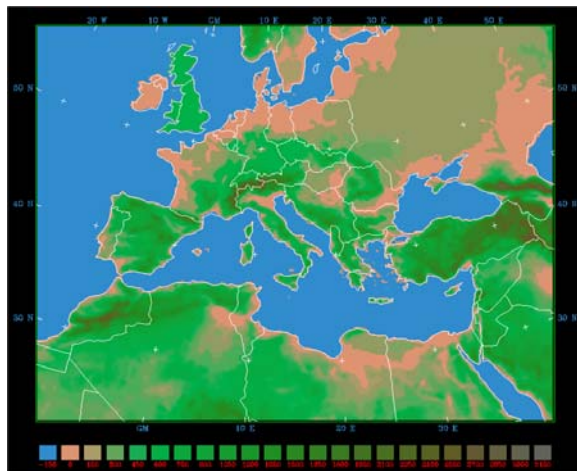
Τα μοντέλα ΣΚΙΡΩΝ5 και ΣΚΙΡΩΝ20 καθώς και το MM5 (που παρουσιάζεται στην παράγραφο 2.2) χρησιμοποιούν αρχικές και πλευρικές οριακές συνθήκες με χωρική ανάλυση $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ σε 26 ισοβαρικά επίπεδα από τον προγνωστικό κύκλο των 1200 UTC του παγκόσμιου μοντέλου NCEP/GFS. Οι επιφανειακές θερμοκρασίες της θάλασσας επίσης παρέχονται από το NCEP με χωρική ανάλυση $0.5^\circ \times 0.5^\circ$.



Σχήμα 1. Η τοπογραφία της περιοχής ολοκλήρωσης των αριθμητικών μοντέλων
α) ΣΚΙΡΩΝ20 και β) ΣΚΙΡΩΝ5

2.2. MM5

Το μη-υδροστατικό πλήρους-φυσικής αριθμητικό μοντέλο ανάλυσης και πρόγνωσης καιρού MM5 (Mesoscale Model Version 5) αναπτύχθηκε από το πανεπιστημίο “The Pennsylvania State University” και το Εθνικό Κέντρο Ατμοσφαιρικής Έρευνας (NCAR) των Ηνωμένων Πολιτειών και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα ευρύ φάσμα θεωρητικών μελετών και προγνώσεων σε πραγματικό χρόνο (Grell et al., 1994). Το μοντέλο MM5 χρησιμοποιείται επιχειρησιακά στον ΤΜΚ του Α.Π.Θ. από το Νοέμβριο του 2008 παρέχοντας 3-ήμερες προγνώσεις καιρού για τον Ευρωπαϊκό και Ελλαδικό χώρο (Σχήμα 2) με χωρική ανάλυση $18 \text{ km} \times 18 \text{ km}$ και 33 κατακόρυφα επίπεδα (έως τα 100 hPa).



Σχήμα 2. Η τοπογραφία της περιοχής ολοκλήρωσης του αριθμητικού μοντέλου MM5.

3. ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η στατιστική αξιολόγηση πραγματοποιήθηκε μόνο για τις επιχειρησιακές προγνώσεις των μοντέλων ΣΚΙΡΩΝ5 και ΣΚΙΡΩΝ20, τα οποία σε αντίθεση με το MM5 λειτουργούν για ένα χρονικό διάστημα περίπου 2 ετών. Έτσι είναι εφικτή η μελέτη της συνολικής απόδοσης του συστήματος, αλλά και της εποχιακής της διακύμανσης. Το ποσοστό των προγνώσεων που δεν πραγματοποιήθηκαν είναι μικρότερο του 2%.

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν αποτελούνται από τις 6-ωρες συνοπτικές παρατηρήσεις 21 μετεωρολογικών σταθμών της EMY που καλύπτουν όλη την Ελλάδα (Σχήμα 3) και τις αντίστοιχες προγνώσεις των μοντέλων στις συγκεκριμένες τοποθεσίες. Η δημιουργία των χρονοσειρών με τα προγνωστικά στοιχεία στην κάθε τοποθεσία έγινε με δύο μεθόδους: α) με χρήση της τιμής του πλησιέστερου σημείου πλέγματος και β) με παρεμβολή από τις τιμές των 4 γειτονικών σημείων πλέγματος (δίνοντας σε κάθε μία από τις 4 τιμές, βαρύτητα αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης από την τοποθεσία του σταθμού). Τα πεδία που μελετήθηκαν ήταν η θερμοκρασία αέρα (2μ), η σχετική υγρασία του αέρα (2μ), η πίεση στη μέση στάθμη της θάλασσας, η ταχύτητα του ανέμου (10μ) και ο 6-ωρος ολικός υετός.

Η αξιολόγηση των συνεχών μεταβλητών (θερμοκρασία, υγρασία, πίεση, ταχύτητα ανέμου) παρέχει στατιστικές τιμές που δείχνουν το βαθμό που οι προγνώσεις διαφέρουν από τις παρατηρήσεις. Τα BIAS και RMSE (Wilks, 1995) είναι δύο ευρέως χρησιμοποιούμενα στατιστικά που παρέχουν πολύ χρήσιμες πληροφορίες για την απόδοση του μοντέλου ως προς μία συγκεκριμένη μετεωρολογική παράμετρο. Για τη διακριτή μεταβλητή του υετού, υπολογίστηκε ένα πλήθος διαφορετικών στατιστικών δεικτών, που παρέχουν πληροφορίες για τη συμπεριφορά του μοντέλου από διαφορετικές οπτικές γωνίες. Πιο συγκεκριμένα για την αξιολόγηση των προγνώσεων του υετού υπολογίστηκαν τα στατιστικά: πιθανότητα εντοπισμού γεγονότος (POD), ποσοστό λάθος συναγερμών (FAR), δίκαιο σκορ κινδύνου (ETS), πιθανότητα λανθασμένου εντοπισμού (POFD), σκορ Hanssen-Kuipers (KSS), μεροληψία (BIASR), σκορ Heidke (HSS), σκορ ORSS και αναλογία σωστών ενδείξεων (PC). Οι τιμές όλων των στατιστικών (των συνεχών μεταβλητών και του υετού), που παρουσιάζονται παρακάτω, αντιστοιχούν στο σύνολο των 21 διαθέσιμων σταθμών της EMY και όχι σε μεμονωμένους σταθμούς.



Σχήμα 3. Οι τοποθεσίες (X) των 21 μετεωρολογικών σταθμών της EMY που χρησιμοποιήθηκαν στη στατιστική αξιολόγηση (Πηγή χάρτη: Google).

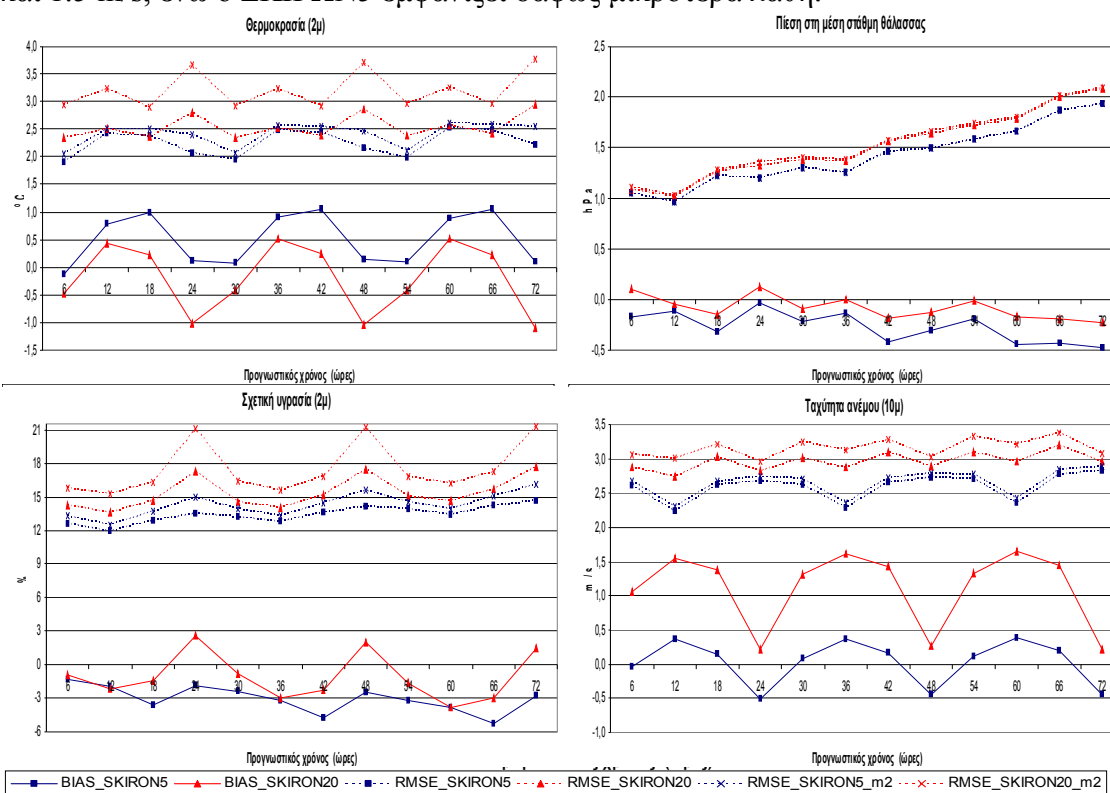
4. ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ

4.1. ΣΥΝΕΧΕΙΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ

Η απόδοση των μοντέλων ΣΚΙΡΩΝ5 και ΣΚΙΡΩΝ20 μελετήθηκε αρχικά συνολικά για όλη τη χρονική περίοδο που ήταν διαθέσιμες οι προγνώσεις (Ιούνιος 2007-

Απρίλιος 2009). Το Σχήμα 4 δείχνει τις τιμές των BIAS και RMSE για τις 4 συνεχείς μεταβλητές ως προς τον προγνωστικό χρόνο. Οι τιμές του RMSE και για τις 4 μεταβλητές δείχνουν ότι: α) τα λάθη είναι μικρότερα στο SKIRON5 που έχει την καλύτερη ανάλυση, β) τα λάθη είναι γενικά μικρότερα όταν οι προγνωστικές τιμές λαμβάνονται μέσω της μεθόδου της παρεμβολής παρά από το πλησιέστερο σημείο και γ) υπάρχει διατήρηση της προγνωστικής ικανότητας κατά τη διάρκεια της 3-ήμερης προγνωστικής περιόδου (εκτός από το πεδίο της πίεσης). Επίσης, ένας ημερήσιος κύκλος είναι εμφανής στην απόδοση και των δύο μοντέλων.

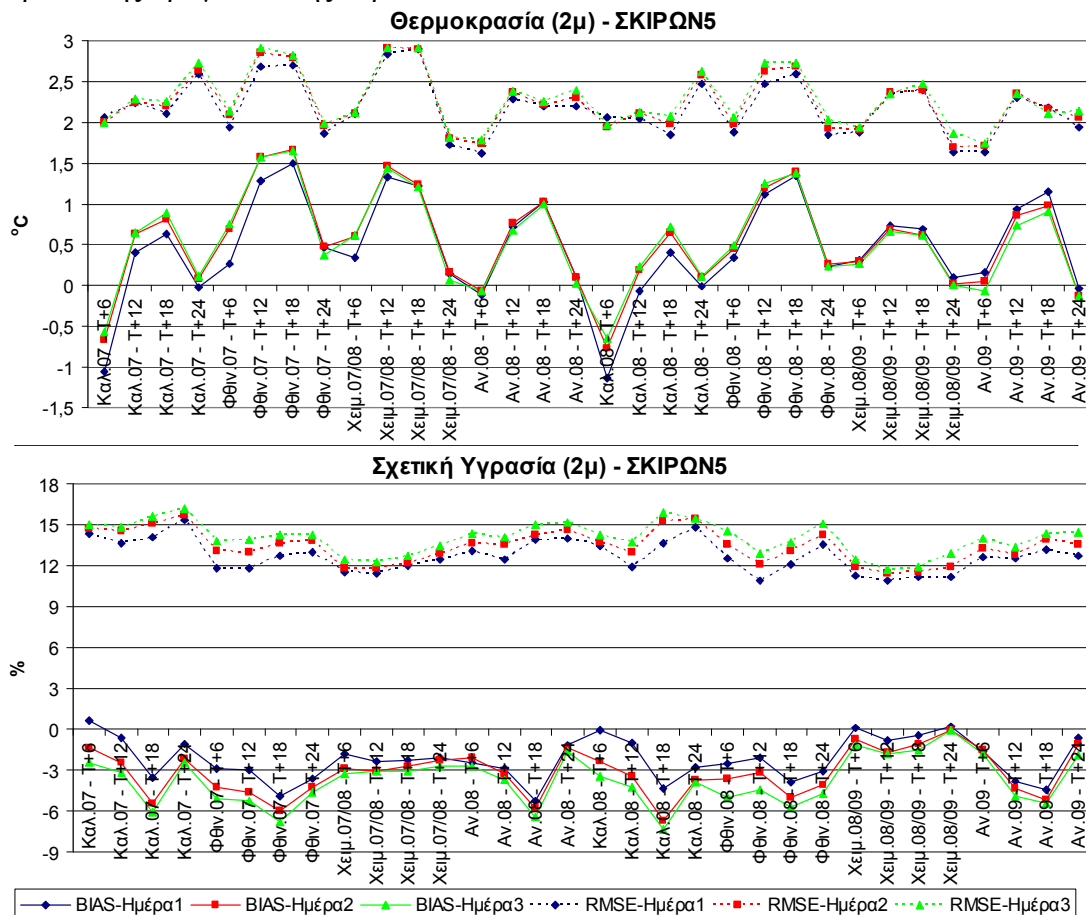
Γενικά, και τα δύο μοντέλα υποεκτιμούν την πίεση και τη σχετική υγρασία. Τα δύο μοντέλα φαίνεται να υπερεκτιμούν (μέχρι 1°C) τη θερμοκρασία τις νυχτερινές και πρώτες πρωινές ώρες (όταν συνήθως σημειώνεται η ελάχιστη ημερήσια θερμοκρασία), ενώ φαίνεται να την υποεκτιμούν (SKIRON20) ή να την προβλέπουν σωστά (SKIRON5) τις πρώτες απογευματινές ώρες (όταν συνήθως σημειώνεται η μέγιστη θερμοκρασία). Όσον αφορά την ταχύτητα του ανέμου, ο SKIRON20 την υπερεκτιμάει μόνιμα μέχρι και 1.5 m/s , ενώ ο SKIRON5 εμφανίζει σαφώς μικρότερα λάθη.



Σχήμα 4. Τα στατιστικά σκορ BIAS και RMSE των παραμέτρων της θερμοκρασίας αέρα ($^{\circ}\text{C}$), πίεσης στη μέση στάθμη της θάλασσας (hPa), σχετικής υγρασίας (%) και ταχύτητας ανέμου (m/s) ως προς τον προγνωστικό χρόνο (με χρήση της μεθόδου της παρεμβολής). Η ένδειξη “m2” δηλώνει χρήση της μεθόδου του πλησιέστερου σημείου.

Τα BIAS και RMSE των πεδίων της θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας, τα οποία έχουν μεγάλη σημασία για τη γεωργία, υπολογίστηκαν για κάθε 6-ωρο των 3 προγνωστικών ημερών και στη συνέχεια μεσοποιήθηκαν για κάθε εποχή του χρόνου, προκειμένου να μελετηθεί η εποχιακή μεταβλητότητα της απόδοσης του μοντέλου. Το Σχήμα 5 παρουσιάζει τις παραπάνω εποχιακές τιμές για τις προγνώσεις του μοντέλου SKIRON5 που ανακτήθηκαν με τη μέθοδο της παρεμβολής. Η θερμοκρασία φαίνεται να υπερεκτιμάται σχεδόν πάντα έως και 1.5°C . Το μοντέλο εμφάνισε τη μεγαλύτερη διακύμανση του RMSE της θερμοκρασίας, από 1.7°C έως 3°C , το χειμώνα του 2007-

08. Το φθινόπωρο και το χειμώνα τα μεγαλύτερα λάθη του RMSE της θερμοκρασίας εμφανίζονται τις νυχτερινές και πρώτες πρωινές ώρες, ενώ το καλοκαίρι εμφανίζονται τις πρώτες απογευματινές ώρες. Η σχετική υγρασία φαίνεται να υποεκτιμάται σε όλες τις εποχές. Το RMSE της σχετικής υγρασίας παρουσιάζει μικρή μεταβλητότητα και κυμαίνεται περίπου από 10.8 έως 16.2%. Και στα δύο μετεωρολογικά πεδία είναι εμφανές ότι υπάρχει πάρα πολύ μικρή μείωση της απόδοσης του μοντέλου κατά τη διάρκεια της προγνωστικής περιόδου.



Σχήμα 5. Εποχιακές τιμές των στατιστικών BIAS και RMSE κάθε προγνωστικής ημέρας για τη θερμοκρασία αέρα (°C) και τη σχετική υγρασία (%), από το μοντέλο ΣΚΙΡΩΝ5 (με χρήση της μεθόδου της παρεμβολής).

4.2. ΔΙΑΚΡΙΤΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ (ΥΕΤΟΣ)

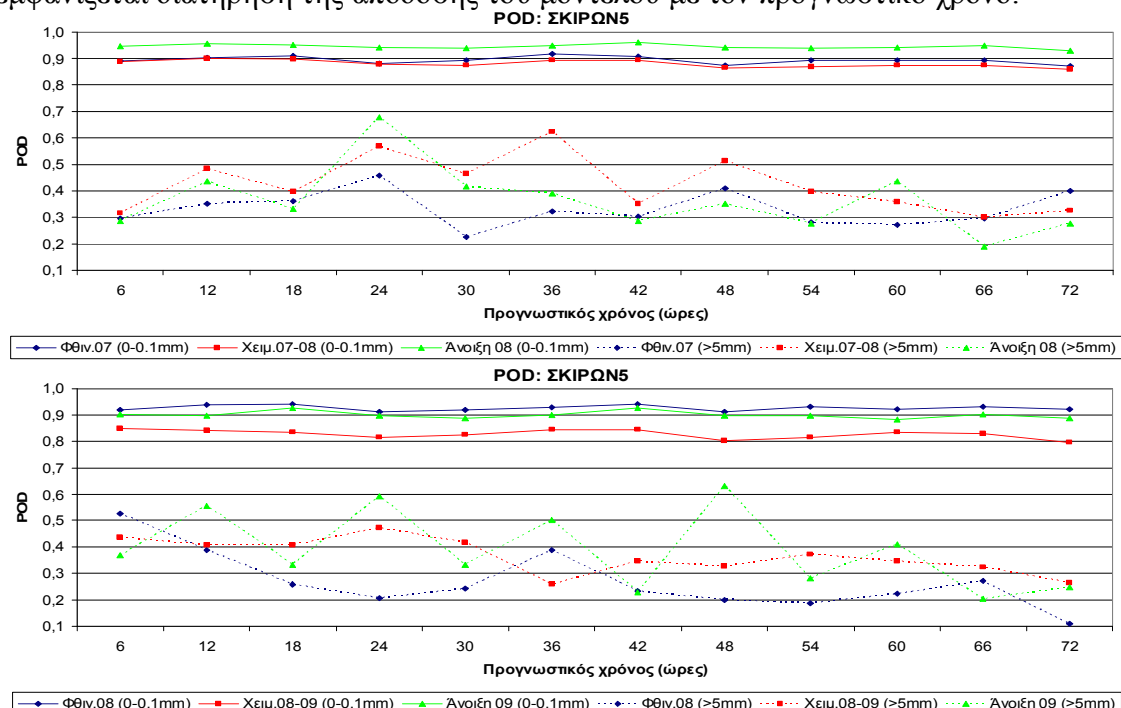
Ο Πίνακας 1 παρουσιάζει τις τιμές των στατιστικών του 6-ωρου ολικού υετού (mm), για το χειμώνα 2008-09. Η παρουσίαση γίνεται για τη χειμερινή περίοδο λόγω του ότι είναι η πιο υγρή περίοδος του χρόνου. Οι τιμές υπολογίστηκαν μέσω πινάκων συνάφειας για τα διαστήματα “0-0.1 mm” και “> 5 mm” (έντονος υετός) και για τις μεθόδους του πλησιέστερου σημείου πλέγματος και της παρεμβολής. Η απόδοση και των δύο μοντέλων είναι πολύ καλή στο διάστημα “0-0.1 mm”, αλλά μειώνεται αισθητά στα έντονα επεισόδια. Επίσης, ενώ το μοντέλο με την καλύτερη ανάλυση (ΣΚΙΡΩΝ5) γενικά εμφανίζει καλύτερη απόδοση σε μεγαλύτερο αριθμό στατιστικών, αυτό το συμπέρασμα δεν μπορεί να γενικευτεί εύκολα όπως στην περίπτωση των συνεχών μεταβλητών. Για παράδειγμα, ενώ το μοντέλο με την καλύτερη ανάλυση (ΣΚΙΡΩΝ5) έχει μεγαλύτερη ικανότητα να εντοπίζει τα έντονα επεισόδια υετού, είναι και πιο επιρρεπές στην εμφάνιση λανθασμένων συναγερμών (σε συμφωνία με τους Mass et al., 2002). Από την άλλη, η σύγκριση μεταξύ της μεθόδου της παρεμβολής και του

πλησιέστερου σημείου δεν έδειξε ότι η μία μέθοδος υπερτερεί έναντι της άλλης (σε αντίθεση με ότι συμβαίνει με τις συνεχείς μεταβλητές).

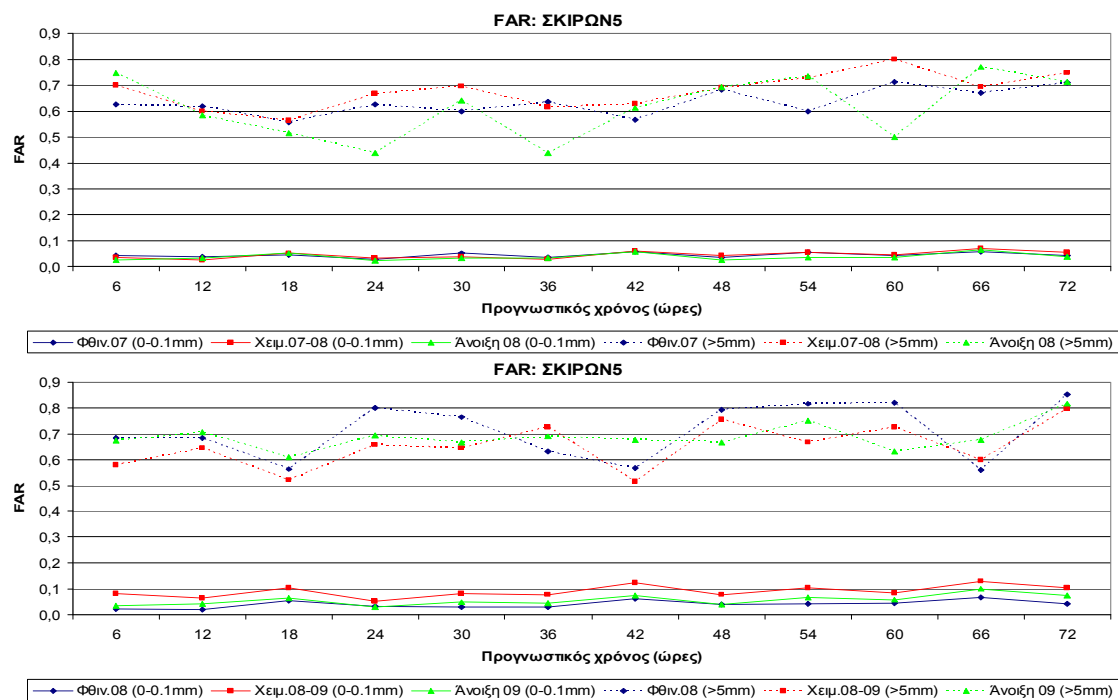
Πίνακας 1. Τα στατιστικά του 6-ωρου ολικού υετού (mm) το χειμώνα 2008-09. Η σκίαση δηλώνει το μοντέλο με την καλύτερη απόδοση σε κάθε στατιστικό.

ΠΑΛΗΣΙΕΣΤΕΡΟ ΣΗΜΕΙΟ									
0-0.1 mm	POD	FAR	ETS	POFD	KSS	BIASR	HSS	ORSS	PC
ΣΚΙΡΩΝ5	0,846	0,099	0,327	0,315	0,530	0,940	0,492	0,844	0,809
ΣΚΙΡΩΝ20	0,783	0,082	0,302	0,234	0,549	0,853	0,463	0,842	0,779
> 5 mm	POD	FAR	ETS	POFD	KSS	BIASR	HSS	ORSS	PC
ΣΚΙΡΩΝ5	0,356	0,651	0,184	0,041	0,315	1,054	0,308	0,850	0,923
ΣΚΙΡΩΝ20	0,306	0,633	0,173	0,032	0,273	0,864	0,292	0,851	0,928
ΠΑΡΕΜΒΟΛΗ									
0-0.1 mm	POD	FAR	ETS	POFD	KSS	BIASR	HSS	ORSS	PC
ΣΚΙΡΩΝ5	0,828	0,091	0,328	0,278	0,549	0,910	0,493	0,850	0,803
ΣΚΙΡΩΝ20	0,751	0,067	0,299	0,181	0,570	0,806	0,459	0,861	0,766
> 5 mm	POD	FAR	ETS	POFD	KSS	BIASR	HSS	ORSS	PC
ΣΚΙΡΩΝ5	0,365	0,653	0,186	0,042	0,322	1,088	0,311	0,850	0,922
ΣΚΙΡΩΝ20	0,303	0,624	0,174	0,031	0,272	0,845	0,295	0,857	0,929

Η μελέτη της εποχιακής απόδοσης του μοντέλου ΣΚΙΡΩΝ5 έδειξε ότι σε όλες τις εποχές για την κατηγορία “0-0.1 mm” υπάρχει μεγάλη επιτυχία εντοπισμού ($POD \geq 80\%$), αλλά και μικρό ποσοστό λάθος συναγεμίων ($FAR \leq 13\%$) (Σχήμα 6). Αντιθέτως, η πιθανότητα εντοπισμού των έντονων επεισοδίων είναι αρκετά μικρότερη και κυμαίνεται από 0.11 έως 0.68, ενώ το ποσοστό λάθος συναγεμίων αυξάνεται και κυμαίνεται από 0.44 έως 0.85. Γενικά, και στην προγνωσιμότητα του πεδίου του υετού εμφανίζεται διατήρηση της απόδοσης του μοντέλου με τον προγνωστικό χρόνο.



Σχήμα 6. Τιμές των στατιστικών POD και FAR για τον 6-ωρο ολικό υετό (mm) ανά εποχή και τιμή κατωφλίου (0-0.1mm, > 5mm) ως προς τον προγνωστικό χρόνο, από το μοντέλο ΣΚΙΡΩΝ5 (με χρήση της μεθόδου της παρεμβολής).



Σχήμα 6. (Συνέχεια).

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει τα αριθμητικά μοντέλα που λειτουργούν επιχειρησιακά στον ΤΜΚ του Α.Π.Θ., για εκπαιδευτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, καθώς και την απόδοση του μοντέλου ΣΚΙΡΩΝ, το οποίο ήδη λειτουργεί για ένα διάστημα 2 ετών. Η απόδοσή του διερευνήθηκε μέσω του υπολογισμού διαφόρων ευρέως χρησιμοποιούμενων στατιστικών. Η ανάλυση δείχνει ότι οι προγνώσεις του ΣΚΙΡΩΝ παρέχουν ικανοποιητικά αποτελέσματα ιδιαίτερα όταν χρησιμοποιείται υψηλή χωρική ανάλυση και ότι παρουσιάζουν αξιοσημείωτη διατήρηση της προγνωστικής τους ικανότητας κατά τη διάρκεια της προγνωστικής περιόδου. Η μελλοντική έρευνα θα εστιαστεί στην προσπάθεια δημιουργίας στοχαστικών προγνώσεων με τη χρήση όλων των διαθέσιμων αριθμητικών προγνώσεων καιρού του ΤΜΚ.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Casati, B., et al., 2008. *Review forecast verification: current status and future directions*. Met. Apps., 15: 3-18.
- Gofa, F., Pytharoulis, I., Andreadis, T., Papageorgiou, I., Fragkouli, P., Louka, P., Avgoustoglou E. and Tirli, V., 2008. *Evaluation of the operational numerical weather forecasts of the Hellenic National Meteorological Service*. Proceedings of 9th COMECAP, Thessaloniki, pp. 51-58.
- Grell, G.A., Dudhia, J. and Stauffer, D.R., 1994. *A description of the 5th-generation Penn State/NCAR Mesoscale Model*. NCAR/TN-3921STR, pp. 122.
- Kallos, G., 1997. *The Regional weather forecasting system SKIRON*. Proceedings of the Symposium on Regional Weather Prediction on Parallel Computer Environments, Athens, pp. 9.
- Kallos, G. and Pytharoulis, I., 2005: *Short-term predictions (weather forecasting purposes)*. In: M.G. Anderson (Editor). Encyclopedia of Hydrological Sciences. Wiley, pp. 2791-2811.
- Mass, C.F., Ovens, D., Westrick, K. and Colle, B.A., 2002. *Does increasing horizontal resolution produce more skillful forecasts?* Bull. Amer. Met. Soc., 3: 407-430.
- Wilks, D.S., 1995. *Statistical Methods in Atmospheric Sciences*, Academic Press, 464 pp.

ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΚΑΙ ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΟΥ ΧΕΙΜΩΝΑ

Γ. Δημόκας¹, Κ. Κίττας² και Μ. Tchamitchian³

^{1,2}Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Σχολή Γεωπονικών Επιστ., Τμ. Γεωπονίας, Φ.Π. & Α.Π.
Οδός Φυτόκου, 38446, Ν. Ιωνία Μαγνησίας

³Écodéveloppement, I.N.R.A., Domaine Saint-Paul, Site Agroparc,
Avignon Cedex 9, 84914, France

E-mails: ¹gedimoka@uth.gr, ²ckittas@uth.gr, ³arm@avignon.inra.fr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της εργασίας αυτής ήταν η βαθμονόμηση και επιβεβαίωση γεννήτριας παραγωγής εξωτερικών κλιματικών δεδομένων με απώτερο στόχο τη χρησιμοποίησή της σε ανεπτυγμένο βιοφυσικό προσομοίωμα. Η λειτουργία της γεννήτριας βασίζεται σε προβλέψεις βραχείας διάρκειας (χρήση μέγιστων και ελάχιστων τιμών) των κλιματικών δεδομένων και υπολογίζει την ημερήσια διακύμανσή τους. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν πειραματικές μετρήσεις στις θερμοκηπιακές εγκαταστάσεις του αγροκτήματος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στην περιοχή του Βελεστίνου. Τα αποτελέσματα της επιβεβαίωσης της γεννήτριας συγκρίθηκαν με τα πειραματικά δεδομένα της 2^{ης} πειραματικής περιόδου και παρατηρήθηκε μικρή απόκλιση των μετρούμενων κλιματικών παραμέτρων από τις υπολογισμένες τιμές της γεννήτριας.

Λέξεις κλειδιά: γεννήτρια κλίματος, βαθμονόμηση, επιβεβαίωση, C++.

CALIBRATION AND VALIDATION OF A CLIMATE WEATHER GENERATOR DURING WINTER PERIOD

G. Dimokas¹, C. Kittas² and M. Tchamitchian³

^{1,2}University of Thessaly, School of Agricultural Science, Department of Agriculture
Crop Production & Rural, Environment, Fytokou Str, N. Ionia, 38446, Greece

³Écodéveloppement, I.N.R.A., Domaine Saint-Paul, Site Agroparc,
Avignon Cedex 9, 84914, France

E-mails: ¹gedimoka@uth.gr, ²ckittas@uth.gr, ³arm@avignon.inra.fr

ABSTRACT

The aim of this work was to calibrate and to validate a climate weather generator with final target the use of generator in a developed biophysical simulator. Generator's operation is based on short duration's predictions (max and min values) of the climate parameters and calculates the daily variance. For this purpose experiments were carried out in the farm of the University of Thessaly in the region of Velesitino. Validation results were tested with measured data from the 2nd experimental period and a good agreement observed between measured and calculated values.

Key words: weather generator, calibration, validation, C++.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το κλίμα είναι το αποτέλεσμα των διακυμάνσεων σχετικών κλιματικών παραμέτρων όπως της θερμοκρασίας του αέρα, της ηλιακής ακτινοβολίας και των ατμοσφαιρικών απαιτήσεων για εξάτμιση. Ανάλογα με το χρονικό διάστημα οι παράγοντες που καθορίζουν το κλίμα παρουσιάζουν περιοδική συμπεριφορά (ημερήσια, ετήσια, πολυετή) και στοχαστική διακύμανση. Το επίπεδο περιοδικότητας των κλιματικών παραγόντων μπορεί να διαφέρει, για παράδειγμα το φαινόμενο των βροχοπτώσεων μπορεί να θεωρηθεί σαν ελλειπτική στοχαστική διαδικασία, ενώ η διάρκεια της ημέρας (φωτοπερίοδος) μπορεί να θεωρηθεί ως ένας συστηματικός παράγοντας.

Οι κλιματικοί παράγοντες παρουσιάζουν συσχέτιση και εξάρτηση από τις προηγούμενες τιμές τους καθώς και από άλλες μεταβλητές. Πολλές ανθρώπινες διεργασίες και οικολογικές εξελίξεις ελέγχονται από τις κλιματικές συνθήκες, ενώ αρκετές προσπάθειες έχουν αφιερωθεί για την πρόβλεψη του κλίματος. Φυσικά όρια εμποδίζουν τη μεγάλης διάρκειας πρόγνωση του κλίματος αλλά στατιστικές εκτιμήσεις του κλίματος είναι πιθανές. Η γνώση αυτή επιτρέπει τη χρησιμοποίηση των κλιματικών στοχαστικών μοντέλων για την ανάπτυξη και την παραγωγή κλιματικών δεδομένων (Jones et al., 1970; Richardson, 1981; Larsen and Pense, 1982; Wgen, Richardson and Wright, 1984; Shu Geng et al., 1985; Wxgen, Richardson and Nicks, 1990; USClimate, Hanson et al., 1994; GEM, Johnson et al., 1996; MTCLIM, Thorton et al., 1997; Parlange and Katz, 2000; ClimGen, Stockle et al., 2001).

Τα παραγόμενα μετεωρολογικά δεδομένα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την προσομοίωση διαφόρων βιοφυσικών μοντέλων, μοντέλων ανάπτυξης καλλιεργειών καθώς και για την αποτίμηση του ρίσκου στη διαχείριση του κλίματος θερμοκηπιακών μονάδων. Τα κλιματικά μοντέλα επιτρέπουν την ταξινόμηση των διαφόρων κλιμάτων, τη δημιουργία κλιματικών δεδομένων τα οποία δεν προέρχονται από μελέτη των επιδράσεων που προκαλούνται από τις αλλαγές του κλίματος (Wilks 1992).

Τα μοντέλα πρόγνωσης των κλιματικών δεδομένων που έχουν αναπτυχθεί (Danuso and Della Mea, 1994) περιγράφουν τις ημερήσιες τιμές των βροχοπτώσεων, (Prec, mm/d) την ελάχιστη (T_{min} , °C) και τη μέγιστη θερμοκρασία του αέρα (T_{max} , °C), την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία (R_{gExt} , MJ m⁻² d⁻¹), τις απαιτήσεις εξατμισοδιαπνοής της ατμόσφαιρας (E_{Tr} , mm d⁻¹) και τέλος την ταχύτητα του ανέμου (u , m sec⁻¹).

Σκοπός της εργασίας αυτής ήταν η βαθμονόμηση και επιβεβαίωση γεννήτριας παραγωγής εξωτερικών κλιματικών δεδομένων με απώτερο στόχο τη χρησιμοποίησή της, σε ήδη ανεπτυγμένο βιοφυσικό προσομοίωμα για τον καθορισμό στρατηγικών διαχείρισης του κλίματος στο εσωτερικό θερμοκηπιακών μονάδων.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1. Η ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΚΛΙΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Η θερμοκρασία του αέρα στον περιβάλλον χώρο ($T_a(h)$), υπολογίζεται σε ωριαία βάση και δίνεται από την παρακάτω εξίσωση (Choisnel, 1986):

$$T_a(h) = T_{a\min} + Kt(h) \cdot (T_{a\max} - T_{a\min}) \quad (1)$$

όπου: $Kt(h)$ ο συντελεστής υπεύθυνος για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας, μεταβάλλεται ανάλογα με την ώρα και την εποχή, $T_{a\max}$ η μέγιστη τιμή της θερμοκρασίας του αέρα στον περιβάλλον χώρο κατά τη διάρκεια της ημέρας (°K), $T_{a\min}$ η ελάχιστη τιμή της θερμοκρασίας του αέρα στον περιβάλλον χώρο κατά τη διάρκεια της ημέρας (°K).

Η σχετική υγρασία του αέρα στον περιβάλλον χώρο ($R(h)$), υπολογίζεται σε ωριαία βάση και δίνεται από την παρακάτω εξίσωση (Choisnel, 1986):

$$R(h) = Rh_{\min} + Kr(h) \cdot (Rh_{\max} - Rh_{\min}) \quad (2)$$

όπου: $Kr(h)$ ο συντελεστής υπεύθυνος για τον υπολογισμό της σχετικής υγρασίας, μεταβάλλεται ανάλογα με την ώρα και την εποχή, $Rh_{\max}$ η μέγιστη τιμή της σχετικής υγρασίας του αέρα στον περιβάλλον χώρο κατά τη διάρκεια της ημέρας, $Rh_{\min}$ η ελάχιστη τιμή της σχετικής υγρασίας του αέρα στον περιβάλλον χώρο κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Η ταχύτητα $V(h)$ του αέρα σε ωριαία βάση μπορεί να υπολογιστεί με τον ίδιο τρόπο που ακολουθήθηκε για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας του αέρα (Choisnel, 1986):

$$V(h) = V_{\min} + Kt(h) \cdot (V_{\max} - V_{\min}) \quad (3)$$

όπου: $V_{\max}$ και $V_{\min}$ είναι αντίστοιχα η μέγιστη και ελάχιστη τιμή της ταχύτητας του αέρα που υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη τη μέγιστη και ελάχιστη τιμή της θερμοκρασίας του αέρα σύμφωνα με τις εξισώσεις (Choisnel, 1986):

$$V_{\max} = 2V_{ave} \times \left(\frac{T_{\max}}{T_{\max} + T_{\min}} \right) \quad (4)$$

$$V_{\min} = 2V_{ave} \times \left(\frac{T_{\min}}{T_{\max} + T_{\min}} \right) \quad (5)$$

όπου: V_{ave} είναι η μέση τιμή της ταχύτητας του αέρα κατά τη διάρκεια της ημέρας (ms^{-1})

Η ολική ακτινοβολία ανάλογα σε ωριαία βάση μπορεί να υπολογιστεί από τη μέγιστη τιμή της ακτινοβολίας σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση (Choisnel, 1986):

$$Rg(h) = Rg_{\max} \times \sin\left(\frac{h_s \pi}{D_d}\right) \quad (6)$$

όπου: $Rg_{\max}$ η μέγιστη τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας στον περιβάλλον χώρο κατά τη διάρκεια της ημέρας W m^{-2} , h_s οι ώρες από την έναρξη της ημέρας, D_d οι ώρες διάρκειας της ημέρας, δίνεται από (Choisnel, 1986):

$$D_d = t_c - t_l \quad (7)$$

όπου: t_c και t_l είναι αντίστοιχα η ώρα ανατολής και δύσης του ηλίου

$$t_l = (w_l + \pi) \cdot \frac{86400}{2\pi} \quad (8)$$

$$t_c = (w_c + \pi) \cdot \frac{86400}{2\pi} \quad (9)$$

Οι γωνίες πρόσπτωσης της ακτινοβολίας w_l , w_c υπολογίζονται από:

$$w_l = -|ar \cos(-\tan \Phi \cdot \tan \delta)| \quad (10)$$

$$w_c = |ar \cos(-\tan \Phi \cdot \tan \delta)| \quad (11)$$

όπου: Φ το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής, δ η γωνία διακύμανσης του ήλιου, διαφοροποιείται κατά τη διάρκεια του έτους σύμφωνα με τις εξισώσεις:

$$\begin{aligned} \delta = & 0.006918 - 0.399912 \cos \Gamma + 0.070257 \sin \Gamma - 0.06758 \cos 2\Gamma \\ & + 0.000907 \sin 2\Gamma - 0.002697 \cos 3\Gamma + 0.00148 \sin 3\Gamma \end{aligned} \quad (12)$$

$$\Gamma = \frac{2\pi}{n} \cdot (d_n - 1) \quad (13)$$

όπου: n είναι ο αριθμός των ημερών του έτους και d_n ο αριθμός της ημέρας του έτους.

2.2 ΚΛΙΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Η υλοποίηση της γεννήτριας βασίστηκε σε γλώσσα οντοκεντρικού προγραμματισμού υψηλού επιπέδου 4^{ης} γενιάς, C++. Τα πειράματα βαθμονόμησής της, πραγματοποιήθηκαν στο αγρόκτημα του Βελεστίνου στις εγκαταστάσεις του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας από την 1^η Οκτωβρίου 2005 έως την 1^η Απρίλη 2006, ενώ της επιβεβαίωσης από την 1^η Οκτωβρίου 2007 έως την 25^η Φεβρουαρίου 2008. Για την πρόβλεψη των μέγιστων και ελαχίστων τιμών χρησιμοποιήθηκαν οι εβδομαδιαίες προγνώσεις από web-site (<http://www.meteo.gr>). Οι κλιματικοί παράμετροι που καταγράφονταν στον περιβάλλον χώρο του θερμοκηπίου παρουσιάζονται παρακάτω:

✗ Η θερμοκρασία ($T_o, ^\circ\text{C}$) και το έλλειμμα κορεσμού του αέρα (D_o, kPa) με αεριζόμενο ψυχρόμετρο τύπου Assman (τύπος VPI, Delta-T Devices, Cambridge, UK). Το ψυχρόμετρο μετρούσε τις θερμοκρασίες ξηρού και υγρού θερμομέτρου από τις οποίες υπολογίζεται το έλλειμμα κορεσμού του αέρα.

✗ Η ηλιακή ακτινοβολία (RG_o, Wm^{-2}) με πυρανόμετρο (CM-6B, Kipp and Zonen, Delft, The Netherlands).

✗ Η ταχύτητα του αέρα ($u, \text{m s}^{-1}$) με ανεμόμετρο κυπέλλων (τύπος AN1-UM-3, Delta-T Devices, Cambridge, UK).

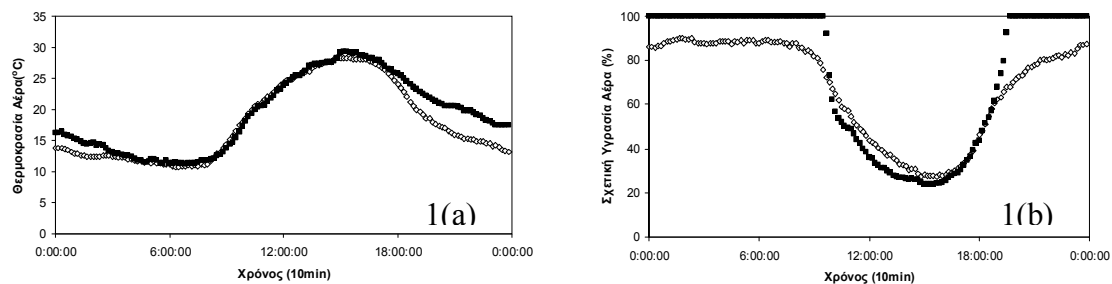
Για την συλλογή, την αρχική επεξεργασία και την καταγραφή των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε σύστημα συλλογής και καταγραφής δεδομένων (DL 3000, Delta-T Devices, Cambridge, UK). Οι μετρήσεις λαμβάνονταν κάθε 30 δευτερόλεπτα (30s) και καταγράφονταν η μέση τιμή τους κάθε 10 λεπτά (10min).

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ

Η διακύμανση των μετρημένων και υπολογισμένων τιμών της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας του αέρα, στις 10 Οκτωβρίου 2005 παρουσιάζεται στα Σχήματα 1(a) και 1(b). Η τάση της καμπύλης για τις υπολογισμένες τιμές είναι παρόμοια με αυτή των μετρημένων τιμών τόσο για τη θερμοκρασία του αέρα, όσο και για τη σχετική υγρασία. Η κλίση των μετρημένων και υπολογισμένων τιμών για τη θερμοκρασία του αέρα συμφωνεί, ενώ μικρή διαφορά παρατηρείται κατά την περίοδο μεταξύ της 18:00 και 24:00. Αντίστοιχα για τη σχετική υγρασία του αέρα παρατηρείται μια διαφοροποίηση στα ανώτερα σημεία μεταξύ των υπολογισμένων και των μετρημένων τιμών, κάτι που οφείλεται στη μέγιστη τιμή πρόγνωσης που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης για τη συγκεκριμένη περίοδο.

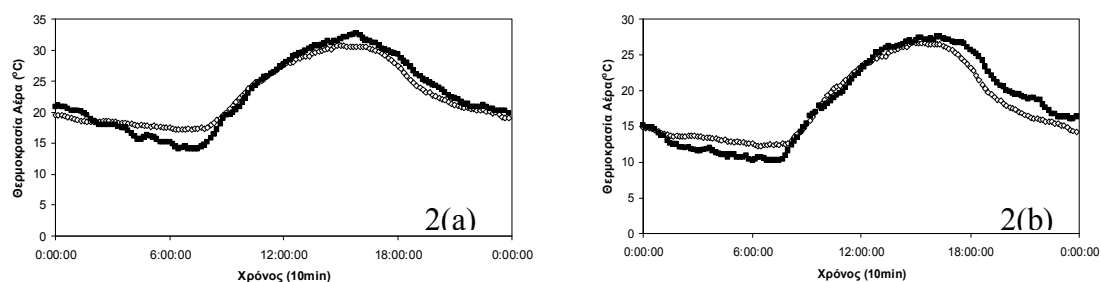
Η εκτίμηση της γεννήτριας παραγωγής κλιματικών δεδομένων θεωρείται αρκετά ακριβής για τις υπολογισμένες τιμές. Ο βαθμός συσχέτισης μεταξύ των μετρημένων και υπολογισμένων τιμών προσδιορίστηκε στο 91 και 83% για τις τιμές της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας του αέρα αντίστοιχα. Οι μικρές αποκλίσεις που παρατηρήθηκαν κυρίως στον υπολογισμό της σχετικής υγρασίας του αέρα οφείλονται, στη μεταβολή των κλιματικών δεδομένων σε σχέση με το έτος αναφοράς από όπου προέκυψαν οι τιμές των συντελεστών καθώς και στις μέγιστες και ελάχιστες τιμές που χρησιμοποιήθηκαν από το web-site για την τροφοδότηση του προσομοιωτή.



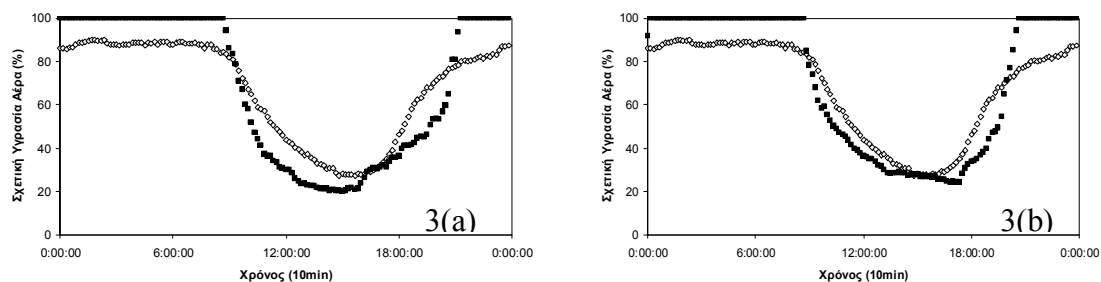
Σχήμα 1. Διακύμανση των μετρημένων $\blacksquare$ και υπολογισμένων $\diamond$ τιμών της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας του αέρα σύμφωνα με τη γεννήτρια κλιματικών δεδομένων στις 10 Οκτωβρίου 2005.

3.2. ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗΣ

Τα αποτελέσματα της επιβεβαίωσης της γεννήτριας παραγωγής κλιματικών δεδομένων για τη θερμοκρασία και τη σχετική υγρασία του αέρα, για δύο τυχαίες πειραματικές ημέρες απεικονίζονται στα Σχήματα 2 (a-b) και 3 (a-b). Για την θερμοκρασία του αέρα παρατηρήθηκε ότι η αλλαγή της κλίσης που ακολουθεί η πορεία αύξησης και μείωσής της, τόσο στις μετρημένες όσο και στις υπολογισμένες τιμές πραγματοποιείται στο ίδιο χρονικό διάστημα. Αντίστοιχα για την σχετική υγρασία του αέρα παρουσιάζονται κάποιες διαφοροποιήσεις τόσο στη μέγιστη τιμή όπως παρατηρήθηκε και στα αποτελέσματα βαθμονόμησης της γεννήτριας.



Σχήμα 2. Διακύμανση των μετρημένων $\blacksquare$ και υπολογισμένων $\diamond$ τιμών της θερμοκρασίας του αέρα σύμφωνα με τη γεννήτρια κλιματικών δεδομένων για τις περιόδους: α). 1 Οκτωβρίου 2007, β). 10 Φεβρουαρίου 2008.

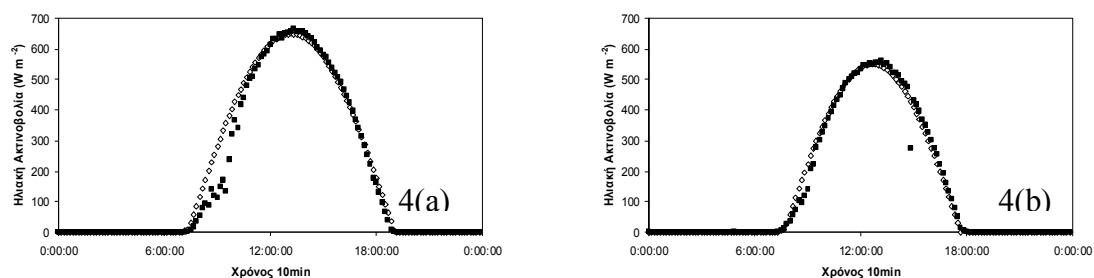


Σχήμα 3. Διακύμανση των μετρημένων $\blacksquare$ και υπολογισμένων $\diamond$ τιμών της σχετικής υγρασίας του αέρα σύμφωνα με τη γεννήτρια κλιματικών δεδομένων για τις περιόδους: α). 1 Οκτωβρίου 2007, β). 10 Φεβρουαρίου 2008.

Ο βαθμός συσχέτισης για τη θερμοκρασία του αέρα κυμάνθηκε από 90% έως 93% και αποδεικνύει τη μικρή απόκλιση που παρουσιάζουν οι υπολογισμένες από τις μετρημένες τιμές. Ο βαθμός συσχέτισης αντίστοιχα για τη σχετική υγρασία του αέρα κυμάνθηκε από 79% έως 86%. Οι αποκλίσεις που παρουσιάζονται στις υπολογισμένες τιμές

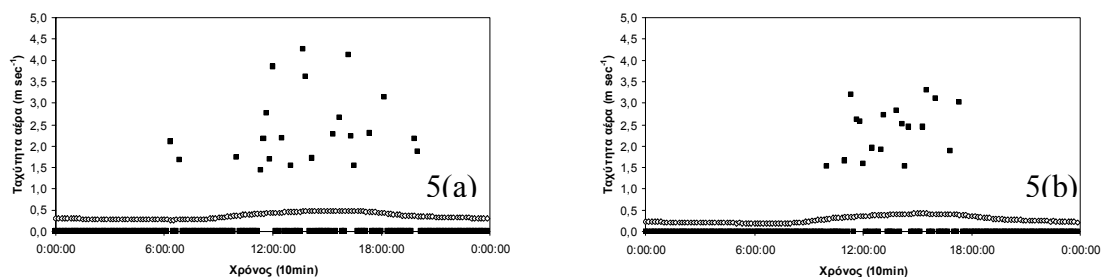
του κλίματος οφείλονται, στο πειραματικό σφάλμα που εμπεριέχει ο στατιστικός προσδιορισμός των συντελεστών $Kt(h)$ και $Kr(h)$ καθώς προέρχεται από κλιματικά δεδομένα ενός έτους, ενώ πραγματοποιήθηκε με χρήση πραγματικών τιμών για τη μέγιστη, ελάχιστη και στιγμιαία τιμή τόσο της θερμοκρασίας όσο και σχετικής υγρασίας του αέρα. Ταυτόχρονα το σφάλμα οφείλεται και στην ακρίβεια των μέγιστων και ελάχιστων τιμών πρόγνωσης του web-site που χρησιμοποιήθηκε ως βάση από την γεννήτρια για την τροφοδότηση του μοντέλου κατά τη διαδικασία της προσομοίωσης.

Στα Σχήματα 4(a-b) απεικονίζεται η διακύμανση των μετρημένων και υπολογισμένων τιμών για την εξωτερική ηλιακή ακτινοβολία. Παρατηρήθηκε ότι η κλίση της καμπύλης για όλες τις πειραματικές ημέρες είναι παρόμοια τόσο στις μετρημένες όσο και στις υπολογισμένες τιμές. Διαφορές στην κλίση παρουσιάζονται ανάμεσα στις παραγόμενες και τις μετρημένες τιμές για κάποια χρονικά διαστήματα όπου υπήρξε νεφοσκεπής ουρανός με συνέπεια την αυξομειώση των τιμών της ηλιακής ακτινοβολίας. Ο βαθμός συσχέτισής τους κυμάνθηκε από 94% έως 98% και αυτό αποδεικνύει τη μικρή απόκλιση που παρουσιάζουν οι υπολογισμένες από τις μετρημένες τιμές και επιβεβαιώνει τη λειτουργία της γεννήτριας παραγωγής κλιματικών δεδομένων, ως εργαλείο χρήσιμο για την πρόβλεψη των κλιματικών συνθηκών για ορισμένη χρονική διάρκεια.



Σχήμα 4. Διακύμανση των μετρημένων $\blacksquare$ και υπολογισμένων $\blacklozenge$ τιμών της ηλιακής ακτινοβολίας σύμφωνα με τη γεννήτρια κλιματικών δεδομένων για τις περιόδους: α). 1 Οκτωβρίου 2007, β). 10 Φεβρουαρίου 2008.

Στα Σχήματα 5(a-b) απεικονίζεται η διακύμανση των μετρημένων και υπολογισμένων τιμών για την εξωτερική ταχύτητα του αέρα. Παρατηρήθηκε ότι οι προσομοιωμένες τιμές για τις πειραματικές ημέρες, παρουσιάζουν μια κλίση κατά την ημερήσια διακύμανσή τους κάτι που δεν συμφωνεί με τις πραγματικές τιμές στις οποίες παρατηρούνται κύρια μηδενικές τιμές και μια άναρχη διασπορά τιμών όταν εμφανίζεται το φαινόμενο.



Σχήμα 5. Διακύμανση των μετρημένων $\blacksquare$ και υπολογισμένων $\blacklozenge$ τιμών της ταχύτητας του αέρα σύμφωνα με τη γεννήτρια κλιματικών δεδομένων για τις περιόδους: α). 1 Οκτωβρίου 2007, β). 10 Φεβρουαρίου 2008.

Η διαφορά οφείλεται στο τρόπο υπολογισμού της ταχύτητας του αέρα, όπου η

γεννήτρια στηρίζει τον τρόπο υπολογισμού της, σε μεγάλο βαθμό στις μέγιστες και ελάχιστες ημερήσιες τιμές της θερμοκρασίας καθώς και στη μέση τιμή της ταχύτητας του αέρα. Άμεση συνέπεια της επίδραση των θερμοκρασιών είναι η κλίση της καμπύλης, ενώ η μέση τιμή της ταχύτητας του αέρα συμβάλλει στον υπολογισμό της ελάχιστης τιμής. Η διαφορά για το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα των ημερών που προσομοιώθηκαν θεωρείται αμελητέα, καθώς η πραγματική τιμή της ταχύτητας του αέρα ήταν σχεδόν μηδενική ενώ οι τιμές που προέκυψαν από την γεννήτρια δεν ήταν μεγαλύτερες από 0.35 m sec^{-1} .

4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Η σύγκριση μεταξύ των υπολογισμένων τιμών και των πειραματικών δεδομένων για την θερμοκρασία και την σχετική υγρασία του αέρα καθώς και την ηλιακή ακτινοβολία απέδειξε, την υψηλή αξιοπιστία και καταλληλότητα της γεννήτριας. Τα αποτελέσματα έδειξαν συμφωνία για τις περισσότερες από τις πειραματικές ημέρες που χρησιμοποιήθηκαν κατά την προσομοίωση. Οι διαφορές που παρουσιάστηκαν στον υπολογισμό της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας του αέρα οφείλονται στο πειραματικό σφάλμα που εμπεριέχει ο στατιστικός προσδιορισμός των συντελεστών $Kt(h)$ και $Kr(h)$ καθώς προέρχονται από κλιματικά δεδομένα ενός έτους. Ταυτόχρονα η μη ακρίβεια στην πρόγνωση των μέγιστων και ελάχιστων τιμών από το web-site που χρησιμοποιήθηκαν ως βάση από την γεννήτρια για την τροφοδότηση του μοντέλου κατά τη διαδικασία της προσομοίωσης, οδηγεί σε διαφοροποίηση των μετρημένων από τις υπολογισμένες τιμές.

Στην περίπτωση υπολογισμού της ηλιακής ακτινοβολίας παρατηρήθηκε ότι η γεννήτρια προσφέρει ακρίβεια στην διακύμανση των τιμών, εκτός των περιπτώσεων νεφοσκεπούς ουρανού όπου οι πραγματικές τιμές διαφοροποιούνται ανάλογα με την περίοδο εμφάνισης του νέφους πάνω από τον αισθητήρα καταγραφής. Αντίθετα στην περίπτωση υπολογισμού της ταχύτητας του αέρα η γεννήτρια δεν προσφέρει την ίδια ακρίβεια στις παραγόμενες τιμές. Η επίδραση των θερμοκρασιών στην κλίση της καμπύλης και της μέσης τιμής της ταχύτητας του αέρα στον υπολογισμό της ελάχιστης τιμής οδηγούν τα αποτελέσματα της γεννήτριας σε διαφοροποίηση σε σχέση με τις πραγματικές τιμές. Η διαφοροποίηση για την περιοχή αναφοράς (Αγρόκτημα Πανεπιστημίου Θεσσαλίας περιοχή Βελεστίνου) αφορά ένα μικρό κομμάτι της ημέρας κατά τη διάρκεια του οποίου εμφανίζονται υψηλές τιμές για την ταχύτητα του αέρα, κάτι που ασφαλώς δεν προκαλεί μεγάλο σφάλμα, καθώς στο μεγαλύτερο μέρος της ημέρας υπάρχει μικρή διαφοροποίηση των πραγματικών από τις υπολογισμένες τιμές.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η απουσία γεννήτριας προσαρμοσμένης στις ανάγκες των χωρών της Μεσογείου αποτέλεσε την ανάγκη για τη βαθμονόμηση και επιβεβαίωση της Γαλλικής γεννήτριας. Η βαθμονόμηση και η επιβεβαίωση πραγματοποιήθηκε με κλιματικά δεδομένα της περιοχής του Βελεστίνου, περιοχής που αποτελεί αντιπροσωπευτικό δείγμα του κλίματος που επικρατεί κατά τη διάρκεια του χειμώνα στις περισσότερες περιοχές γύρω από τη Μεσογειακή λεκάνη.

Η ακρίβεια που προσφέρει η γεννήτρια παραγωγής κλιματικών δεδομένων οδηγεί στο συμπέρασμα ότι τα παραγόμενα μετεωρολογικά δεδομένα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την μελέτη σεναρίων από βιο-φυσικούς προσομοιωτές καθώς και για μοντέλα ανάπτυξης και αποτίμησης του ρίσκου ανάλογα με τις κλιματικές συνθήκες. Ταυτόχρονα η αναπτυγμένη γεννήτρια δύναται να χρησιμοποιηθεί στην διαδικασία της βελτιστοποίησης καθώς δύναται να παρέχει τιμές για τα απαραίτητα κλιματικά δεδομένα ανάλογα με το βάθος πρόγνωσης που θα δοθεί από κάποιο web-site.

Ευχαριστίες

Το έργο συγχρηματοδοτείται

- 75% της Δημόσιας Δαπάνης από την Ευρωπαϊκή Ένωση-Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο
 - 25% της Δημόσιας Δαπάνης από το Ελληνικό Δημόσιο-Υπουργείο Ανάπτυξης-Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας
 - και κατά 10% από τον ιδιωτικό τομέα (ΑΓΡΕΚ Κ. ΣΑΜΑΝΤΟΥΡΟΣ Α.Ε.).
- στο πλαίσιο του Μέτρου 8.3 του Ε.Π. Ανταγωνιστικότητα – Γ' Κ.Π.Σ.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Choisnel, E., 1986. *Aspects topoclimatiques: une methode d'etude*. Communication presente au Seminaire «Agrometeorologie de moyenne montagne», Toulouse, INRA, 16-17 Avril 1986.
- Danuso, F., Della Mea, V., 1994. *Development and evaluation of a stochastic model for the generation of weather data*. III ESA Congress, Abano, Italy, 18-22 September.
- Hanson, C.L., Cumming, K.A., Woolhiser, D.A., Richardson, C.W., 1994. *Microcomputer program for daily weather simulation*. US Dept. Agric., Agricultural Research, Svc. Pub. No. ARS-114: 38 pp.
- Johnson, G.L., Hanson, C.L., Hardegree, S.P., Ballard, E.B., 1996. *Stochastic weather simulation: Overview and analysis of two commonly used models*. Journal of Applied Meteorology, 35: 1878-1896.
- Jones, J.W., Colwick, R.F., Threadgill, E.D., 1970. *A simulated environmental model of temperature, evaporation, rainfall and soil moisture*. ASAE Paper n. 70-404.
- Larsen, G.A., Pense, R.B., 1982. *Stochastic simulation of daily climatic data for agronomic models*. Agronomy Journal, 74: 510-514.
- Parlange, M.B., Katz, R.W., 2000. *An extended version of the Richardson model for simulating daily weather variables*. Journal of Applied Meteorology, 39: 610-622.
- Richardson, C.W., Nicks, A.D., 1990. *Weather generator descriptor*. In: EPIC - Erosion Productivity Impact Calculator. 1. Model documentation. USDA, Tec. Bull. 1768, Temple, TX.
- Richardson, C.W., Wright, D.A., 1984. *WGEN: a model for generating daily weather variables*. US Dept. Agric., Agric. Res. Svc. Pub. No. ARS-8: 83 pp.
- Richardson, C.W., 1981. *Stochastic simulation of daily precipitation, temperature and solar radiation*. Water Resources Research, 17: 182-190.
- Shu Geng, Penning de Vries, F.W.T., Supit, I., 1985. *Analysis and simulation of weather variables*. Part II: temperature and solar radiation. Simulation Reports CABOTT n. 5.
- Stöckle, C.O., Nelson, R.L., Donatelli, M., Castellvi, F., 2001. *ClimGen: a flexible weather generation program*. Proceedings of 2nd International Symposium on Modelling Cropping Systems, 229-230. Florence, Italy, 16-18 July.
- Thornton, P.E., Running, S.W., White M.A., 1997. *Generating surfaces of daily meteorological variables over large regions of complex terrain*. Journal of Hydrology, 190: 214-251.
- Wilks, D.S., 1992. *Adapting stochastic weather generation algorithms for climate change studies*. Climate Change, 22: 67-84.

ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ

Χ. Ράπτη¹, Χ. Ευαγγελίδης² και Γ. Αραμπατζής³

^{1,2}Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή,
Α.Π.Θ., 54124, Θεσσαλονίκη,

³Ινστιτούτο Εγγείων Βελτιώσεων, ΕΘ.Ι.ΑΓ.Ε., 54700, Σίνδος

E-mails: ²evan@vergina.eng.auth.gr, ³arampgeo@gmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής των καλλιεργειών χρησιμοποιούνται συνήθως πολύπλοκες εξισώσεις, που απαιτούν τη χρήση πολλών μετεωρολογικών παραμέτρων, όπως η μέθοδος Penman-Monteith κατά FAO-56, η οποία έχει αξιολογηθεί ως η πλέον ακριβής. Συχνά όμως δεν υπάρχουν όλοι οι μετεωρολογικοί παράμετροι, αλλά η αναγκαιότητα υπολογισμού των αναγκών των καλλιεργειών σε νερό, οδηγεί στη χρήση απλούστερων μεθόδων, όπως του Hargreaves κ.α., οι οποίες χρειάζονται λιγότερες παραμέτρους. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται ημερήσια μετεωρολογικά δεδομένα από την περιοχή Νιγρίτας του Νομού Σερρών για τον υπολογισμό της βασικής εξατμισοδιαπνοής με τη μέθοδο Penman-Monteith κατά FAO-56 αλλά και με μεθόδους, οι οποίες χρησιμοποιούν τις ίδιες ή λιγότερες μετεωρολογικές παραμέτρους, όπως του Blaney – Criddle, του Hargreaves, του Turc και του Thornthwaite.

Λέξεις κλειδιά: εξατμισοδιαπνοή, μετεωρολογικές παράμετροι, περιοχή Νιγρίτας.

COMPARATIVE EVALUATION OF CALCULATING METHODS FOR REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION

Ch. Rapti¹, Ch. Evangelides² and G. Arampatzis³

^{1,2}Faculty of Rural & Surveying Engineering, School of Technology,
A.U.Th., 54124, Thessaloniki

³Land Reclamation Institute, NAGREF, 57400, Sindos

E-mails: ²evan@vergina.eng.auth.gr, ³arampgeo@gmail.com

ABSTRACT

The estimation of evapotranspiration usually requires complicated equations with many meteorological parameters. One of the most acceptable methods is Penman-Monteith FAO-56, which is also considered to be the most accurate one. In many cases though there are not enough meteorological parameters, but the need of calculation of crop water requirements leads to simpler methods such as Hargreaves e.t.c. In this paper daily meteorological data from the area of Nigrita at Serres prefecture is utilized for the calculation of reference evapotranspiration with Penman-Monteith FAO-56 method and also with equal or less data demanding methods, such as Blaney – Criddle, Hargreaves, Turc and Thornthwaite.

Key words: evapotranspiration, meteorological parameters, Nigrita area.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο υπολογισμός της βασικής εξατμισοδιαπνοής (ET₀) των καλλιεργειών είναι προϋπόθεση για τον ορθολογικό προγραμματισμό των αρδεύσεων και τη βελτιστοποίηση της γεωργικής παραγωγής. Οι περισσότερες από τις σύγχρονες μεθόδους, που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής μιας συγκεκριμένης καλλιέργειας, περιλαμβάνουν δύο μέρη. Το πρώτο περιλαμβάνει την εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής μιας καλά αρδευόμενης καλλιέργειας με σταθερά χαρακτηριστικά φυτοκόμης που αναφέρεται σαν "βασική εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας" (ET₀) (Doorenbos & Pruitt, 1977; Jensen et al., 1990; Allen et al., 1998). Το δεύτερο μέρος περιλαμβάνει τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας που μας ενδιαφέρει και η οποία αναφέρεται σαν "πραγματική εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας" (ET_c). Η ET_c προκύπτει με πολλαπλασιασμό της ET₀ επί ένα "φυτικό συντελεστή" (K_c), που είναι χαρακτηριστικός για κάθε καλλιέργεια (Doorenbos & Pruitt, 1977; Jensen et al., 1990; Allen et al., 1998; Παπαζαφειρίου, 1999; Πανώρας κ.α., 2001). Ο φυτικός συντελεστής δεν είναι σταθερός, αλλά μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της βλαστικής περιόδου. Από τις χρησιμοποιούμενες σήμερα μεθόδους υπολογισμού της βασικής εξατμισοδιαπνοής οι σύνθετες που χρησιμοποιούν πλήθος μετεωρολογικών παραμέτρων θεωρούνται οι πλέον ακριβείς (Penman, 1956; Doorenbos & Pruitt, 1977; Jensen et al., 1990; Allen et al., 1998). Από αυτές, η τροποποιημένη μέθοδος των Penman-Monteith κατά FAO56 (Allen et al., 1998) έχει αξιολογηθεί ως η πλέον αξιόπιστη για πλήθος περιοχών του κόσμου. Επιπρόσθετα, οι υπολογισμένες τιμές της μεθόδου έχουν θεωρηθεί ιδιαίτερα ακριβείς για περιοχές του Ελλαδικού χώρου (Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη κ.α., 1996; Γεωργίου κ.α., 2000; Αλεξίου κ.α., 2000).

Το πρόβλημα, που συχνά συναντάται στον υπολογισμό των αναγκών σε νερό των καλλιεργειών, είναι η έλλειψη των αναγκαίων μετεωρολογικών παραμέτρων. Αυτό οδηγεί στη χρήση μεθόδων, οι οποίες απαιτούν λιγότερες παραμέτρους.

Η μέθοδος των Blaney-Criddle (1950) στην αρχική της μορφή αναφέρονταν στον υπολογισμό της εποχιακής εξατμισοδιαπνοής των καλλιεργειών, με τη βασική παραδοχή ότι αυτή άμεσα διαμορφώνεται από το άθροισμα των γινομένων των μέσων μηνιαίων θερμοκρασιών και των μέσων μηνιαίων ποσοστών των ωρών ημέρας του έτους, για μια δυναμικά αναπτυσσόμενη καλλιέργεια υπό συνθήκες επαρκούς εδαφικής υγρασίας. Η μέθοδος αυτή τροποποιήθηκε (Doorenbos & Pruitt, 1977) για να έχει ευρύτερη και πιο αξιόπιστη εφαρμογή και περιέλαβε και άλλες μετεωρολογικές παραμέτρους εκτός από τη θερμοκρασία. Παρόλα αυτά η αξιοπιστία της δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλη (Jensen et al., 1990). Στην Ελλάδα η τροποποιημένη μέθοδος Blaney-Criddle έχει θεσμοθετηθεί ως μια από τις εγκεκριμένες μεθόδους εκτίμησης των υδατικών αναγκών των καλλιεργειών με κατάλληλη τροποποίηση των φυτικών συντελεστών (Πανώρας κ.α., 2001). Ως μέθοδος θερμοκρασίας παραμένει εμπειρική και απαιτεί τοπική βαθμονόμηση προκειμένου να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Μια άλλη μέθοδος, που χρησιμοποιεί τιμές μέσης, μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας του αέρα είναι του Hargreaves (Hargreaves et al., 1985). Η μέθοδος αυτή θεωρείται αρκετά αξιόπιστη (Hargreaves and Allen, 2003).

Ο Ture (1961) παρουσίασε έναν εμπειρικό τύπο για την εκτίμηση της βασικής εξατμισοδιαπνοής στηριζόμενος στην επίδραση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στην επιφάνεια της γης. Η μέθοδος παρουσιάζει καλά αποτελέσματα στα υγρά κλίματα, αλλά η απόδοση στα ξηρά είναι ακανόνιστη.

Η εμπειρική μέθοδος του Thornthwaite (1948) έχει χρησιμοποιηθεί στην πράξη περισσότερο από κάθε άλλη, διεθνώς και στην Ελλάδα, λόγω των ελαχίστων απαιτήσεων της σε δεδομένα εισόδου (μόνο μέση θερμοκρασία) και της παλαιότητάς της. Παρόλα αυτά τα αποτελέσματα που δίνει δεν είναι ικανοποιητικά.

Στην παρούσα εργασία υπολογίζεται η βασική εξατμισοδιαπνοή με τις μεθόδους Penman-Monteith κατά FAO56 (Allen et al., 1998), Blaney-Criddle (Doorenbos & Pruitt, 1977), Hargreaves (Hargreaves et al., 1985), Turc (1961) και Thornthwaite (1948). Τα μετεωρολογικά στοιχεία, που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της, είναι από το μετεωρολογικό σταθμό που βρίσκεται στο αντλιοστάσιο A11 στην περιοχή της Νιγρίτας του Νομού Σερρών για τις περιόδους Ιούνιο – Σεπτέμβριο του 2007 και του 2008. Στη συνέχεια υπολογίζεται το σχετικό μέσο τετραγωνικό σφάλμα (R.M.S.E.) μεταξύ των μεθόδων. Αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα δίνει η μέθοδος Hargreaves, η οποία απαιτεί ελάχιστα δεδομένα εισόδου.

2. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΒΑΣΙΚΗΣ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ

Η τροποποιημένη μέθοδος των Penman-Monteith κατά FAO-56 (Allen et al., 1998) εκφράζεται από τη σχέση:

$$ET_{oPM} = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (1)$$

όπου ET_o η βασική εξατμισοδιαπνοή [$\text{mm} \cdot \text{day}^{-1}$], R_n η καθαρή ακτινοβολία στην επιφάνεια της καλλιέργειας [$\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$], G η ροή της θερμικής ενέργειας στο έδαφος [$\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$], T μέση ημερήσια θερμοκρασία αέρα σε ύψος 2m [$^{\circ}\text{C}$], u_2 η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 2m [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$], e_s η πίεση κορεσμού υδρατμών [kPa], e_a η πραγματική πίεση κορεσμού υδρατμών [kPa], $e_s - e_a$ το έλλειμμα πίεσης κορεσμού υδρατμών [kPa], Δ η κλίση της γραμμής πίεσης κορεσμού υδρατμών [$\text{kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$] και γ η ψυχομετρική σταθερά [$\text{kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$].

Η σχέση της τροποποιημένης μεθόδου των Blaney-Criddle (Doorenbos & Pruitt, 1977) δίνεται από τη σχέση:

$$ET_{oBC} = a + bF \quad (2)$$

όπου ET_o είναι η βασική εξατμισοδιαπνοή [$\text{mm} \cdot \text{day}^{-1}$], a δίνεται από τη σχέση $a = 0,0043 (\text{RHmin}) - (n/N) - 1,41$, RHmin είναι η μέση % ελάχιστη ημερήσια σχετική υγρασία του αέρα, n/N είναι η μέση ηλιοφάνεια (n είναι η πραγματική και N είναι η θεωρητική ηλιοφάνεια, η οποία δίνεται από πίνακες), b δίνεται από πίνακες σαν συνάρτηση των RHmin , n/N και της ταχύτητας ανέμου 2m πάνω από την επιφάνεια του εδάφους [m/sec], F δίνεται από τη σχέση $F = (0,46 T + 8,13) p$, T είναι η μέση ημερήσια θερμοκρασία της ατμόσφαιρας [$^{\circ}\text{C}$] και p είναι το ποσοστό ωρών ημέρας του 24ώρου ως προς τις ώρες ημέρας του έτους και δίνεται από πίνακες σαν συνάρτηση του γεωγραφικού πλάτους.

Η μέθοδος Hargreaves (Hargreaves et al., 1985) συχνά αποτελεί την επιλεγόμενη μέθοδο, λόγω της περιορισμένης διαθεσιμότητας των μετεωρολογικών δεδομένων που απαιτούνται και δίνεται ως:

$$ET_{oHa} = 0,0023 R_a (T_{\text{mean}} + 17,8)(T_{\text{max}} - T_{\text{min}})^{0,5} \quad (3)$$

όπου ET_o η βασική εξατμισοδιαπνοή [$\text{mm} \cdot \text{day}^{-1}$], T_{mean} , T_{max} , T_{min} η μέση, μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία του αέρα σε ύψος 2m [$^{\circ}\text{C}$] αντίστοιχα και R_a η εξωγήινη ακτινοβολία [mm/d] που δίνεται από πίνακες.

Η μέθοδος Turc είναι μία από τις απλούστερες εμπειρικές εξισώσεις, που χρησι-

μπορούνται για την εκτίμηση της ET_o . Ο Turc (1961) παρουσίασε έναν εμπειρικό τύπο για την εκτίμηση της βασικής εξατμισοδιαπνοής στηριζόμενος στην επίδραση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στην επιφάνεια της γης και δίνεται από τη σχέση:

$$ET_{oTu} = (R_s + 50) \times \frac{0,0013T}{15 + T} \quad (4)$$

όπου ET_o είναι η βασική εξατμισοδιαπνοή [$\text{mm} \cdot \text{day}^{-1}$], $R_s = R_a(0,20 + 0,53I)$ είναι η προσπίπτουσα ακτινοβολία στην επιφάνεια της γης, R_a είναι η εξωγήινη ακτινοβολία [$\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$], $I = \frac{n}{N}$ είναι η σχετική ηλιοφάνεια και T είναι η θερμοκρασία αέρα σε ύψος 2m [$^{\circ}\text{C}$].

Η εμπειρική μέθοδος του Thornthwaite (1948) βασίζεται μόνο στην εκτίμηση της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας και χωρίς να λαμβάνει υπόψη την υγρασία, την κάλυψη της γης και άλλους παράγοντες και εκφράζεται ως:

$$ET_{oTw} = 16L_d \left[\frac{10T}{I} \right]^a \quad (5)$$

όπου ET_o είναι η βασική εξατμισοδιαπνοή [$\text{mm}/\text{μήνα}$], L_d είναι ο λόγος της μέσης διάρκειας της ημέρας κάθε μήνα προς ημέρα διάρκειας 12 ωρών, T είναι η μέση μηνιαία θερμοκρασία αέρα σε ύψος 2m [$^{\circ}\text{C}$] και I είναι ένας ετήσιος δείκτης θερμότητας που υπολογίζεται με τη σχέση:

$$I = \sum_{j=1}^{12} i_j = \sum_{j=1}^{12} \left[\frac{T_j}{5} \right]^{1,514} \quad (6)$$

όπου T_j είναι η μέση θερμοκρασία του αέρα κάθε μήνα και i_j είναι οι αντίστοιχοι μηνιαίοι δείκτες θερμότητας. Ο εκθέτης a υπολογίζεται με τη σχέση:

$$a = 0,000000675(I)^3 - 0,0000771(I)^2 + 0,01792(I) + 0,49239 \quad (7)$$

Η μέθοδος του Thornthwaite δίνει τιμές της βασικής εξατμισοδιαπνοής, που αναφέρονται σε 12ωρη διάρκεια ημέρας και διάρκεια μηνός ίση με 30 ημέρες. Είναι η πλέον απλή ως προς την υπολογιστική διαδικασία μέθοδος αν και τείνει να ξεπεραστεί.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στο Ν. Σερρών στην περιοχή Νιγρίτας στο αντλιοστάσιο A11 εγκαταστάθηκε τον Ιούνιο του 2007 ένας τηλεμετρικός μετεωρολογικός σταθμός από τη Διεύθυνση Υδάτων της Περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας. Τα μετεωρολογικά στοιχεία τα οποία καταγράφονται είναι: το ύψος και η διάρκεια βροχής, η ελάχιστη, μέγιστη και μέση θερμοκρασία, η ελάχιστη, μέγιστη και μέση σχετική υγρασία, η ταχύτητα ανέμου στα δύο μέτρα, η διεύθυνση ανέμου και η ηλιοφάνεια.

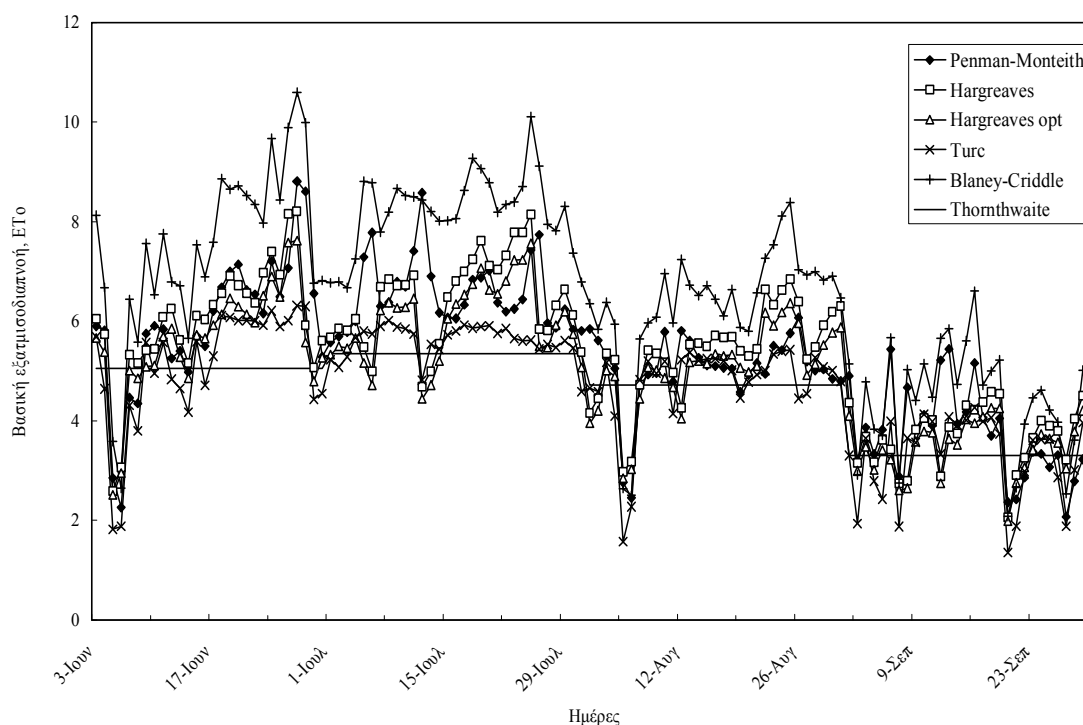
Με βάση τα εξερχόμενα μετεωρολογικά στοιχεία του σταθμού για τις περιόδους Ιούνιο – Σεπτέμβριο του 2007 και του 2008 υπολογίζεται η βασική εξατμισοδιαπνοή με τις μεθόδους Penman-Monteith κατά FAO-56 (Allen et al., 1998), Blaney-Criddle (Doorenbos & Pruitt, 1977), Hargreaves (Hargreaves et al., 1985), Turc (1961) και

Thornthwaite (1948). Στα Σχήματα 1 και 2 παρουσιάζονται οι ημερήσιες τιμές της βασικής εξατμισοδιαπνοής για τις μεθόδους αυτές και για τα έτη 2007 και 2008 αντίστοιχα. Στη συνέχεια υπολογίζεται το σχετικό μέσο τετραγωνικό σφάλμα (R.M.S.E.) μεταξύ των μεθόδων και τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 1.

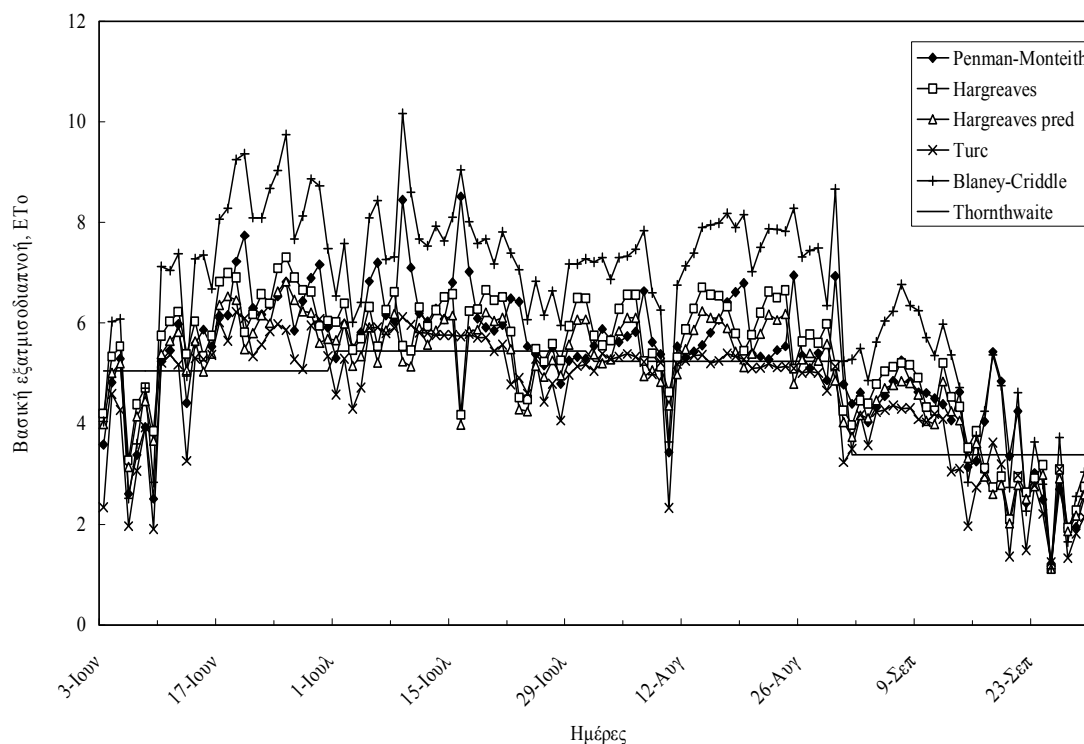
Παρατηρήθηκε ότι εάν η εξ. (3) (μέθοδος Hargreaves) εκφραστεί με την ακόλουθη μορφή:

$$ET_{oHaopt} = 0,0023R_a (T_{mean} + 17,8)(T_{max} - T_{min})^m \quad (8)$$

όπου m είναι ένας εκθέτης, ο οποίος προκύπτει από βελτιστοποίηση του σχετικού μέσου τετραγωνικού σφάλματος σε σχέση με τις τιμές του Penman-Monteith, τότε η ακρίβεια της μεθόδου Hargreaves βελτιώνεται. Ο εκθέτης εκτιμήθηκε με βάση τα δεδομένα του έτους 2007, ενώ για το έτος 2008 χρησιμοποιήθηκε ο ίδιος για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής. Για την συγκεκριμένη περιοχή και για τις εξεταζόμενες περιόδους ο εκθέτης m εκτιμήθηκε ότι είναι 0,475. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα Σχήματα 1 και 2 και στον Πίνακα 1.



Σχήμα 1. Ημερήσιες τιμές βασικής εξατμισοδιαπνοής για το έτος 2007.



Σχήμα 2. Ημερήσιες τιμές βασικής εξατμισοδιαπνοής για το έτος 2008.

Πίνακας 1. Σχετικό μέσο τετραγωνικό σφάλμα (R.M.S.E.) μεταξύ των μεθόδων Penman-Monteith (PM), Hargreaves (Ha), Hargreaves optimized (Ha_{opt}), Blaney-Criddle (BC), Turc (Tu) και Thornthwaite (Tw).

	PM	Ha	Ha _{opt}	BC	Tu
2007					
PM					
Ha	0,0325				
Ha _{opt}	0,0273	-			
BC	0,0754	0,0924	0,063		
Tu	0,0277	0,032	0,0387	0,0855	
Tw	0,0669	0,0531	0,0401	0,1254	0,1442
2008					
PM					
Ha	0,0287				
Ha _{opt}	0,026	-			
BC	0,0687	0,0979	0,0654		
Tu	0,0292	0,0367	0,0526	0,0906	
Tw	0,0887	0,0764	0,0385	0,1534	0,1805

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στη διαχείριση του αρδευτικού νερού είναι γνωστό ότι η εκτίμηση της βασικής εξατμισοδιαπνοής είναι μείζον σημασίας, αφού όλοι οι υπολογισμοί των αρδευτικών αναγκών βασίζονται στην εκτίμηση αυτής της παραμέτρου. Επίσης, έχει αποδειχθεί από πλήθος εργασιών ότι η μέθοδος Penman-Monteith κατά FAO-56 για την εκτίμηση της ETo υπερέχει των άλλων μεθόδων, ειδικά σε κλιματικές συνθήκες που προσομοιάζουν με αυτές της χώρας μας (Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη κ.α., 1996; Γεωργίου κ.α., 2000; Αλεξίου κ.α., 2000).

Παρ' όλα αυτά στην εργασία αυτή έγινε συγκριτική αξιολόγηση των εκτιμώμενων τιμών της βασικής εξατμισοδιαπνοής με τη μέθοδο των Penman-Monteith κατά FAO-56 με τέσσερις άλλες μεθόδους, που βασίζονται στις ίδιες ή λιγότερες μετεωρολογικές παραμέτρους.

Τα αποτελέσματα της μεθόδου Blaney-Criddle έδειξαν μια υπερεκτίμηση της βασικής εξατμισοδιαπνοής.

Τα αποτελέσματα της μεθόδου Turc, που αποτελεί μια απλή εμπειρική μέθοδο ακτινοβολίας, υποεκτιμούν την βασική εξατμισοδιαπνοή. Παρόλα αυτά το σχετικό μέσο τετραγωνικό σφάλμα της μεθόδου με τη μέθοδο του Penman-Monteith είναι αρκετά ικανοποιητικό.

Η μέθοδος Hargreaves, η οποία θέλει μόνο στοιχεία θερμοκρασίας, έδωσε αρκετά ικανοποιητικό σχετικό μέσο τετραγωνικό σφάλμα. Μάλιστα εάν σαν εκθέτης χρησιμοποιηθεί η τιμή 0,475 δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα.

Η σύγκριση αυτή έδειξε ότι στην περιοχή, που είναι εγκατεστημένος ο σταθμός, δηλαδή στην περιοχή Νιγρίτας, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος του Hargreaves με αρκετά ικανοποιητική ακρίβεια και η οποία χρησιμοποιεί τα λιγότερα στοιχεία εισόδου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Αλεξίου, Ι., Κωτσόπουλος, Σ. Ι., Καλφούντζος, Δ. και Βύρλας, Π., 2000. *Εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής μέσω συναρτήσεων διαθεσιμότητας της εδαφικής υγρασίας*. Πρακτικά 8^{ου} Πανελλήνιου Συνεδρίου ΕΥΕ, Αθήνα, 493 – 500.
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D. and Smith, M., 1998. *Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, FAO, Rome, 300 pp.
- 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, 48 pp.
- Γεωργίου, Π., Παπαμιχαήλ, Δ. και Παπαζαφειρίου, Ζ., 2000. *Συγκριτική αξιολόγηση των μεθόδων Penman και Penman-Monteith με τη βοήθεια εκτιμήσεων εξατμισοδιαπνοής αναφοράς στην Ελλάδα*. Πρακτικά 5^{ου} Πανελλήνιου Συνεδρίου Μετεωρολογίας – Κλιματολογίας – Φυσικής της Ατμόσφαιρας, Θεσσαλονίκη, 395-402.
- Doorenbos, J. and Pruitt, W.O., 1977. *Guidelines for predicting crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 24, FAO, Rome, 144 pp.
- Hargreaves, G.L., Hargreaves, G.H. and Riley, J.P., 1985. *Irrigation water requirements for Senegal River Basin*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 111(3): 265-275.
- Hargreaves, G.H. and Allen, R.G., 2003. *History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 129(1): 53-63.
- Jensen, M.E., Burman, R.D. and Allen, R.G. (eds), 1990. *Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements*. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practices No 70, ASCE, New York, 360 pp.
- Παπαζαφειρίου, Ζ., 1999. *Οι ανάγκες σε νερό των καλλιεργειών*. Εκδόσεις ΖΗΤΗ, 347 σελ.
- Πανώρας, Α., Παπαζαφειρίου, Ε. και Πουλτσίδου, Θ., 2001. *Υπολογισμός φυτικών συντελεστών για έξι μεθόδους εξατμισοδιαπνοής στο νότιο τμήμα της πεδιάδας Θεσσαλονίκης*. Αγροτική Έρευνα, 24 (1): 37-45.
- Penman, H.L., 1956. *Evapotranspiration: An introductory survey*. Netherland Journal of Agricultural Science, 4: 9-29.

- Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, Μ., Πανώρας, Α., Μαυρουδής, Ι. και Πογιαρίδης, Θ., 1996. *Χάρτες κατανομής μέσης ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής αναφοράς και βροχόπτωσης στους νομούς Καρδίτσας και Τρικάλων*. Πρακτικά διεθνούς Επιστημονικού Συνεδρίου με θέμα Διαχείριση Υδατικών Πόρων, Λάρισα 13-16 Νοεμβρίου, 1: 232-243.
- Thornthwaite, C.W., 1948. *An approach toward a rational classification of climate*. Geographical Review, 38: 54-94.
- Turc, L., 1961. *Evaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle, formule climatique simplifiée et mise a jour*. Annual Agronomy, 12: 13-49.

ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΜΕΘΟΔΩΝ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ ΣΤΙΣ ΒΑΣΙΚΕΣ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΦΛΩΡΙΝΑΣ

Β.Θ. Άμπας^{*}, Ε.Α. Μπαλτάς, Δ.Μ. Παπαμιχαήλ και Π.Ε. Γεωργίου
Τομέας Εγγείων Βελτιώσεων, Εδαφολογίας και Γεωργικής Μηχανικής, Γεωπονική
Σχολή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τ.Κ. 54124, Θεσ/νίκη
^{*}E-mail: ambasv@gmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η επίδραση των μετεωρολογικών μεταβλητών στην εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς με τη μέθοδο FAO Penman-Monteith και την τροποποιημένη μέθοδο Blaney - Cridle διερευνάται με ανάλυση ευαισθησίας. Χρησιμοποιείται ένας αδιάστατος συντελεστής ευαισθησίας που υπολογίζει τη μερική παράγωγο της εξατμισοδιαπνοής ως προς τις μετεωρολογικές μεταβλητές και την τυπική απόκλιση των μετεωρολογικών μεταβλητών. Εξετάζονται η θερμοκρασία, η ηλιακή ακτινοβολία ή η διάρκεια ηλιοφάνειας, η ταχύτητα του ανέμου και η σχετική υγρασία από τον ΑΜΣ στο Αμύνταιο του Ν. Φλώρινας. Οι συντελεστές ευαισθησίας υπολογίζονται για το έτος, την αρδευτική περίοδο και κάθε μήνα. Η επίδραση των μεταβλητών στην υπολογισμένη εξατμισοδιαπνοή αναφοράς δεν είναι ίδια για κάθε εξεταζόμενη περίοδο, ενώ διαφέρει και στις δύο μεθόδους υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής.

Λέξεις κλειδιά: ανάλυση ευαισθησίας, εξατμισοδιαπνοή αναφοράς.

SENSITIVITY ANALYSIS OF REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION METHODS WITH RESPECT TO KEY METEOROLOGICAL PARAMETERS IN FLORINA REGION

V.Th. Ampas^{*}, E.A. Baltas, D.M. Papamichail and P.E. Georgiou
Department of Hydraulics, Soil Science and Agricultural Engineering, Faculty of
Agriculture, Aristotle University of Thessaloniki, 54124, Thessaloniki
email: ambasv@gmail.com

ABSTRACT

Investigation of the influence of the meteorological variables on the estimation of the reference evapotranspiration with the FAO Penman-Monteith and the Blaney-Cridle methods needs sensitivity analysis. In this paper a dimensionless sensitivity coefficient based on the partial derivative of the evapotranspiration to the meteorological variables and the standard deviation of the meteorological variables was used. The meteorological variables that had been examined were temperature, solar radiation or sunshine duration, wind speed and relative humidity from an automatic meteorological station in Amynteo, Florina. The sensitivity coefficients were calculated for each month, the year and the irrigation period. The influence of the meteorological variables on the estimated reference evapotranspiration differs for each examined time period and for both methods.

Key words: sensitivity analysis, reference evapotranspiration.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η κατανόηση ενός μαθηματικού μοντέλου προϋποθέτει την κατανόηση της φυσικής σημασίας των μεταβλητών που συμμετέχουν σ' αυτό, καθώς και τη διερεύνηση της σχετικής επίδρασής τους στη διαμόρφωση της εξαρτημένης μεταβλητής που προσομοιώνει το μοντέλο. Τα παραπάνω απαιτούν ανάλυση ευαισθησίας. Εξ ορισμού, η ανάλυση ευαισθησίας διερευνά την επίδραση της αλλαγής μιας μεταβλητής σε κάποια άλλη (McCuen, 1973).

Ο υπολογισμός της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς (ET_o) είναι μια σύνθετη διαδικασία που απαιτεί ένα πλήθος μετεωρολογικών μεταβλητών. Διάφορες μέθοδοι υπολογισμού της ET_o έχουν αναπτυχθεί που μας επιτρέπουν την εκτίμηση των αναγκών των καλλιεργειών σε νερό. Η γνώση της υδατοκατανάλωσης των καλλιεργειών οδηγεί στη σωστή διαστασιολόγηση των αρδευτικών έργων και στην ορθολογική χρήση του αρδευτικού νερού. Η μέθοδος που προτείνεται από την επιτροπή εμπειρογνομόνων του FAO για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς ET_o είναι η μέθοδος των FAO Penman-Monteith (Allen et al., 1998; Παπαζαφειρίου, 1999; Γεωργίου κ.α., 2000; Ampas et al., 2007; Γεωργίου και Παπαμιχαήλ, 2008). Ευρέως χρησιμοποιούμενη είναι και η μέθοδος Blaney - Criddle όπως τροποποιήθηκε από τους Doorenbos and Pruitt (1977). Στην εργασία αυτή η ανάλυση ευαισθησίας αναφέρεται στη διερεύνηση της επίδρασης της αλλαγής των βασικών μετεωρολογικών μεταβλητών στη διαμόρφωση της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς (ET_o) που εκτιμάται με τη μέθοδο FAO Penman-Monteith και την τροποποιημένη μέθοδο Blaney – Criddle.

Αναλύσεις ευαισθησίας σε υδρολογικά μοντέλα και μοντέλα εξατμισοδιαπνοής έγιναν από διάφορους ερευνητές (McCuen, 1973; Saxton, 1975; Coleman and DeCoursey, 1976; Beven, 1979; Μπαμπατζιμόπουλος κ.α., 1992; Gong et al., 2006; Irmak et al., 2006; Άμπας κ.α. 2009). Κατά την ανάλυση ευαισθησίας υπολογίζονται οι συντελεστές ευαισθησίας οι οποίοι μπορούν να συγκριθούν μεταξύ τους και να δείξουν τη σχετική σπουδαιότητα και την τυχόν διακύμανση που παρουσιάζουν. Τέτοιοι συντελεστές ευαισθησίας έχουν δοθεί σχεδόν απ' όλους τους παραπάνω ερευνητές.

Αναλύσεις ευαισθησίας της ET_o πρέπει να γίνονται κάθε φορά που γίνεται υπολογισμός της σε διαφορετικές περιοχές, γιατί η ET_o εξαρτάται από ένα πλήθος μεταβλητών οι οποίες είναι χαρακτηριστικές κάθε περιοχής. Επομένως, οι συντελεστές ευαισθησίας της ET_o επηρεάζονται από το σύνολο των μετεωρολογικών μεταβλητών που επικρατούν σε κάθε περιοχή και δεν είναι ίδιοι για όλες τις περιοχές. Ο Irmak (2006), για διαφορετικές κλιματικές συνθήκες, προσπάθησε να κάνει χωρική κατανομή των συντελεστών ευαισθησίας.

Όσον αφορά τη σημαντικότητα των μετεωρολογικών μεταβλητών στον υπολογισμό της ET_o , ο Saxton (1975) βρήκε ότι η πιο σημαντική παράμετρος, κατά τη θερινή περίοδο, είναι η ηλιακή ακτινοβολία, ενώ για την άνοιξη και το φθινόπωρο βρέθηκε ότι το έλλειμμα υγρασίας της ατμόσφαιρας είναι η πιο σημαντική παράμετρος. Οι Coleman and DeCoursey (1976) βρήκαν ότι η πιο σημαντική παράμετρος στο σύνολο του έτους είναι η σχετική υγρασία, τη θερινή περίοδο τη μεγαλύτερη επίδραση έχει η θερμοκρασία και η ηλιακή ακτινοβολία και τη χειμερινή περίοδο η σχετική υγρασία, ενώ τέλος η επίδραση της ταχύτητας του ανέμου είναι μικρή καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Οι Μπαμπατζιμόπουλος κ.α. (1992) βρήκαν ότι κατά τη θερινή περίοδο μεγαλύτερη επίδραση έχει η θερμοκρασία και η ηλιακή ακτινοβολία ενώ κατά τη χειμερινή περίοδο η σχετική υγρασία, ενώ αντίθετα η επίδραση της ταχύτητας του ανέμου είναι μικρή καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Οι Gong et al. (2006) προσπαθώντας να χωροθετήσουν τους συντελεστές ευαισθησίας της υδρολογικής λεκάνης του ποταμού Yangtze διερεύνησαν τη σημαντικότητα των μετεωρολογικών μεταβλητών της σχετικής υγρασίας, της ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας και της ταχύτητας του ανέμου.

Τέλος, οι Irmak et al. (2006) υπολόγισαν συντελεστές ευαισθησίας για περιοχές με διαφορετικά κλιματικά χαρακτηριστικά και διαπίστωσαν σημαντικές διαφοροποιήσεις. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι υπήρξε τοποθεσία με ξηρούς και ισχυρούς ανέμους (Scottsbluff and Bushland) που ως σημαντικότερη μεταβλητή βρέθηκε η ταχύτητα του ανέμου.

Οι συντελεστές ευαισθησίας που μέχρι σήμερα έχουν προταθεί χρησιμοποιούν τη μερική παράγωγο της εξατμισοδιαπνοής ως προς τις μετεωρολογικές μεταβλητές. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται ο συντελεστής ευαισθησίας που πρότειναν οι Άμπας κ.α. (2009), ο οποίος χρησιμοποιεί επιπρόσθετα και την τυπική απόκλιση. Οι συντελεστές ευαισθησίας υπολογίζονται για δύο μεθόδους εξατμισοδιαπνοής, τη μέθοδο FAO Penman - Monteith και τη μέθοδο Blaney - Criddle ως προς τις βασικές κλιματικές παραμέτρους. Τα δεδομένα προέρχονται από τον αυτόματο μετεωρολογικό σταθμό του Αμυνταίου του Ν. Φλώρινας. Οι συντελεστές ευαισθησίας διερευνήθηκαν για το σύνολο του έτους, για την αρδευτική περίοδο, αλλά και για κάθε μήνα ξεχωριστά. Από τα αποτελέσματα προκύπτει η σχετική σπουδαιότητα των διάφορων μετεωρολογικών μεταβλητών στον υπολογισμό της ET_o .

2. ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ

2.1. ΜΕΘΟΔΟΣ FAO PENMAN – MONTEITH

Με βάση τον ορισμό της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς (ET_o), η εξίσωση που προτάθηκε από τους Allen et al. (1998) για να την περιγράψει αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως εξίσωση FAO Penman-Monteith. Για 24-ωρους υπολογισμούς της ET_o , από ημερήσια δεδομένα, έχει τη μορφή (Allen et al., 1998):

$$ET_o = \frac{0.408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T + 273} \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0.34 \cdot u_2)}, \text{ (mm/day)} \quad (1)$$

όπου:

ET_o = εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (mm d^{-1}), Δ = κλίση της καμπύλης στη σχέση πίεσης κορεσμού υδρατμών και θερμοκρασίας ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), e_s = πίεση κορεσμού υδρατμών (kPa), e_a = πραγματική πίεση υδρατμών της ατμόσφαιρας (kPa), R_n = καθαρή ακτινοβολία ($\text{MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$), G = ροή θερμότητας από το έδαφος ($\text{MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$), u_2 = μέση ταχύτητα ανέμου σε ύψος 2m (m s^{-1}), γ = ψυχομετρική σταθερά ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$)

2.2. Η ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΣ BLANEY - CRIDDLE

Οι Doorenbos and Pruitt (1977) τροποποίησαν την αρχική εξίσωση των Blaney - Criddle και έδωσαν μία νέα εξίσωση για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας αναφοράς. Η μέθοδος βασίζεται στη γραμμική σχέση που παρατηρήθηκε μεταξύ μετρημένων τιμών της ET_o και του παράγοντα f της μεθόδου Blaney - Criddle σε διάφορες πειραματικές θέσεις σε πολλά μέρη της γης. Η εξατμισοδιαπνοή υπολογίζεται από τη σχέση:

$$ET_o = a + bf \quad (2)$$

όπου:

$$f = (0.46T + 8.13)p \quad (3)$$

a είναι παράγοντας που δίνεται από τη σχέση :

$$a = 0.0043RH_{\min} - \frac{n}{N} - 1.41 \quad (4)$$

b = παράγοντας που δίνεται από πίνακες και εξαρτάται από την ελάχιστη σχετική υγρασία, τη σχετική ηλιοφάνεια και την ταχύτητα του ανέμου. Μπορεί να υπολογισθεί από τη σχέση των Frevert et al. (1983) ή των Allen and Pruitt (1991) ή των Αμπα κ.α. (2007), T = ημερήσια θερμοκρασία (°C), U_d = ταχύτητα ανέμου σε m s⁻¹, RH_{min} = η ελάχιστη σχετική υγρασία (%), n = πραγματική ηλιοφάνεια σε ώρες (hr), N = θεωρητική ηλιοφάνεια σε ώρες (hr), n/N = σχετική ηλιοφάνεια, p = το ποσοστό των ωρών της ημέρας στο σύνολο των ωρών του έτους, δίνεται από πίνακες ή από τη σχέση:

$$p = \frac{100N}{365 * 12} \quad (5)$$

3. ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΚΑΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ

Η ανάλυση ευαισθησίας διερευνά την επίδραση της αλλαγής μιας μεταβλητής σε κάποια άλλη (McCuen, 1973). Η μεταβολή της υπολογιζόμενης εξατμισοδιαπνοής ως προς τη μεταβολή μιας μετεωρολογικής μεταβλητής, όταν αυτή τείνει στο μηδέν, δίνεται από τη μερική παράγωγο της εξατμισοδιαπνοής ως προς τη μεταβλητή αυτή. Για να μπορούν να συγκριθούν οι μεταβολές της εξατμισοδιαπνοής που προκαλούνται από τις διάφορες μεταβλητές θα πρέπει να έχουν τις ίδιες μονάδες. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση κατάλληλων παραμέτρων ώστε να αδιαστοποιηθεί η υπολογιζόμενη μεταβολή. Οι αδιάστατες τιμές που προκύπτουν ορίζονται ως συντελεστές ευαισθησίας.

Για την εξατμισοδιαπνοή έχουν αναπτυχθεί διάφοροι συντελεστές ευαισθησίας ανάλογα με το σκοπό της ανάλυσης (Gong et al, 2006). Ο Saxton (1975) υπολογίζοντας τις μερικές παραγώγους της εξατμισοδιαπνοής ως προς κάθε μια από τις μετεωρολογικές μεταβλητές, έδωσε αδιάστατους συντελεστές ευαισθησίας, που δίνονται από τη σχέση:

$$K_p = \frac{\partial ET}{\partial p} \frac{p}{ET} \quad (6)$$

όπου p η υπό εξέταση ανεξάρτητη μεταβλητή ή παράμετρος.

Ο συντελεστής αυτός δείχνει την ποσοστιαία μεταβολή που προκαλεί στην εξατμισοδιαπνοή μία ποσοστιαία μεταβολή της μεταβλητής. Ο υπολογισμός της μερικής παραγώγου της εξατμισοδιαπνοής ως προς κάποια υπό εξέταση μεταβλητή, δεν εξαλείφει τις υπόλοιπες μεταβλητές, αλλά εξαρτάται από τις τιμές που παίρνουν αυτές. Οι περισσότερες μεταβλητές παρουσιάζουν εποχική διακύμανση, οπότε και οι συντελεστές ευαισθησίας αναμένεται να παρουσιάζουν εποχική διακύμανση.

Η εξ. (6) επηρεάζεται από το μέγεθος της εξατμισοδιαπνοής και των μεταβλητών. Έτσι ο συντελεστής ευαισθησίας αυτός, δεν είναι επαρκής δείκτης της σημαντικότητας, εάν η τιμή της εξατμισοδιαπνοής ή οι τιμές των μεταβλητών τείνουν στο μηδέν ή όταν το εύρος τιμών μιας μεταβλητής είναι μικρό, συγκρινόμενο με την τιμή της μεταβλητής (Beven, 1979).

Οι Coleman and DeCoursey (1976), θέλοντας να δώσουν ένα συντελεστή με μεγαλύτερη φυσική έννοια χρησιμοποίησαν το εύρος διακύμανσης της ανεξάρτητης μεταβλητής, οπότε οι αδιάστατοι συντελεστές ευαισθησίας δίνονται από τη σχέση:

$$K_p = \frac{\partial ET}{\partial p} \frac{p - p_{\min}}{ET} \quad (7)$$

όπου p_{min} η ελάχιστη παρατηρημένη τιμή της υπό εξέταση μεταβλητής και τα άλλα

όπως ορίστηκαν προηγούμενα.

Οι Μπαμπατζιμόπουλος κ.α. (1992) για να υπολογίσουν την επίδραση των μετεωρολογικών μεταβλητών στην εξατμισοδιαπνοή προκάλεσαν μεταβολές 10%, 20% και 30% στις τιμές των μετεωρολογικών μεταβλητών και έλεγξαν τις υπολογισμένες τιμές της εξατμισοδιαπνοής.

Οι Άμπας κ.α. (2009) πρότειναν ο συντελεστής ευαισθησίας να υπολογίζεται από τη σχέση:

$$K_p = \frac{\partial ET}{\partial p} \frac{\sigma_p}{ET} \quad (8)$$

όπου σ_p η τυπική απόκλιση της μετεωρολογικής μεταβλητής.

Στη σχέση αυτή έχει χρησιμοποιηθεί η τυπική απόκλιση της ανεξάρτητης μεταβλητής αντί του εύρους διακύμανσης, γιατί η τυπική απόκλιση αντιπροσωπεύει το σύνολο των παρατηρημένων τιμών της μεταβλητής και όχι μόνο μία τιμή (την ακραία) που επηρεάζεται από το μέγεθος της χρονοσειράς των δεδομένων.

4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ - ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των συντελεστών ευαισθησίας προέρχονται από τον αυτόματο μετεωρολογικό σταθμό του Αμυνταίου στο Ν. Φλώρινας, ο οποίος βρίσκεται σε γεωγραφικό πλάτος 40°41,78' και σε απόλυτο υψόμετρο 579.48μ. Οι μετεωρολογικές μεταβλητές καταγράφονται ανά ώρα. Χρησιμοποιούνται τα δεδομένα έξι ετών από τον Οκτώβριο του 2002 μέχρι το Σεπτέμβριο του 2008. Τα απαραίτητα για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς (ET_0) μετεωρολογικά δεδομένα είναι η μέση (T_{mean}), ελάχιστη (T_{min}) και μέγιστη (T_{max}) ημερήσια θερμοκρασία, ελάχιστη (RH_{min}) και μέγιστη (RH_{max}) σχετική υγρασία, ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 2μ. (u_2), προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία (R_s) και διάρκεια ηλιοφάνειας (n).

Οι συντελεστές ευαισθησίας υπολογίζονται για το σύνολο του έτους, για κάθε μήνα χωριστά και για την αρδευτική περίοδο (Μάιο-Σεπτέμβριο) και χρησιμοποιούνται οι μέσοι όροι των ημερήσιων τιμών των μεταβλητών. Λόγω της πολυπλοκότητας υπολογισμού της μερικής παραγωγού της εξατμισοδιαπνοής ως προς καθεμία από τις μετεωρολογικές μεταβλητές που εξετάστηκαν, ο υπολογισμός έγινε με τη χρήση πεπερασμένων διαφορών.

Επειδή οι μεταβλητές που εξετάζονται πρέπει να είναι ασυσχέτιστες (Beven, 1979) η μέση ημερήσια θερμοκρασία, η ελάχιστη ημερήσια θερμοκρασία και η μέγιστη ημερήσια θερμοκρασία αντιμετωπίζονται ενιαία καθώς είναι ισχυρά συσχετισμένες. Αντίθετα δεν υπάρχει συσχέτιση μεταξύ ελάχιστης και μέγιστης σχετικής υγρασίας.

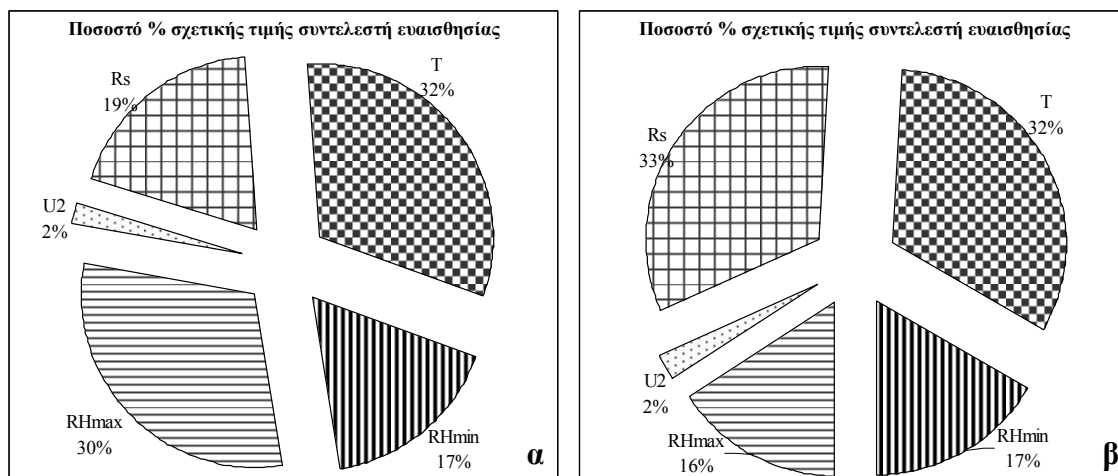
Από την εφαρμογή της εξ. (8) υπολογίζονται οι συντελεστές ευαισθησίας για τα δεδομένα του αυτόματου μετεωρολογικού σταθμού Αμυνταίου του Ν. Φλώρινας. Οι τιμές των συντελεστών ευαισθησίας χρησιμοποιώντας τη μέθοδο FAO Penman – Monteith δίνονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Τιμές των συντελεστών ευαισθησίας της σχέσης των Άμπα κ.α.(2009) για τη μέθοδο FAO Penman – Monteith ως προς τις μετεωρολογικές παραμέτρους

	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαϊ	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ	Έτος	Αρδ
RH_{min}	-5.9	-4.7	-3.1	-1.9	-1.4	-1.3	-1.1	-1.2	-2.1	-2.7	-4.1	-6.5	-2.7	-1.4
RH_{max}	-11	-7.7	-4.7	-3.2	-2.2	-1.2	-0.9	-1.0	-2.8	-5.7	-10	-14	-4.7	-1.6
U_2	0.7	0.5	0.3	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2	0.3	0.4	0.6	0.7	0.3	0.2
R_s	-0.1	0.6	1.7	3.0	3.3	2.9	2.1	1.7	2.1	1.3	0.1	-0.2	3.0	2.9
T	1.0	1.3	1.8	1.7	2.1	2.5	1.8	1.8	2.2	2.1	1.6	0.9	4.9	2.9

Στο Σχήμα 1(α) και (β) παρουσιάζεται το ποσοστό του συντελεστή ευαισθησίας

κάθε μιας μετεωρολογικής μεταβλητής επί του συνόλου των συντελεστών ευαισθησίας στη μέθοδο FAO Penman – Monteith. Από το ποσοστό αυτό προκύπτει η σημαντικότητα κάθε μεταβλητής στον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς.

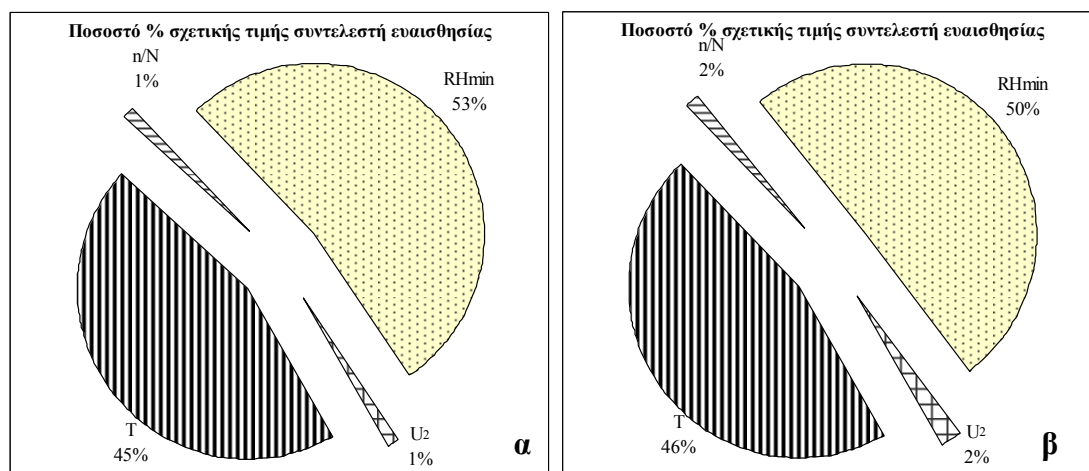


Σχήμα 1. Σχετική επίδραση των συντελεστών ευαισθησίας στη μέθοδο FAO Penman – Monteith για το σύνολο του έτους (α) και την αρδευτική περίοδο (β)

Από την εφαρμογή της εξ. (8) υπολογίζονται οι συντελεστές ευαισθησίας της εξατμισοδιαπνοής, που υπολογίζεται την τροποποιημένη μέθοδο Blaney – Criddle για τις κλιματικές παραμέτρους που χρησιμοποιούνται ($T, RH_{min}, n/N, U_2$), από τα δεδομένα του αυτόματου μετεωρολογικού σταθμού Αμυνταίου του Ν. Φλώρινας και δίνονται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2. Τιμές των συντελεστών ευαισθησίας της σχέσης των Άμπα κ.α.(2009) για την τροποποιημένη μέθοδο Blaney - Criddle ως προς τις μετεωρολογικές παραμέτρους

	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαϊ	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ	Έτος	Αρδ
T	1.8	1.6	2.2	2.1	2.2	2.6	1.9	1.8	2.4	2.6	2.6	2.7	5.8	3.0
n/N	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
RHmin	-22	-13	-6.7	-5.1	-4.3	-2.8	-2.3	-2.2	-4.6	-7.7	-13	-41	-6.8	-3.3
U_2	0.6	0.5	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.7	0.2	0.1



Σχήμα 2. Σχετική επίδραση των συντελεστών ευαισθησίας στην τροποποιημένη μέθοδο Blaney - Criddle για το σύνολο του έτους (α) και την αρδευτική περίοδο (β)

Από τις τιμές του Πίνακα 1 και του Πίνακα 2 φαίνεται ότι η σχετική υγρασία

(μέγιστη και ελάχιστη) δίνει μεγαλύτερες τιμές (κατ' απόλυτη τιμή) των συντελεστών ευαισθησίας το χειμώνα (Δεκέμβριος) και μικρότερες το καλοκαίρι (Ιούλιος – Αύγουστος). Οι τιμές του συντελεστή ευαισθησίας για τη θερμοκρασία παρουσιάζει μικρή διακύμανση κατά τη διάρκεια του έτους και στις δύο μεθόδους εξατμισοδιαπνοής.

Διερευνώντας τη σχετική επίδραση της σχετικής υγρασίας στην εξατμισοδιαπνοή, όπως φαίνεται στα Σχήματα 1 και 2, συμπεραίνεται ότι είναι ο σημαντικότερος παράγοντας είτε εξετάζεται το σύνολο του έτους είτε η αρδευτική περίοδος και για τις δύο μεθόδους εκτίμησης της εξατμισοδιαπνοής. Στην τροποποιημένη μέθοδο Blaney – Criddle η επίδραση της σχετικής υγρασίας στην εξατμισοδιαπνοή είναι πολύ μεγαλύτερη απ' ό,τι στη μέθοδο FAO Penman – Monteith.

Στην τροποποιημένη μέθοδο Blaney – Criddle η επίδραση της θερμοκρασίας στην εξατμισοδιαπνοή είναι πολύ μεγαλύτερη απ' ό,τι στη μέθοδο FAO Penman – Monteith.

Η ταχύτητα του ανέμου, όπως φαίνεται από τα Σχήματα 1 και 2, παίζει πολύ μικρό ρόλο στην εξατμισοδιαπνοή και για τις δύο μεθόδους εξατμισοδιαπνοής. Επίσης, από τους Πίνακες 1 και 2 προκύπτει ότι κατά την περίοδο του καλοκαιριού, που οι τιμές της εξατμισοδιαπνοής είναι μεγαλύτερες, η επίδραση της ταχύτητας του ανέμου γίνεται ακόμη μικρότερη.

Από το Σχήμα 1(β) φαίνεται ότι η ηλιακή ακτινοβολία επηρεάζει την εξατμισοδιαπνοή, στη μέθοδο FAO Penman – Monteith, κατά το 1/3 την αρδευτική περίοδο. Ενώ από τις τιμές του Πίνακα 1 η ηλιακή ακτινοβολία αναδεικνύεται ως ο σημαντικότερος παράγοντας της εξατμισοδιαπνοής στη μέθοδο FAO Penman – Monteith τόσο κατά την αρδευτική περίοδο όσο και τον μήνα αιχμής. Στην τροποποιημένη μέθοδο Blaney – Criddle η επίδραση της διάρκειας ηλιοφάνειας, ως ενεργειακός όρος, στην εξατμισοδιαπνοή είναι σχεδόν αμελητέα (~ 2%).

Η σύγκριση των δύο διαφορετικών μεθόδων υπολογισμού εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας αναφοράς δείχνει σημαντική διαφορά στη σχετική επίδραση των διαφόρων μετεωρολογικών παραμέτρων.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία γίνεται ανάλυση ευαισθησίας για τη διερεύνηση της επίδρασης των βασικών μετεωρολογικών μεταβλητών στη διαμόρφωση της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς (ET_0) που εκτιμάται με τη μέθοδο FAO Penman-Monteith και την τροποποιημένη μέθοδο Blaney – Criddle. Υπολογίζεται ο αδιάστατος συντελεστής ευαισθησίας που βασίζεται στη μερική παράγωγο της εξατμισοδιαπνοής ως προς τις μετεωρολογικές μεταβλητές και την τυπική απόκλιση των μετεωρολογικών μεταβλητών. Οι μετεωρολογικές μεταβλητές που εξετάζονται είναι η θερμοκρασία, η ηλιακή ακτινοβολία, η διάρκεια ηλιοφάνειας, η ταχύτητα του ανέμου και η σχετική υγρασία που μετρούνται στον αυτόματο μετεωρολογικό σταθμό του Αμυνταίου του Ν. Φλώρινας. Οι συντελεστές ευαισθησίας διερευνήθηκαν για το σύνολο του έτους, για την αρδευτική περίοδο, αλλά και για κάθε μήνα ξεχωριστά και για τις δύο μεθόδους εκτίμησης της εξατμισοδιαπνοής.

Σημαντικότερος παράγοντας για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής στο σύνολο του έτους εκτιμάται ότι είναι η σχετική υγρασία, ενώ πολύ σημαντική μεταβλητή είναι και η θερμοκρασία, και για τις δύο μεθόδους. Η ταχύτητα του ανέμου επηρεάζει ελάχιστα την εξατμισοδιαπνοή. Οι μέθοδοι υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής παρουσιάζουν μεγάλη διαφορά στην επίδραση του ενεργειακού όρου. Η ηλιακή ακτινοβολία είναι σχεδόν ισοδύναμη της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας στη μέθοδο FAO Penman-Monteith, ενώ η διάρκεια ηλιοφάνειας είναι σχεδόν αμελητέα στον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής με την τροποποιημένη μέθοδο Blaney – Criddle.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Allen, R.G. and Pruitt, W. O., 1991. *FAO-24 reference evapotranspiration factors*. J. Irrigation and Drainage Engng., ASCE117(IR5): 758-773.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M., 1998. *Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. FAO, Rome, 300 pp.
- Ampas, V., Baltas, E. and Papamichail, D., 2007. *Comparison of different methods for the estimation of the reference crop evapotranspiration in the Florina region*. WSEAS Journal, 2(12):1449-1454.
- Άμπας, Β., Μπαλτάς Ε., Παπαμιχαήλ Δ., 2007. *Νέοι συντελεστές για τον υπολογισμό των μεταβλητών της εξατμισοδιαπνοής*. Πρακτικά 5^{ου} Εθνικού Συνεδρίου Γεωργικής Μηχανικής, Λάρισα, σελ: 297-303.
- Άμπας, Β., Μπαλτάς Ε., Παπαμιχαήλ Δ. και Γεωργίου Π. 2009. *Ανάλυση ευαισθησίας της μεθόδου FAO Penman – Monteith στις βασικές μετεωρολογικές μεταβλητές στην περιοχή της Φλώρινας*. Πρακτικά κοινού συνεδρίου 11^ο ΕΥΕ και 7^ο ΕΕΔΥΠ. Βόλος
- Beven, K., 1979. *A sensitivity analysis of the penman Monteith actual evapotranspiration estimates*. J. Hydrol., 44:169-190.
- Coleman, G. and DeCoursey, G.D., 1976. *Sensitivity analysis applied to some evaporation and evapotranspiration models*. Water Resour. Res., 12(5):873-879.
- Γεωργίου, Π.Ε. και Παπαμιχαήλ, Δ.Μ., 2008. *Συγκριτική αξιολόγηση των εκτιμήσεων της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς με τη βοήθεια μετρημένων και εκτιμημένων μετεωρολογικών παραμέτρων*. Πρακτικά 9^{ου} Πανελ. Συνεδρίου Μετεωρολογίας - Κλιματολογίας - Φυσικής της Ατμόσφαιρας, Θεσσαλονίκη, σελ. 839-846.
- Γεωργίου, Π.Ε., Παπαμιχαήλ, Δ.Μ. και Παπαζαφειρίου, Ζ., 2000. *Συγκριτική αξιολόγηση των μεθόδων Penman και Penman-Monteith με τη βοήθεια εκτιμήσεων εξατμισοδιαπνοής αναφοράς στην Ελλάδα*. Πρακτικά 5^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου Μετεωρολογίας – Κλιματολογίας – Φυσικής της Ατμόσφαιρας, Θεσσαλονίκη, σελ. 395-402.
- Doorenbos, J. and Pruitt, W.O., 1977. *Crop water requirements. Guidelines for predicting crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 24, FAO, Rome, 144pp.
- Frevert, D.K., Hill R.W. and Braaten, B.C., 1983. *Estimation of FAO evapotranspiration coefficients*. J. Irrigation and Drainage Engng., ASCE109(IR2): 265-270.
- Gong, L., Xu, C., Chen, D., Haldin, S. and Chen, Y.D., 2006. *Sensitivity of the Penman-Monteith evapotranspiration to key climatic variables in the Changjiang (Yangtze River) basin*. J. Hydrol., 329:620-629.
- Irmak, S., Payero, J.O., Martin, D.L., Irmak, A. and Howell, A.T., 2006. *Sensitivity coefficients of standardized daily ASCE Penman –Monteith equation*. J. Irrigation and Drainage Engng - ASCE, 132(6):564-578.
- McCuen, H.R., 1973. *A sensitivity and error analysis of procedures used for estimating evapotranspiration*. Water Resour. Bull., 10(3):486-498.
- Μπαμπατζιμόπουλος, Χ., Αντωνόπουλος, Β., Γρηγοριάδης, Δ. και Ηλίας, Α., 1992. *Ανάλυση ευαισθησίας της μεθόδου Penman*. Πρακτικά του 5^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου της Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης (ΕΥΕ), Λάρισα, σελ. 132-140.
- Παπαζαφειρίου, Ζ., 1999. *Οι ανάγκες σε νερό των καλλιεργειών*. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, σελ. 347.
- Saxton, K.E., 1975. *Sensitivity analysis of the combination evapotranspiration equation*. Agricultural Meteorology, 15: 343-353.

ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΥΔΑΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗΣ ΔΥΟ ΠΟΙΚΙΛΙΩΝ ΗΛΙΑΝΘΟΥ ΥΠΟ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΕΛΛΕΙΜΜΑΤΙΚΗΣ ΑΡΔΕΥΣΗΣ

I. Αργυροκαστρίτης¹, Σ. Φραγκίστα¹, Χ. Βαμβακούλας¹, Θ. Δαμιανίδης¹,
Σ. Αλεξανδρή¹ και Π. Παπαστυλιανού²

¹Τομέας Διαχείρισης Υδάτινων Πόρων, Τμήμα Αξιοποίησης
Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής

²Τμήμα Φυτικής Παραγωγής

Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Ιερά Οδός 75, 11855, Αθήνα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία μελετάται ο δείκτης υδατικής καταπόνησης στις ποικιλίες Aurasol και Egea του ηλίανθου (*Helianthus annuus*), προσδιορίζοντας, κατά πρώτο λόγο τη σχέση μεταξύ της διαφοράς θερμοκρασίας φύλλου - αέρα ($T_c - T_a$) και του ελλείμματος κορεσμού (VPD) και κατά δεύτερο λόγο, τη διακύμανση του δείκτη υδατικής καταπόνησης του φυτού καθ'όλη τη διάρκεια της αρδευτικής περιόδου. Οι ποικιλίες υπόκεινται σε δύο υδατικές μεταχειρίσεις: κανονική δόση άρδευσης-μισή δόση άρδευσης. Από τα αποτελέσματα που προκύπτουν, εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα για τη μεταβολή του δείκτη υδατικής καταπόνησης, για τις ποικιλίες υβριδίων Aurasol και Egea του ηλίανθου, υπό καθεστώς ελλειμματικής άρδευσης εκτιμώντας, παράλληλα, τη συμβολή του στην αρδευόμενη γεωργία.

Λέξεις κλειδιά: δείκτης υδατικής καταπόνησης φυτού, ελλειμματική άρδευση, ηλίανθος.

CROP WATER STRESS INDEX VARIATION FOR TWO SUNFLOWER VARIETIES UNDER DEFICIT IRRIGATION CONDITIONS

I. Argyrokastritis¹, S. Fragkista¹, C. Vamvakoulas¹, T. Damianidis¹,
S. Alexandris¹ and P. Papastylianou²

¹Division of Water Resources Management, Department of Natural
Resources Development and Agricultural Engineering

²Department of Crop Science

Agricultural University of Athens, 75 Iera Odos, 11855 Athens, Greece

ABSTRACT

Aim of the study was the estimation of the crop water stress index's behavior of sunflower (*Helianthus annuus*) varieties, Aurasol and Egea, by identifying, first of all, the relationship between canopy minus air ($T_c - T_a$) temperature differences and vapor pressure deficit (VPD) and secondly, the fluctuation of crop water stress index during the irrigation application. The varieties were developed under two different treatments: fully irrigated conditions and deficit irrigated conditions. Useful results allowed assessing crop water stress index under regulated deficit irrigated conditions of sunflower varieties, Aurasol and Egea, as evaluating, at the same time, its contribution to irrigated agriculture.

Key words: Crop water stress index (CWSI), deficit irrigation, sunflower.

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή ισορροπία μεταξύ της ορθολογικής εφαρμογής νερού και αποδοτικότητας της καλλιέργειας, απαιτείται ο προγραμματισμός της άρδευσης και αποτελεσματικές μέθοδοι εφαρμογής της, οι οποίες υποδηλώνουν τότε τα φυτά υφίστανται υδατική δοκιμασία. Το υδατικό δυναμικό του φύλλου, το οποίο ορίζεται ως η θερμοδυναμική έκφραση της υδατικής κατάστασης των φύλλων (Karamanos, 2003), θεωρείται ως ένας αρκετά αξιόπιστος δείκτης της υδατικής δοκιμασίας που υφίστανται τα φυτά. Η εκτίμησή του είναι το συνδυασμένο αποτέλεσμα της αλληλεπιδράσεως μεταξύ της διαθέσιμης εδαφικής υγρασίας, του ελλείμματος κορεσμού και των αντιδράσεων των φυτών, σε συνθήκες υδατικής δοκιμασίας. Η θεωρία της υπέρυθρης θερμομετρίας και η συσχέτιση αυτής με τη θερμοκρασία του φύλλου, έχουν αποτελέσει αντικείμενο πολλών μελετών (Jackson and Idso, 1969). Οι Idso et al. (1981a) παρατήρησαν μία γραμμική σχέση μεταξύ της διαφοράς θερμοκρασίας φύλλου-αέρα ($T_c - T_a$) και του ελλείμματος κορεσμού (VPD) στα πλήρως αρδευόμενα καλλιεργούμενα φυτά, των οποίων ο ρυθμός διαπνοής είναι ο μέγιστος δυνατός σε περιόδους με ηλιοφάνεια. Καθώς το ποσοστό της εδαφικής υγρασίας μειώνεται, η σχέση ($T_c - T_a$)-(VPD) αποκλίνει από τη γραμμική σχέση που αντιπροσωπεύει την επάρκεια εδαφικής υγρασίας. Αυτό αποτελεί και τη βάση για την εκτίμηση του δείκτη υδατικής καταπόνησης φυτού (Crop Water Stress Index) (CWSI).

Ο δείκτης υδατικής καταπόνησης προσδιορίζει το στάδιο στο οποίο τα φυτά καταπονούνται υδατικά και λαμβάνει τιμές από 0 έως 1, με την τιμή 0 να αντιπροσωπεύει συνθήκες μέγιστης διαπνοής (μηδενικής υδατικής δοκιμασίας) και την τιμή 1 να αντιπροσωπεύει συνθήκες μηδενικής διαπνοής (μέγιστης υδατικής δοκιμασίας). Χρησιμοποιήθηκε, μάλιστα, από πολλούς μελετητές για τον προγραμματισμό της άρδευσης (Pinter and Reginato, 1982; Reginato, 1983; Howell et al., 1984; O'Toole et al., 1984; Reginato and Howe, 1985; Reginato and Garrot, 1987; Wanjura 1990). Ο στόχος του εν λόγω πειράματος, είναι η εκτίμηση της υδατικής δοκιμασίας που υφίστανται τα υβρίδια ηλίανθου, ποικιλίες Aurasol και Egea, όταν υπόκεινται σε δύο υδατικές μεταχειρίσεις: κανονική δόση άρδευσης - μισή δόση άρδευσης. Παρόμοια πειράματα πραγματοποιήθηκαν στην περιοχή του Λιβάνου όπου εξήχθηκαν χρήσιμα συμπεράσματα για παραμέτρους, όπως η εξατμισοδιαπνοή και η αποτελεσματικότητα χρήσης νερού (Fadi Karam et al., 2007).

2.ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου 2008, στον πειραματικό αγρό του εργαστηρίου Γεωργικής Υδραυλικής του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών. Ο πειραματικός αγρός διαχωρίστηκε σε 12 πειραματικά τεμάχια. Στα 12, αυτά, αγροτεμάχια σπάρθηκαν, στις 31 Μαΐου 2008, 2 διαφορετικές ποικιλίες υβριδίων ηλίανθου: Aurasol – Egea. Εφαρμόστηκαν 2 διαφορετικές αρδευτικές μεταχειρίσεις: κανονική δόση άρδευσης (Wet, 100% κάλυψη της εξατμισοδιαπνοής) – μισή δόση άρδευσης (Dry, 50% κάλυψη της εξατμισοδιαπνοής). Η σπορά πραγματοποιήθηκε με το χέρι. Τοποθετήθηκαν 2-3 σπόροι ανά θέση σποράς, σε απόσταση 2 cm (μεταξύ των θέσεων). Κάθε τεμάχιο περιελάμβανε 5 σειρές μήκους 5m και η ισαποχή γραμμών σποράς ήταν: 0,70 m. Μεταξύ των τεμαχίων αφέθηκαν οι απαραίτητοι διάδρομοι για οριοθετικούς και πρακτικούς λόγους. Οι διαστάσεις κάθε τεμαχίου (plot) ήταν 2,80 m επί 5 m, ενώ οι συνολικές διαστάσεις του πειραματικού αγρού ήταν 14,00 m επί 18,90 m. Η άρδευση έγινε με σύστημα σταγόνων. Στον κεντρικό αγωγό του δικτύου συνδέθηκαν 2 ηλεκτροβάννες για τη ρύθμιση της Wet και της Dry μεταχείρισης, ενώ για το δίκτυο εφαρμογής επιλέχθηκαν σταλακτηφόροι αγωγοί διαμέτρου 16 mm με αυτορυθμιζόμενους σταλακτήρες παροχής 2,3 l/h ανά 33 cm. Συνεπώς,

προέκυψαν 2 υδατικές μεταχειρίσεις για κάθε μία από τις 2 ποικιλίες: 3 πειραματικά τεμάχια Aurasol Wet, 3 πειραματικά τεμάχια Aurasol Dry, 3 πειραματικά Egea Wet και 3 πειραματικά τεμάχια Egea Dry. Το νερό, το οποίο εφαρμόστηκε καθ'όλη τη διάρκεια της αρδευτικής περιόδου ανέρχεται: για τη Wet μεταχείριση στα 339,08 mm (καθαρή δόση άρδευσης), ενώ για τη Dry μεταχείριση ήταν 171,99 mm. Μετά τη σπορά ακολούθησαν οι καλλιεργητικές φροντίδες: αραίωμα και σκάλισμα. Ο τρόπος συγκομιδής που επιλέχθηκε ήταν η χειροσυλλογή. Στις 3 κεντρικές γραμμές, στο μέσο κάθε τεμαχίου, έγινε μία ξεχωριστή συγκομιδή φυτών ανά γραμμή.

Πριν από τη σπορά έγινε δειγματοληψία εδάφους σε διαφορετικά σημεία, αντιπροσωπευτικά του εδάφους του αγρού σε βάθη 0-100 cm. Με βάση την περιεκτικότητα σε άμμο, ιλύ και αργίλου που προσδιορίστηκαν με τη μέθοδο Βιουγιούκου, το έδαφος μέχρι του βάθους των 100 cm, βρέθηκε ότι ανήκει στην κλάση των μετρίως λεπτόκοκκων εδαφών και χαρακτηρίστηκε ως αργιλοπηλώδες (CL).

Για τη μελέτη του δείκτη υδατικής καταπόνησης ήταν απαραίτητη η γνώση των εξής παραμέτρων: η πυκνότητα ροής της καθαρής ακτινοβολίας, μικρού και μεγάλου μήκους κύματος, που δέχεται τελικά η επιφάνεια του εδάφους, R_n (W/m^2), η πυκνότητα ροής της προσπίπτουσας ολικής μικρού μήκους κύματος ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στη φυτοκόμη, R_s (W/m^2), η πυκνότητα ροής της προσπίπτουσας φωτοσυνθετικά ενεργής ακτινοβολίας, PAR (W/m^2), η σχετική υγρασία (1,5m), RH (%), η ταχύτητα του ανέμου (2m), WS(m/s) και η θερμοκρασία του αέρα (1,5m), T_a ($^{\circ}C$). Για το σκοπό αυτό εγκαταστάθηκε στην περιοχή αυτόματος μετεωρολογικός σταθμός που διαθέτει τα απαραίτητα όργανα για τη μέτρηση των ανωτέρω παραμέτρων.

Προκειμένου να εκτιμηθεί η υδατική δοκιμασία που υφίστανται τα φυτά, είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός δύο ορίων: του άνω ορίου, όπου επικρατεί παντελής έλλειψη εδαφικής υγρασίας και το φυτό δεν διαπνέει (αντίσταση φυτού $r_c \rightarrow \infty$) και του κάτω ορίου, όπου θεωρητικά υπάρχει πλήρης επάρκεια εδαφικής υγρασίας ($r_c \rightarrow 0$). Το άνω όριο προσδιορίστηκε με την εξίσωση (1) (Jackson, 1982; Κερκίδης, 2003):

$$T_c - T_a = \frac{r_a \cdot R_N}{p \cdot C_p} \quad (1)$$

όπου r_a = αεροδυναμική αντίσταση στη μεταφορά υδρατμών ($sec.m^{-1}$) που προσδιορίζεται με τη σχέση των Thom and Oliver (1977), p = πυκνότητα αέρα = $1.21 kg.m^{-3}$ και C_p = θερμοχωρητικότητα του αέρα υπό σταθερή πίεση = $103 J.kg^{-1}.^{\circ}K^{-1}$ για βαρομετρική πίεση 10^3 mbar.

Το κάτω όριο προσδιορίστηκε με την εξίσωση (2) (Jackson, 1982; Κερκίδης, 2003):

$$T_c - T_a = \frac{r_a \cdot R_N}{\rho \cdot C_p} \cdot \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} - \frac{e_a^* - e_a}{\Delta + \gamma} \quad (2)$$

όπου Δ = κλίση της σχέσης της τάσης υδρατμών στον κορεσμό με τη θερμοκρασία, γ = ψυχομετρική σταθερά, e_a = τάση υδρατμών στην ατμόσφαιρα, e_a^* = τάση υδρατμών σε κορεσμένη ατμόσφαιρα, σε θερμοκρασία T_a . Η διαφορά ($e_a^* - e_a$) παριστάνει το έλλειμμα κορεσμού της ατμόσφαιρας (VPD). Ο δείκτης υδατικής καταπόνησης δ =(CWSI) ισούται με το λόγο της κάθετης απόστασης της διαφοράς θερμοκρασίας ($T_c - T_a$) από της οριογραμμής μέγιστης, προς την κάθετη απόσταση των δύο οριογραμμών, μέγιστης και μηδενικής διαπνοής αντίστοιχα, για την ίδια τιμή του (VPD) (Idso et al., 1981b). Έτσι, για τον προσδιορισμό του δ , λαμβάνονταν μετρήσεις της θερμοκρασίας του φυλλώματος (εξ' αποστάσεως, 15-20 cm περίπου) καθημερινά, 12:00 με 13:00 το

μεσημέρι, σε 3 κεντρικές σειρές σε κάθε αγροτεμάχιο, με τη χρήση του θερμομέτρου της υπέρυθρης ακτινοβολίας Infrared. Μετρήσεις ελαμβάνονταν σε ένα αριθμό φυτών, σε φύλλα νεαρής ηλικίας, με τον ίδιο προσανατολισμό και την ίδια ώρα. Περιοδικά ανά 7 ημέρες, μετρήθηκε το ύψος των φυτών σε 3 κεντρικές σειρές και στα 12 πειραματικά τεμάχια από συγκεκριμένα φυτά που επιλέχθηκαν. Με το φύτρωμα των φυτών ηλιάνθου υπολογίστηκε ο ακριβής αριθμός των φυτών ανά σειρά σε κάθε αγροτεμάχιο.

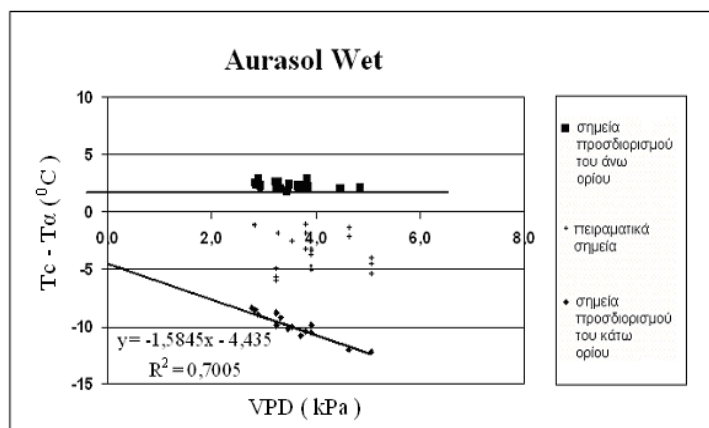
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Οι δύο οριογραμμές που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό του δείκτη υδατικής καταπόνησης φυτού (Crop Water Stress Index) και στις δύο υδατικές μεταχειρίσεις, απεικονίζονται στα Σχήματα 1 και 2. Ο οριζόντιος άξονας αναφέρεται στο έλλειμμα κορεσμού της ατμόσφαιρας (VPD), (δηλαδή $e_a^* - e_a$) και ο κάθετος άξονας αντιπροσωπεύει τη διαφορά θερμοκρασίας ($T_c - T_a$). Η κάτω οριογραμμή και για τις δύο εξετασθείσες ποικιλίες περιγράφεται από τη σχέση (3):

$$T_c - T_a = -4,435 - 1,5845 * VPD, \quad (R^2=0,7005) \quad (3)$$

Η διαφορά θερμοκρασίας όμως για την οποία τα φυτά ευρίσκονται σε συνθήκες μέγιστης υδατικής δοκιμασίας βρέθηκε διαφορετική για κάθε μία από τις εξετασθείσες ποικιλίες.

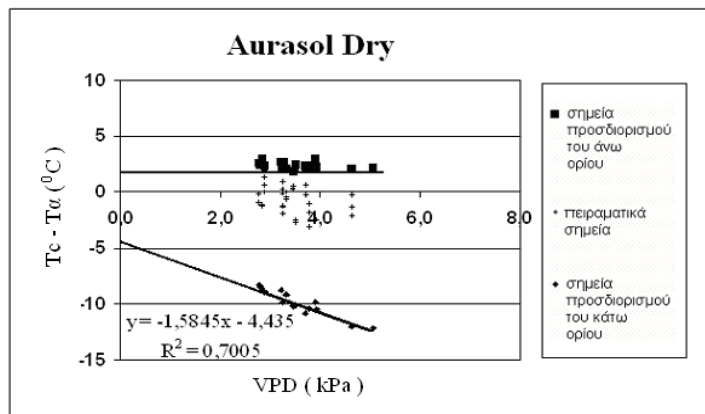
Αντιστοιχίζοντας τις μετρήσεις της θερμοκρασίας του αέρα T_a (1,5m) και της θερμοκρασίας της φυλλικής επιφάνειας T_c στο διάγραμμα των οριογραμμών μηδενικής και μέγιστης υδατικής δοκιμασίας (και στις δύο υδατικές μεταχειρίσεις, Wet-Dry) προκύπτει για κάθε μέτρηση ένα χαρακτηριστικό σημείο (σχήματα 1 και 2). Συγκεκριμένα για την ποικιλία Aurasol (Wet μεταχείριση), (σχήμα 1) παρατηρούμε ότι, τα σημεία είναι μετατοπισμένα προς το κάτω όριο, γεγονός που υποδεικνύει ότι η χορηγούμενη ποσότητα νερού ήταν επαρκής για την κάλυψη των υδατικών αναγκών των φυτών σε νερό. Τα σημεία, τα οποία βρίσκονται κοντά στην οριογραμμή μέγιστης διαπνοής, υποδηλώνουν ότι τα φυτά δεν υφίστανται την υδατική δοκιμασία, τουλάχιστον όχι σε μεγάλο βαθμό.



Σχήμα 1. Διαγραμματική απεικόνιση των μετρήσεων: θερμοκρασία της φυλλικής επιφάνειας (T_c), θερμοκρασία του αέρα (T_a) και του ελλείμματος κορεσμού της ατμόσφαιρας (VPD) (Aurasol Wet), R_N : 570 W/m²

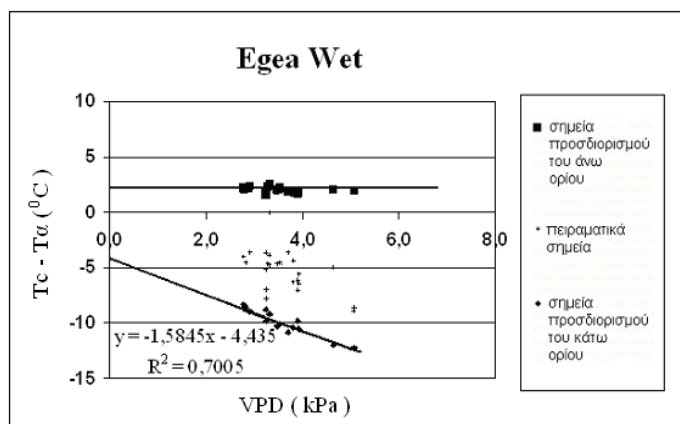
Στη Dry μεταχείριση (σχήμα 2) τα περισσότερα σημεία είναι μετατοπισμένα προς το άνω όριο: ένδειξη της υδατικής δοκιμασίας που υφίστανται τα φυτά, όταν η χορηγούμενη ποσότητα αρδευτικού νερού μειώνεται (κατά 50%). Αναμφισβήτητα, λοιπόν,

με τη μείωση της ποσότητας αρδευτικού νερού τα φυτά υπόκεινται σε συνθήκες υδατικής δοκιμασίας, λόγω των αυξημένων αναγκών τους σε νερό. Η έλλειψη της εδαφικής υγρασίας, επηρεάζει αρνητικά την καλλιέργεια, επιδρώντας στους παράγοντες: ύψος και απόδοση.



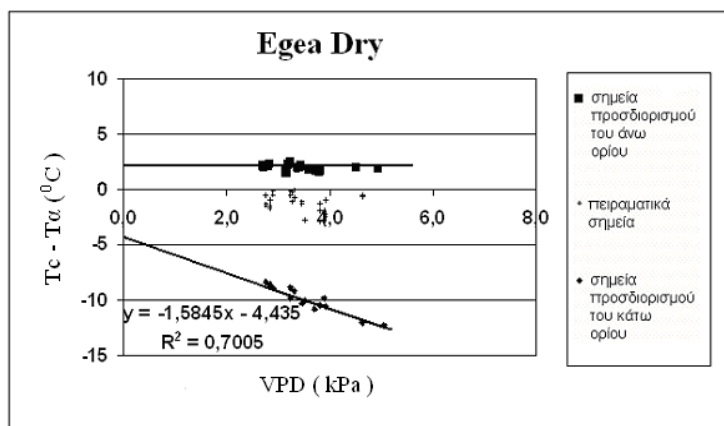
Σχήμα 2. Διαγραμματική απεικόνιση των μετρήσεων: θερμοκρασία της φυλλικής επιφάνειας (T_c), θερμοκρασία του αέρα (T_a) και του ελλείμματος κορεσμού της ατμόσφαιρας (VPD) (Aurasol Dry), R_N : 570 W/m^2

Για την ποικιλία Egea (Wet μεταχείριση), (σχήμα 3) τα σημεία είναι μετατοπισμένα προς το κάτω όριο αποδεικνύοντας ότι τα φυτά δεν υπόκεινται σε συνθήκες μέγιστης υδατικής δοκιμασίας. Συνεπώς, η ποσότητα νερού που χορηγήθηκε είναι επαρκής και για την κάλυψη των υδατικών αναγκών της ποικιλίας Egea.



Σχήμα 3. Διαγραμματική απεικόνιση των μετρήσεων: θερμοκρασία της φυλλικής επιφάνειας (T_c), θερμοκρασία του αέρα (T_a) και του ελλείμματος κορεσμού της ατμόσφαιρας (VPD) (Egea Wet), R_N : 570 W/m^2

Για την Dry μεταχείριση (σχήμα 4), τα περισσότερα σημεία πλησιάζουν το άνω όριο (αναμφισβήτητη ένδειξη της υδατικής δοκιμασίας που υφίστανται τα φυτά).



Σχήμα 4. Διαγραμματική απεικόνιση των μετρήσεων: θερμοκρασία της φυλλικής επιφάνειας (T_c), θερμοκρασία του αέρα (T_a) και του ελλείμματος κορεσμού της ατμόσφαιρας (VPD) (Egea Dry), R_N : 570 W/m²

Στα σχήματα 5 και 6, παρουσιάζεται η μεταβολή του δείκτη υδατικής καταπόνησης κατά τη διάρκεια των σταδίων ανάπτυξης της καλλιέργειας και για τις δύο υδατικές μεταχειρίσεις (Wet-Dry). Λόγω προβλημάτων που προέκυψαν κατά τον έλεγχο της αξιοπιστίας των μετρήσεων, η μεταβολή του δείκτη υδατικής καταπόνησης μελετήθηκε από την 206^η ημερολογιακή ημέρα. Παρά ταύτα, από τις υπάρχουσες μετρήσεις μπορούν να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα.

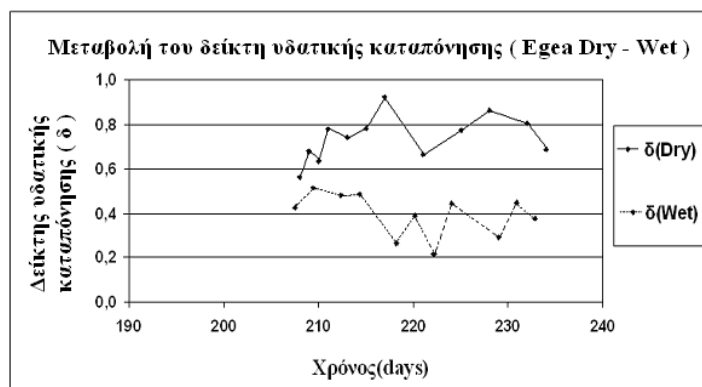
Για την ποικιλία Aurasol (Wet μεταχείριση) (σχήμα 5), ο δείκτης δ κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα παρουσιάζοντας ελάχιστο 0,26 και μέγιστο 0,58. Στη διάρκεια του σταδίου της ανθοφορίας-καρποφορίας, τα φυτά δεν υφίστανται την υδατική δοκιμασία σε μεγάλο βαθμό (επάρκεια εδαφικού νερού). Κατά το στάδιο της ωρίμανσης, ο δείκτης κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα, με μια μέση τιμή της τάξεως του 0,5. Το γεγονός αυτό οφείλεται, αφενός στο ότι τα φυτά δεν παρουσιάζουν αυξημένες ανάγκες σε νερό και αφετέρου στο ότι, η χορηγούμενη ποσότητα αρδευτικού νερού, καθώς και η ποσότητα αποθηκευμένου νερού στο έδαφος, επαρκούν για την κάλυψη των αναγκών τους.



Σχήμα 5. Μεταβολή του δείκτη υδατικής καταπόνησης υπό καθεστώς πλήρους άρδευσης, στην ποικιλία Aurasol του ηλίανθου

Στην Dry μεταχείριση (σχήμα 5), ο δείκτης δ , κυμαίνεται σε υψηλά επίπεδα, λαμβάνοντας τιμές από 0,61 έως 0,89. Τα φυτά, δηλαδή, υφίστανται την υδατική δοκιμασία σε μεγάλο βαθμό. Κατά τη διάρκεια του σταδίου της ανθοφορίας-καρποφορίας, η εμφάνιση της μέσης τιμής της τάξεως του 0,7, είναι ενδεικτική της αδυναμίας ικανοποίησης των αναγκών των φυτών σε διαπνοή. Ως αποτέλεσμα, έχοντας καταναλώσει

όλη τη διαθέσιμη ποσότητα αρδευτικού νερού, τα φυτά εισερχόμενα στο στάδιο της ωρίμανσης (235^η ημερολογιακή ημέρα) υπόκεινται σε συνθήκες μέγιστης υδατικής δοκιμασίας.



Σχήμα 6: Μεταβολή του δείκτη υδατικής καταπόνησης υπό καθεστώς ελλειμματικής άρδευσης, στην ποικιλία Egea του ηλιάνθου

Στην ποικιλία Egea (Wet μεταχείριση) (σχήμα 6), ο δείκτης δ παρουσιάζει ελάχιστο 0,21 και μέγιστο 0,52. Είναι εμφανές, ότι ενώ κατά το στάδιο της ανθοφορίας τα φυτά δεν υπόκεινται σε συνθήκες υδατικής δοκιμασίας, οι τιμές που λαμβάνει ο δείκτης δ κατά το στάδιο της ωρίμανσης είναι 0,4-0,5. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι η ποικιλία Egea έχει λιγότερες απαιτήσεις σε νερό εν συγκρίσει με την ποικιλία Aurasol. Στη Dry μεταχείριση (σχήμα 6), ο δείκτης δ κυμαίνεται σε υψηλά επίπεδα λαμβάνοντας τιμές από 0,56 έως 0,92. Οι υψηλές τιμές που παρουσιάζει, τόσο στο στάδιο της ανθοφορίας, όσο και στο στάδιο της ωρίμανσης, δείχνουν ότι τα φυτά αδυνατούν να ικανοποιήσουν τις ανάγκες τους σε διαπνοή και απαιτείται περισσότερη ποσότητα αρδευτικού νερού.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Για την ποικιλία Aurasol, η μείωση της ποσότητας του νερού άρδευσης στο 50% την επηρέασε αρνητικά, έχοντας σημαντική επίδραση στο ύψος των φυτών και στην απόδοσή της. Στη Wet μεταχείριση ο δείκτης δ κυμάνθηκε σε χαμηλά επίπεδα τόσο στο στάδιο της ανθοφορίας- καρποφορίας, όσο και το στάδιο της ωρίμανσης, γεγονός που αποδεικνύει ότι η ποσότητα του χορηγούμενου νερού ήταν επαρκής για την κάλυψη των αναγκών των φυτών, τα οποία έδωσαν ικανοποιητική απόδοση (μέγιστο ξηρό βάρος ταξιανθίας 121,78gr, μέγιστη διάμετρος ταξιανθίας 12,33 cm). Στη Dry μεταχείριση ο δείκτης δ κυμάνθηκε σε υψηλά επίπεδα (0,61-0,89) τόσο στο στάδιο της ανθοφορίας- καρποφορίας, όσο και στο στάδιο της ωρίμανσης, γεγονός που δείχνει ότι η χορηγούμενη ποσότητα νερού δεν επαρκούσε για την κάλυψη των αναγκών των φυτών (μέγιστο ξηρό βάρος ταξιανθίας 78,69gr, μέγιστη διάμετρος ταξιανθίας 10,67cm).

Η ποικιλία Egea φαίνεται λιγότερο απαιτητική σε νερό από την ποικιλία Aurasol. Έτσι, στη Wet μεταχείριση, ο δείκτης δ κυμάνθηκε μεταξύ 0,2-0,5 παρουσιάζοντας τις υψηλότερες τιμές στο στάδιο της ανθοφορίας και τις χαμηλότερες στο στάδιο της ωρίμανσης (μέγιστο ξηρό βάρος ταξιανθίας 89,71 gr, μέγιστη διάμετρος ταξιανθίας 11,67 cm). Στη Dry μεταχείριση, ο δείκτης δ κυμάνθηκε σε υψηλά επίπεδα της τάξης του 0,8-0,9, πράγμα που δείχνει ότι στα στάδια από την ανθοφορία μέχρι την ωρίμανση η ποσότητα αρδευτικού νερού δεν ήταν επαρκής για να καλύψει τις ανάγκες των φυτών (μέγιστο ξηρό βάρος ταξιανθίας 62,15 gr και μέγιστη διάμετρος ταξιανθίας 10,22 cm).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Fadi Karam, Rafic Lahoud, Randa Masaad, Rabih Kabalan, Joelle Breidi, Claude Chalita, Youssef Roupheal, 2007. *Evapotranspiration, seed yield and water use efficiency of drip irrigated sunflower under full and deficit irrigation conditions*. Agricultural Water Management 90:213-223.
- Howell, T.A., Hatfield, J.L., Yamada, H. and Davis, K.R., 1984. *Evaluation of cotton canopy temperature to detect crop water stress*. Trans. ASAE 27:84-88.
- Idso, S.B., Jackson, R.D., Pinter, P.J.Jr., Reginato, R.J., Hatfield, J.L., 1981a. *Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability*. Agric. Meteor. 124:45.
- Idso, S.B., Jackson, R.D., Pinter, P.J.Jr., Reginato, R.J., Hatfield, J.L., 1981b. *Measuring yield - plant water potential depressions in alfalfa by means of Infrared thermometry*. Agron. J. 73: 826.
- Jackson, R.D. and Idso, S.B., 1969. *Ambient temperature effect in infrared thermometry*. Agron. J. 61:324-325.
- Jackson, R.D., 1982. *Canopy temperature and crop water stress*. Adv. Irrig. 1:43-85.
- Karamanos, A.J., 2003. *Leaf Water Potential In Encyclopedia of Water Science*.
- Κερκίδης, Π., 2003. *Αρδεύσεις, Πανεπιστημιακές Σημειώσεις*.
- O'Toole, J.C., Turner, N.C., Nainuco, O.P., Dingkuhn, M. and Gomez, K.A., 1984. *Comparison of some crop water stress measurement methods*. Crop Sci. 24: 1121-1128.
- Pinter, P.J., Jr. and Reginato, R.J., 1982. *A thermal infrared technique for monitoring cotton water stress and scheduling irrigation*. Trans. ASAE 25: 1651- 1655.
- Reginato, R.J., 1983. *Field quantification of crop water stress*. Trans. ASAE 26:772-775.
- Reginato, R.J. and Howe, J., 1985. *Irrigation scheduling using crop indicators*. J. Irrig. Drain. Eng. 3:125-133.
- Reginato, R.J. and Garrot D.J., Jr., 1987. *Irrigation scheduling with the crop water stress index*. In: Western Cotton Production Conf. Summary AZ. 18-20 August, 1987. Cotton Growers Assoc., Memphis, TN. pp. 7-10.
- Thom, A.S. and Oliver, H.R., 1977. *On Penman's equation for estimating regional Evaporation*. Q.J. Roy. Met. Soc. 103: 345-357.
- Wanjura, D.F., Hatfield, J.L. and Upchurch, D.R., 1990. *Crop water stress index relationship with crop productivity*. Irrig. Sci. 11:93-99.

ΜΙΚΡΟΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΑΙ ΥΔΑΤΟΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑ ΓΙΑ ΠΑΤΑΤΟΠΑΡΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΑΡΚΑΔΙΑ

N. Προύτσος¹, A. Λιακατάς², A. Κοτρώζου³ και Σ. Αλεξανδρής⁴

Τομέας Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και
Γεωργικής Μηχανικής, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Ιερά Οδός 75, 118 55 Αθήνα
E-mails: ¹proutsos@aua.gr, ²liakatas@aua.gr, ³kotrozou_A@hotmail.com, ⁴stalex@aua.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία εξετάζονται οι επιδράσεις της διαθεσιμότητας νερού και του μικροκλίματος στην παραγωγή πατάτας στην Αρκαδία κατά τα έτη 2004 και 2005. Οι υψηλές μέγιστες ημερήσιες θερμοκρασίες ($> 30\text{ }^{\circ}\text{C}$) με μεγάλη διάρκεια επηρεάζουν αρνητικά την παραγωγή, ενώ οι χαμηλές ελάχιστες ($< 7\text{ }^{\circ}\text{C}$) επιδρούν αρνητικά στο φύλλωμα. Οι υδατικές ανάγκες στην περιοχή είναι αυξημένες με τη μέση ημερήσια εξατμισοδιαπνοή το καλοκαίρι να φτάνει κατά μέσο όρο τα 7.3 mm, ενώ οι συνολικές ανάγκες είναι 623 mm. Το 74 % αυτής της ποσότητας καταναλώνεται κατά τα στάδια αύξησης των κονδύλων. Οι εμπειρικές αρδεύσεις, που βασίζονται σε φαινολογικές παρατηρήσεις, θεωρούνται αρκετά αποτελεσματικές, αν και οδηγούν, κατά περίπτωση, σε μικρή διάρκεια και έντασης ελλείμματα ή πλεονάσματα νερού.

Λέξεις κλειδιά: πατάτα, εξατμισοδιαπνοή, Αρκαδία, θερμοκρασία.

MICROMETEOROLOGICAL CONDITIONS AND WATER AVAILABILITY IN RELATION TO POTATO PRODUCTION IN ARCADIA - GREECE

N. Proutsos¹, A. Liakatas², A. Kotrozou³ and S. Alexandris⁴

Sector of Water Resources Management, Department of Natural Resources Development
and Agricultural Engineering, Agricultural University of Athens, 75 Iera Odos,
Athens 118 55, Greece

E-mails: ¹proutsos@aua.gr, ²liakatas@aua.gr, ³kotrozou_A@hotmail.com, ⁴stalex@aua.gr

ABSTRACT

In this study the effects of microclimate and water availability on potato crop production are examined in Arcadia-Greece during the 2004 and 2005 vegetative periods. High (above $30\text{ }^{\circ}\text{C}$) daily maximum and low (below $7\text{ }^{\circ}\text{C}$) daily minimum temperatures can affect tuber production and leaf growth, respectively. Water requirements are large, with daily evapotranspiration reaching in summer (on a two-year average basis) 7.3 mm. The season water requirements is 623 mm, of which 74 % is consumed during tuber development. The empirical irrigation programs used by farmers and based on phenological observations are rather efficient, although, in some cases, they may lead to short periods of mild water deficit or surplus.

Key words: potato crop, evapotranspiration, Arcadia, temperature.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διαθεσιμότητα νερού έχει σημαντική επίδραση στην πατατοπαραγωγή και για την μεγιστοποίηση του όγκου της, η διαθέσιμη εδαφική υγρασία δεν πρέπει να εξαντλείται περισσότερο από 30 – 50 % (van Loon, 1981; Doorenbos and Kassam, 1986). Περιορισμένη υδατοδιαθεσιμότητα μπορεί να προκαλέσει πρωίμηση (Karafyllidis et al., 1996), μείωση της βλαστικής αύξησης και της παραγωγής κονδύλων, περιορισμό του αριθμού κονδύλων ανά φυτό και του μεγέθους τους και υποβάθμιση της ποιότητάς των κονδύλων (Mac Kerron and Jefferies, 1988; Ojala et al., 1990; Lynch et al., 1995; Karafyllidis et al., 1996; Dalla Costa et al., 1997; Yuan et al., 2003). Η υδατοκαταπόνηση προκαλεί μείωση της φωτοσύνθεσης, ενώ η επίδραση ξηρικών συνθηκών κατά την έναρξη της κονδυλοποίησης ή και αργότερα προκαλεί μείωση της τελικής παραγωγής (Mac Kerron and Jefferies, 1986; Haverkort et al., 1990; Lynch et al., 1995; Yuan et al., 2003; Holden et al., 2003).

Οι ανάγκες σε νερό πατατοκαλλιέργειας εκφράζονται μέσω της εξατμισοδιαπνοής (ET_c) που αποτελεί τον κύριο παράγοντα του υδατικού ισοζυγίου και διαφοροποιείται από περιοχή σε περιοχή. Στο Wisconsin αναφέρεται συνολική ET_c ίση με 293-405 mm κατά τη διάρκεια μετρήσεων τριών ετών τους μήνες Ιούλιο έως Αύγουστο (Tanner, 1981), στη Mesa AZ 617 mm για καλλιεργητική περίοδο από Φεβρουάριο έως Ιούνιο (Erie et al., 1965), ενώ στο Kennebec 331-630 mm, (Wolfe et al., 1983) και στην Ελλάδα 480 mm (Υπουργείο Γεωργίας, 1990). Εκτός της εξατμισοδιαπνοής, μετεωρολογικοί παράγοντες που καθορίζουν την ανάπτυξη και παραγωγή πατάτας είναι η εδαφική και ατμοσφαιρική θερμοκρασία και υγρασία, η ηλιακή ακτινοβολία και η φωτοπερίοδος. Ιδανικές θεωρούνται θερμοκρασίες αέρα μεταξύ 15-20 °C (Manrique and Bartholomew, 1991), 15-19 °C (Haverkort, 1990), 14-22 °C (Ingram and Mac Cloud, 1984) ή 20,5 °C (Προύτσος κ.ά., 2006), ενώ υψηλότερες τιμές επιδρούν αρνητικά στην παραγωγή μέσω του σχηματισμού πολλών μικρών κονδύλων με περιορισμένο περιεχόμενο σε ξηρή ουσία και αρνητικές επιδράσεις στο χρώμα (Haverkort, 1990). Θερμοκρασίες αέρα μεγαλύτερες από 30 °C έχουν ανασταλτική δράση στην ανάπτυξη των πατατοφύτων (Midmore, 1990), μειώνουν τη φωτοσυνθετική δραστηριότητα (Ku et al., 1977; Midmore and Prange, 1992) και τους ρυθμούς αύξησης των κονδύλων, ενώ οι χαμηλές εδαφικές θερμοκρασίες (μικρότερες από 9 °C) επιδρούν αρνητικά στην επιμήκυνση των βλαστών (Sale, 1979). Η ξηρότητα της ατμόσφαιρας επηρεάζει τους ρυθμούς ανάπτυξης των πατατοφύτων και της τελικής παραγωγής (Temmerman et al., 2002; Προύτσος κ.ά., 2006), αν και γενικά σε τιμές ελλείμματος κορεσμένων υδρατμών (VPD) μικρότερες από 2 kPa δεν επηρεάζεται η φωτοσυνθετική δραστηριότητα εφόσον υπάρχει επάρκεια εδαφικής υγρασίας (Gordon et al., 1999).

Για την παρούσα εργασία ως οριακές τιμές θερμοκρασίας αέρα για την ανάπτυξη των πατατοφύτων στα στάδια σχηματισμού και ανάπτυξης των κονδύλων θεωρούνται οι 30 και 7 °C (Sands et al., 1979; Monrique and Hodges, 1989; Streck et al., 2007).

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Δύο πειραματικοί αγροί εγκαταστάθηκαν στην περιοχή Ζουπάνους, Δ.Δ. Ζευγολατιού, Δ. Κορυθίου του Ν. Αρκαδίας σε δύο θέσεις με γεωγραφικές συντεταγμένες 37° 33' 11'', 22° 25' 29'' και 37° 32' 57'', 22° 25' 23'', εκτάσεις 15,8 και 17,3 στρ. και υψόμετρα 641 και 638 m για τα έτη 2004 και 2005, αντίστοιχα. Τα αγροτεμάχια καλλιεργήθηκαν με πατάτα (*Solanum tuberosum* L.) που φυτεύτηκε στις 10-04-2004 και 09-04-2005 στο πρώτο και στο δεύτερο αγροτεμάχιο, αντίστοιχα. Εφαρμόστηκαν όλες οι απαραίτητες καλλιεργητικές εργασίες λίπανσης και φυτοπροστασίας ώστε να περιοριστούν οι αντίστοιχες επιδράσεις στην τελική παραγωγή λόγω ασθενειών, εντομολογικών προσβολών ή ελλείψεων σε θρεπτικά συστατικά. Για την ικανοποίηση

των υδατικών αναγκών των φυτών χρησιμοποιήθηκε σύστημα άρδευσης με μικρο-εκτοξευτήρες (τύπου Nelson R10 Turbo με βάση P6 15° purple, ακροφύσιο Dk. Blue no. 78, παροχή 242 l h⁻¹ και πίεση λειτουργίας 2,5 atm που τοποθετήθηκαν σε τετραγωνική διάταξη πλευράς 7,5 m) και κατά τα δύο έτη. Στις πειραματικές θέσεις (στο κέντρο του αγρού) εγκαταστάθηκε αυτόματος μετεωρολογικός σταθμός (Minimet 2, Skye instruments με καταγραφικό Datalog 2, SDL 5400) για τη λήψη μετρήσεων (με συχνότητα σάρωσης 10 s και καταγραφή ανά 10 min) ανεμοταχύτας (αισθητήρας A100R M3N), ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας (SKH 2060), πυκνότητας ροής ηλιακής ακτινοβολίας (SKS 1110/I) και ύψος νερού από βροχόπτωση ή άρδευση. Ανά δεκαπενθήμερο λαμβάνονταν βιομετρικά δεδομένα, από επιφάνεια εδάφους 0,6 m² σε δύο θέσεις κάθε φορά, για τη μέτρηση της ανάπτυξης των φυτών και των κονδύλων.

Ο υπολογισμός της εξατμισοδιαπνοής πατατοκαλλιέργειας (ET_c) έγινε με χρήση των παρακάτω σχέσεων:

$$ET_c = K_c \cdot ET_o \quad (1)$$

$$ET_o = \frac{0.408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T + 273} \cdot U_2 \cdot (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0.34 \cdot U_2)} \quad (2)$$

όπου K_c: φυτικός συντελεστής (Πίν. 1), ET_o: η ημερήσια εξατμισοδιαπνοή αναφοράς [mm d⁻¹] που εδώ υπολογίζεται με την μέθοδο Penman-Monteith (εξ. 2, Allen et al., 1994), R_n: η πυκνότητα ροής καθαρής ακτινοβολίας [MJ m⁻² d⁻¹] που μπορεί να υπολογιστεί από την πυκνότητα ροής ολικής ακτινοβολίας κατά τη μεθοδολογία των Allen et al. (1994), G: η ροή θερμότητας στο έδαφος (θεωρείται αμελητέα), γ: ψυχομετρική σταθερά [kPa °C⁻¹], Δ: η κλίση της καμπύλης τάσης κορεσμένων υδρατμών ως συνάρτηση της θερμοκρασίας [kPa °C⁻¹] T: η μέση ημερήσια θερμοκρασία αέρα [°C], U₂: η μέση ανεμοταχύτητα σε ύψος 2 m [m s⁻¹] και (e_a - e_d)=VPD: το έλλειμμα της τάσης υδρατμών της ατμόσφαιρας [kPa].

Πίνακας 1. Φυτικός συντελεστής (K_c) στα διάφορα στάδια ανάπτυξης πατατοφυτείας, (προσαρμογή με βάση: Doorenbos et al., 1986).

	Στάδιο ανάπτυξης	Διάρκεια (d)	K _c
I	Φύτρωμα - στολonoποίηση	30	0.4 - 0.5
II	Σχηματισμός κονδύλων - έναρξη άνθησης	25	0.7 - 0.8
III	Ανθοφορία - έναρξη διόγκωσης κονδύλων	35	1.05 - 1.2
IV	Διόγκωση κονδύλων	30	0.85 - 0.95
V	Ωρίμανση	25	0.7 - 0.75

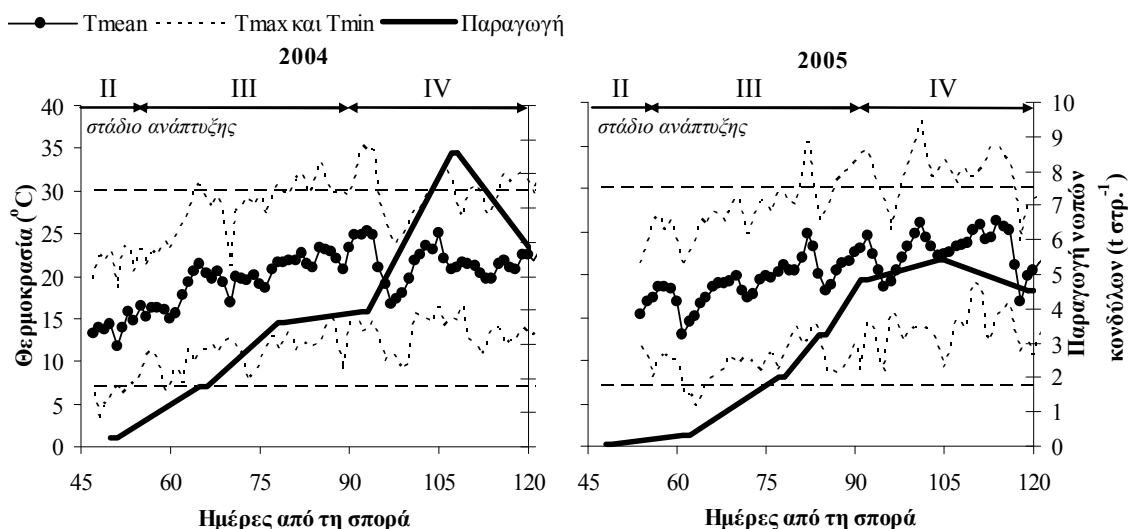
Επειδή η εγκατάσταση του σταθμού πραγματοποιήθηκε μετά την πάροδο 40 περίπου ημερών από την εγκατάσταση της καλλιέργειας, οι τιμές εξατμισοδιαπνοής υπολογίστηκαν με βάση τα κλιματικά δεδομένα της περιοχής (EMY: κλιματική περίοδος 1957-1997, θέση μετεωρολογικού σταθμού: 37° 31' 58'', 22° 23' 59'') θεωρώντας ότι η μηνιαία τιμή αντιστοιχεί στο μέσο κάθε μήνα και εφαρμόζοντας γραμμική παρεμβολή για τις ενδιάμεσες ημέρες. Οι εισερχόμενες ποσότητες νερού στην καλλιέργεια καταγράφονταν από την εγκατάσταση της καλλιέργειας.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ

3.1. ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΑΕΡΑ

Σε ημερήσια βάση οι τιμές της μέσης θερμοκρασίας επιδρούν στους ρυθμούς αύξησης της παραγωγής. Κατά τα στάδια III και IV, τόσο η μέση όσο και η μέγιστη

θερμοκρασία και για τα δύο έτη εμφανίζουν γενικά υψηλές τιμές (Σχ. 1). Ιδιαίτερα αυξημένη είναι η μέγιστη θερμοκρασία ($T_{\max}$) κατά το στάδιο IV του έτους 2005, όπου 22 από τις 30 ημέρες του, καταγράφονται τιμές μεγαλύτερες από 30 °C, έναντι 14 ημερών του αντίστοιχου σταδίου του έτους 2004.



Σχήμα 1. Ημερήσιες τιμές μέσης (T_{mean}), ελάχιστης (T_{min}) και μέγιστης (T_{max}) θερμοκρασίας (αριστερός άξονας) καθώς και η εξέλιξη της συνολικής παραγωγής νωπών κονδύλων (δεξιός άξονας) σε διάφορα στάδια ανάπτυξης πατατοκαλλιέργειας (II, III, IV) κατά τα έτη 2004 και 2005 στην Αρκαδία.

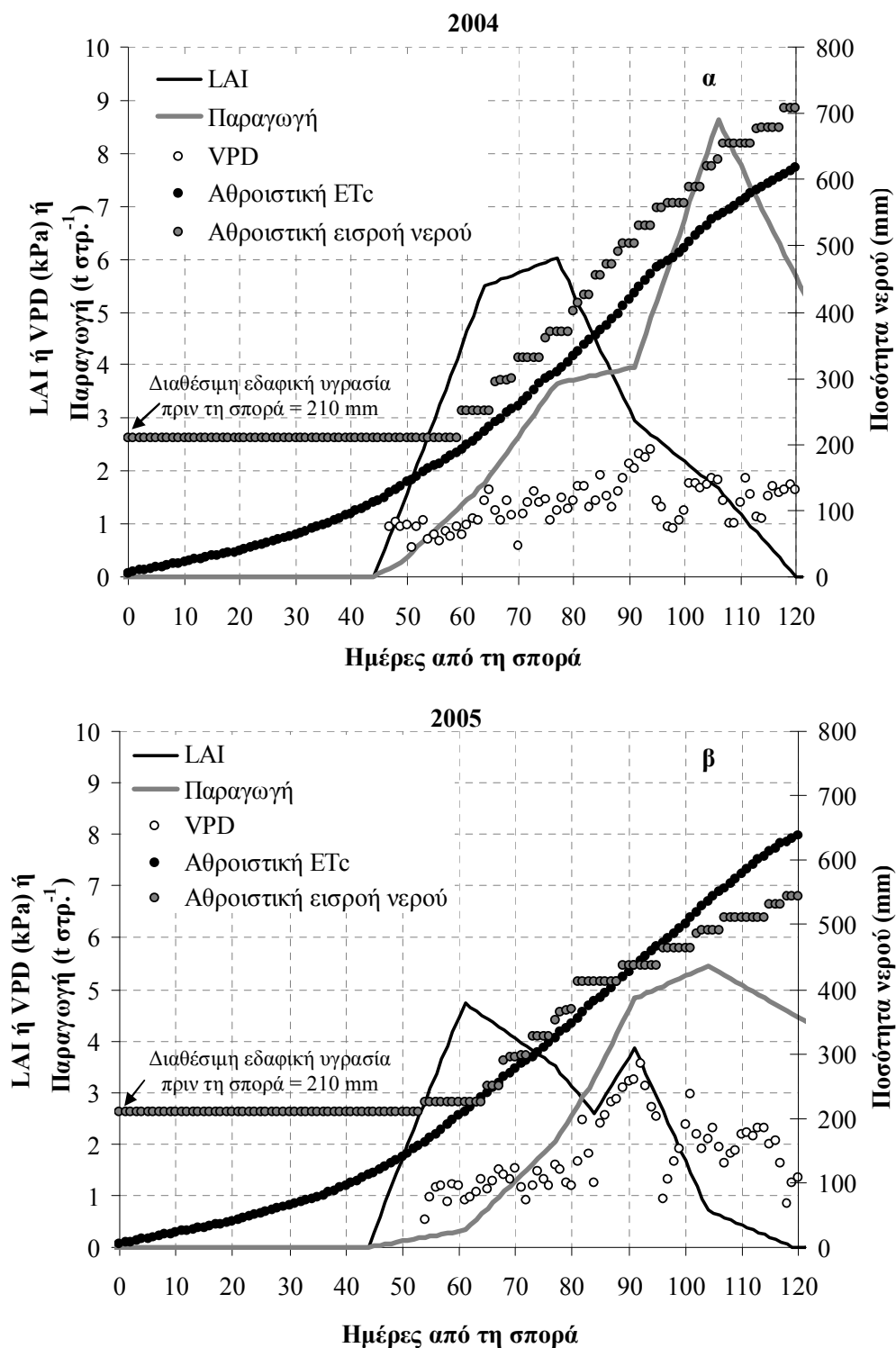
Σημαντική φαίνεται να είναι η επίδραση της διάρκειας έκθεσης της καλλιέργειας σε υψηλές θερμοκρασίες πάνω στην ανάπτυξη των κονδύλων. Το έτος 2004 καταγράφηκαν έως και 5 διαδοχικές ημέρες με $T_{\max} > 30$ °C κατά το στάδιο IV, έναντι 19 ημερών το 2005. Αντίστοιχα, τιμές $T_{\text{mean}} > 20$ °C καταγράφηκαν σε έως και 12 συνεχόμενες ημέρες το 2004 και 21 το 2005. Κατά το III στάδιο του 2005, δεν παρατηρήθηκε σημαντική διαφοροποίηση του αριθμού των συνολικών ημερών με $T_{\max} > 30$ °C. Εντούτοις οι συνολικές ημέρες με $T_{\text{mean}} > 20$ °C ήταν αυξημένες (19 ημέρες) το 2004 σε σχέση με το επόμενο έτος (12 ημέρες). Πολλές διαδοχικές ημέρες με υψηλές T_{mean} (> 20 °C) παρατηρούνται κατά το τέλος του σταδίου III (77 ημέρες από τη σπορά) έως την αρχή του σταδίου IV (95 ημέρες από τη σπορά) του έτους 2004 όπου καταγράφονται 19 συνεχόμενες ημέρες με $T_{\text{mean}} > 20$ °C. Η παρατεταμένη θερμική καταπόνηση (19 διαδοχικές ημέρες) αν και δε συνοδεύεται από παρατεταμένη διάρκεια υψηλών μέγιστων θερμοκρασιών αντιστοιχεί σε μειωμένους ρυθμούς παραγωγής κονδύλων, που όμως αποκαθίστανται στο επόμενο στάδιο μετά την επάνοδο των θερμοκρασιών σε ευνοϊκά επίπεδα.

Η επίδραση των χαμηλών ελάχιστων θερμοκρασιών ($T_{\min} < 7$ °C) φαίνεται να μην επηρεάζει σημαντικά τους ρυθμούς αύξησης της πατατοπαραγωγής, ενόσω η διάρκεια έκθεσης των πατατοφύτων σε τέτοιες συνθήκες είναι μικρή. Εντούτοις, έντονα φαίνεται να επηρεάζεται το φύλλωμα (Σχ. 2) που το 2005 στο III στάδιο παρουσιάζει ρυθμούς μείωσης που παραμένουν αρνητικοί σε όλη τη διάρκεια του σταδίου.

3.2. ΕΛΛΕΙΜΜΑ ΥΔΡΑΤΜΩΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ (VPD)

Η ξηρότητα της ατμόσφαιρας δε φαίνεται να επηρεάζει την παραγωγικότητα, ενόσω επικρατούν ευνοϊκές υδατικές συνθήκες στο έδαφος και το VPD δεν παρουσιάζει πολύ υψηλές τιμές. Οι αρδεύσεις που εφαρμόστηκαν κάλυψαν τις υδατικές ανάγκες των φυτών και κατά τα δύο έτη, με μικρό υδατικό έλλειμμα στο τέλος του σταδίου V

του 2005 (Πιν. 2). Οι τιμές VPD του 2004 είναι γενικά χαμηλότερες σε σχέση με αυτές του 2005 κατά τα στάδια III και IV. Πολύ υψηλές τιμές (πάνω από 2.0 kPa) καταγράφονται κατά τις τελευταίες μέρες του σταδίου III έως τις πρώτες του σταδίου IV του έτους 2005 οπότε και οι ρυθμοί αύξησης των κονδύλων μειώνονται.



Σχήμα 2. Μεταβολές του δείκτη φυλλικής επιφάνειας (LAI), του ελλείμματος υδρατμών της ατμόσφαιρας (VPD) και της συνολικής παραγωγής νωπών κονδύλων (αριστερός άξονας) σε σχέση με τις τιμές αθροιστικής εξατμισοδιαπνοής (ET_c) και εισροής νερού (δεξιός άξονας) σε πατατοκαλλιέργεια στη Αρκαδία για τις καλλιεργητικές περιόδους 2004 (α) και 2005 (β).

Πίνακας 2. Αθροιστική εξατμισοδιαπνοή (ET_c) και εισροή νερού και μέσες τιμές ελλείμματος υδρατμών της ατμόσφαιρας (VPD) σε διάφορα στάδια ανάπτυξης πατατοκαλλιέργειας στην Αρκαδία κατά τα έτη 2004 και 2005.

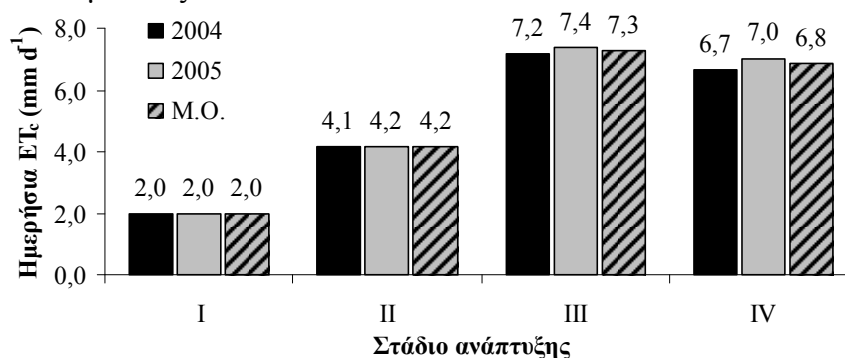
Στάδιο ανάπτυξης	Διάρκεια σταδίου (d)	Αθροιστική ET_c (mm)			Αθροιστική εισροή νερού (mm)			VPD (kPa)	
		2004	2005	M.O.	2004	2005	M.O.	2004	2005
Αρχή περιόδου	0				210*	210*	210*		
I	30	59	59	59	0	0	0		
II	25	103	104	104	0	13	7	0,9	0,7
III	35	251	258	255	294	213	254	1,3	1,6
IV	30	200	211	205	204	106	155	1,6	2,1
V	25	125	138	131	76	113	95	1,7	1,9
Σύνολο για τα στάδια (I-IV)		613	632	623	708	543	625		

*Αποθηκευμένη διαθέσιμη εδαφική υγρασία στην αρχή της καλλιεργητικής περιόδου (εκτιμώμενη τιμή κατά Raes et al., 2009)

3.3. ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗ ΚΑΙ ΑΡΔΕΥΣΗ

Οι συνολικές υδατικές ανάγκες της πατατοκαλλιέργειας για εξατμισοδιαπνοή δε διαφοροποιούνται σημαντικά κατά τα έτη 2004 (613 mm) και 2005 (632 mm), (Πίν. 2), δίνοντας μια μέση τιμή ίση με 623 mm (τιμή κατά 143 mm μεγαλύτερη από την αναφερόμενη από το Υπουργείο Γεωργίας για το σύνολο της χώρας). Η υδατοπαροχή πραγματοποιήθηκε με την εφαρμογή παραδοσιακών αρδευτικών προγραμμάτων που βασίζονταν στην παρατήρηση φαινολογικών χαρακτηριστικών των πατατοφύτων και κυρίως της κατάστασης (σπαργής) των φύλλων. Με αυτόν τον τρόπο, παρατηρείται κατά το 2004 σπατάλη νερού σε ποσοστό 15 %, ενώ το 2005 υδατικό έλλειμμα σε ποσοστό 14 % των συνολικών αναγκών. Κατά την εξέταση των υδατικών αναγκών ανά στάδιο, φαίνεται η εφαρμογή ελλειμματικών αρδεύσεων στο στάδιο V, προκειμένου οι κόνδυλοι να αποκτήσουν μηχανική αντοχή και να περιοριστούν οι τραυματισμοί κατά την εξαγωγή τους. Σε όλα τα υπόλοιπα στάδια δεν παρατηρείται υδατική καταπόνηση το 2004, ενώ το 2005 η σκληραγώγηση των κονδύλων για εξαγωγή ξεκίνησε με ελλειμματικές αρδεύσεις πολύ νωρίτερα από το κανονικό (Πίν. 2, Σχ. 2).

Οι χειμερινές βροχοπτώσεις εμπλούτισαν το ριζόστρωμα με επάρκεια νερού ώστε τα φυτά να ολοκληρώσουν τα στάδια ανάπτυξης I και II χωρίς άρδευση. Σε αυτά τα στάδια αν και υπάρχει αρκετή εδαφική υγρασία, επειδή το ριζικό σύστημα των φυτών είναι περιορισμένο και βρίσκεται σε μικρό βάθος από την εδαφική επιφάνεια, δεν είναι ικανό να απορροφήσει το αποθηκευμένο νερό. Η μηδενική άρδευση σε αυτό το στάδιο αν και μπορεί να προκαλέσει μικρή μείωση στην παραγωγή εφαρμόζεται προκειμένου τα φυτά να αναπτύξουν βαθύτερο ριζικό σύστημα που θα ευνοήσει τόσο τη μετέπειτα ανάπτυξή τους όσο και το σχηματισμό των κονδύλων σε ικανό βάθος ώστε να αποφεύγεται το πρασίνισμά τους.



Σχήμα 3. Ημερήσιες τιμές εξατμισοδιαπνοής πατατοκαλλιέργειας (ET_c) στην Αρκαδία για τα έτη 2004 και 2005 και ο μέσος όρος τους (M.O.) στα διάφορα στάδια ανάπτυξης.

Η μεγαλύτερη κατανάλωση νερού πραγματοποιείται κατά τα στάδια III και IV, όπου συνολικά καταναλώνεται το 74 % (κατά μέσο όρο των δύο ετών) των καθαρών αναγκών της καλλιέργειας. Πλέον υδροβόρο είναι το στάδιο III (255 mm νερού) όπου αντιστοιχεί στο 40 % των συνολικών υδατοαπαιτήσεων. Κατά το στάδιο αυτό η ημερήσια εξατμισοδιαπνοή μεγιστοποιείται παρουσιάζοντας μέση τιμή 7.3 mm (Σχ. 3), ενώ η μέγιστη καταγεγραμμένη τιμή (10.7 mm) παρουσιάστηκε 90 ημέρες από τη σπορά κατά το έτος 2004.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα μπορούν να συνοψισθούν στα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Το χρονικό εύρος της θερμικής καταπόνησης των πατατοφύτων με μέγιστες θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 30 °C προκαλεί μείωση της τελικής παραγωγής ιδιαίτερα όταν συμβαίνει κατά τα στάδια ανάπτυξης των κονδύλων.
- Χαμηλές ελάχιστες θερμοκρασίες (μικρότερες από 7 °C) κατά τα αρχικά στάδια ανάπτυξης των κονδύλων δεν φαίνεται να έχουν αρνητική επίδραση στους ρυθμούς αύξησης της παραγωγής, εφόσον το χρονικό εύρος της επίδρασης είναι μικρό. Εντούτοις, ακόμα και μικρής διάρκειας καταπονήσεις με ελάχιστες ημερήσιες θερμοκρασίες μικρότερες από 7 °C επιδρούν αρνητικά και μακροχρόνια στην ανάπτυξη του φυλλώματος.
- Η συνολική εξατμισοδιαπνοή πατατοκαλλιέργειας στην Αρκαδία ανέρχεται, κατά μέση τιμή, σε 623 mm με μέγιστη κατανάλωση στα στάδια αύξησης των κονδύλων, όπου απαιτείται το 74 % της συνολικής ποσότητας νερού.
- Μέγιστες υδατικές ανάγκες των πατατοφύτων παρουσιάζονται στο στάδιο III, όπου η μέση ημερήσια εξατμισοδιαπνοή φτάνει τα 7,3 mm.
- Τα αρδευτικά προγράμματα που βασίζονται σε φαινολογικές παρατηρήσεις και εφαρμόζονται παραδοσιακά στην περιοχή, γενικά χαρακτηρίζονται ως ικανοποιητικά με μικρές αποκλίσεις από τις υπολογισμένες υδατικές ανάγκες.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Allen, R.G., Smith, M., Pereira, L.S and Perrier, A., 1994. *An Update for the Calculation of Reference Evapotranspiration*. ICID Bulletin 43(2): 64-92.
- Dalla Costa, L., Vedove, G.D., Gianquinto, G., Giovanardi, R. and Peressotti, A., 1997. *Yield, water use efficiency and nitrogen uptake in potato: influence of drought stress*. Potato Res. 40: 19-34.
- Doorenbos, J. and Kassam, A.H., 1986. *Yield Response to Water*. FAO Irrigation and Drainage Paper No: 33, FAO, Rome, Italy.
- Erie, L.J., French, O.F. and Harris, K., 1965. *Consumptive use of water by crops in Arizona*. Arizona Agric. Exp. Stn. Tech. Bull. 169.
- Gordon, R., Brown, D.M., Madani, A., and Dixon, M.A., 1999. *An assessment of potato sap flow as affected by soil water status, solar radiation and vapour pressure deficit*. Can. J. Soil Sci. 79: 245-253.
- Haverkort, A.J., 1990. *Ecology of potato cropping systems in relation to latitude and altitude*. Agric. Syst. 32: 251-272.
- Haverkort, A.J., Van de Waart, M. and Bodlaender, K.B.A., 1990. *The effect of early drought stress on numbers of tubers and stolons of potato in controlled and field conditions*. Potato Res. 33: 89-96.
- Holden, N.M., Brereton, A.J., Fealy, R. and Sweeney, J., 2003. *Possible change in Irish climate and its impact on barley and potato yields*. Agric. For. Meteorol. 116: 181-196.
- Ingram, K.T. and McCloud, D.E., 1984. *Simulation of potato crop growth and development*. Crop Sci. 24: 21-27.

- Karafyllidis, D.I., Stavropoulos, N. and Georgakis, D., 1996. *The effect of water stress on the yielding capacity of potato crops and subsequent performance of seed tubers*. Potato Res. 39: 153-163.
- Ku, S.B., Edwards, G.E., and Tanner, C.B., 1977. *Effects of light, carbon dioxide, and temperature on photosynthesis, oxygen inhibition of photosynthesis, and transpiration in Solanum tuberosum*. Plant Physiol. 59: 868-872.
- Lynch, D.R., Foroud, N., Kozub, G.C. and Farries, B.C., 1995. *The effect of moisture stress at three growth stages on the yield, components of yield and processing quality of eight potato varieties*. Am. Potato J. 72: 375-386.
- MacKerron, D.K.L. and Jefferies, R.A., 1988. *The distribution of tuber sizes in droughted and irrigated crops of potato. I. Observations on the effect of water stress on graded yields from different cultivars*. Potato Res. 31: 269-278.
- Manrique, L.A. and Bartholomew, D.P., 1991. *Growth and yield performance of potato grown at three elevations in Hawaii: II. Dry matter production and efficiency of partitioning*. Crop Sci. 31: 367-372.
- Manrique, L.A. and Hodges, T., 1989. *Estimation of tuber initiation in potatoes grown in tropical environments based on different methods of computing thermal time*. Am. Potato J. 66: 425-436.
- Midmore, D.J., 1990. *Influence of temperature and radiation on photosynthesis, respiration and growth parameters of the potato*. Potato Res. 33: 293-294.
- Midmore, D.J. and Prange, R.K., 1992. *Growth responses of two Solanum species to contrasting temperatures and irradiance levels: relations to photosynthesis, dark respiration and chlorophyll fluorescence*. Annals of Botany 69: 13-20.
- Ojala, J.C., Stark, J.C. and Kleinkopf, G.E., 1990. *Influence of irrigation and nitrogen management on potato yield and quality*. Am. Potato J. 67: 29-43.
- Προύτσος, Ν., Κοτρώζου, Α., Αλεξανδρή, Σ. και Λιακατάς, Α., 2006. *Επίδραση του μικροκλίματος στην ανάπτυξη φυλλώματος και παραγωγή κονδύλων πατατοκαλλιέργειας*. Πρακτικά 8^{ου} Συνεδρίου Μετεωρολογίας, Κλιματολογίας και Φυσικής της Ατμόσφαιρας, τ. Β, 85-93 σ.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, C. and Fereres, E., 2009. *AquaCrop – The FAO crop model to simulate yield response to water*. Reference Manual.
- Sale, P.J.M., 1979. *Growth of potatoes (Solanum tuberosum L.) to the small tuber stage as related to soil temperature*. Aust. J. Agric. Res. 30: 667-675.
- Sands, P.J., Hackett, C. and Nix, H.A., 1979. *A model of the development and bulking of potatoes (Solanum tuberosum L.) 1. Derivation from well-managed field crops*. Field Crop. Res. 2: 309-331.
- Strech, N.A., de Paula, F.L.M., Bisognin, D.A., Heldwein, A.B. and Dellai, J., 2007. *Simulating the development of field grown potato (Solanum tuberosum L.)*. Agric. For. Met. 142: 1-11.
- Tanner, C.B., 1981. *Transpiration efficiency of potato*. Agron. J. 73: 59-64.
- Temmerman, L. De, Wolf, J., Colls, J., Bindi, M., Fangmeier, A., Finnan, J., Ojanpera, K., and Pleijel, H., 2002. *Effect of climatic conditions on tuber yield (Solanum tuberosum L.) in the European 'CHIP' experiments*. Eur. J. Agron. 17: 243-255.
- van Loon, C.D., 1981. *The effect of water stress on potato growth, development, and yield*. Am. Potato. J. 58: 51-69.
- Wolfe, D.W., Fereres, E. and Voss, R.E., 1983. *Growth and yield response to two potato cultivars to various levels of applied water*. Irrig. Sci. 3: 211-222.
- Υπουργείο Γεωργίας, 1990. *Πειραματική εφαρμογή νέων μεθόδων άρδευσης*. Αθήνα.
- Yuan, B.Z., Nishiyama, S. and Kang, Y., 2003. *Effects of different irrigation regimes on the growth and yield of drip-irrigated potato*. Agric. Water Manag. 63: 153-167.

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ (ΣΥΜΒΙΒΑΣΤΙΚΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ) ΣΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΛΙΒΑΔΙΟΥ ΛΑΡΙΣΗΣ

Π. Καρασαββίδης¹, Χ. Τζιμόπουλος² και Χ. Ευαγγελίδης³

Τομέας Συγκοινωνιακών και Υδραυλικών Έργων,
Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή,
Α.Π.Θ., 54124 Θεσσαλονίκη

E-mails: ¹pkarasav@yahoo.gr, ²tzimop@vergina.auth.gr, ³evan@topo.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η άνιση χρονική και χωρική κατανομή υδατικών αποθεμάτων στην Ελλάδα, επιβάλουν την κατασκευή φραγμάτων. Ένα σημαντικό πρόβλημα που προκύπτει είναι η επιλογή της βέλτιστης θέσης τοποθέτησης ενός φράγματος. Για την επιλογή της βέλτιστης θέσης θεωρούνται διάφορα κριτήρια, τα οποία μπορεί να είναι αλληλοσυγκρουόμενα και έτσι απαιτείται η συνδρομή της πολυκριτηριακής ανάλυσης. Τα διάφορα κριτήρια αξιολογούνται και ποσοτικοποιούνται με βάση τις ιδιότητες των φραγμάτων και έτσι είναι δυνατή η αριθμητική επίλυση του προβλήματος. Το παρόν πρόβλημα επιλύεται με τη βοήθεια του συμβιβαστικού προγραμματισμού και ως βέλτιστη λύση επιλέγεται εκείνη η οποία ανήκει στο (κατά Pareto) μη κυριαρχούμενο σύνολο που ελαχιστοποιεί την απόσταση από μια ιδανική τιμή.

Λέξεις κλειδιά: Συμβιβαστικός προγραμματισμός, διαχείριση υδατικών πόρων, βέλτιστη θέση φράγματος.

APPLICATION OF MULTIPLE CRITERIA DECISION MAKING ANALYSIS (COMPROMISE PROGRAMMING) IN THE MANAGEMENT OF WATER RESOURCES AT THE AREA OF LIVADI, LARISA PREFECTURE

P. Karasavvidis¹, C. Tzimopoulos² and C. Evangelides³

Department of Transportation and Hydraulic Works,
Faculty of Rural and Surveying Engineering, School of Engineering,
Aristotle University of Thessaloniki, 54124, Thessaloniki, Greece

E-mails: ¹pkarasav@yahoo.gr, ²tzimop@vergina.auth.gr, ³evan@topo.auth.gr

ABSTRACT

The uneven temporal and spatial distribution of water resources, in Greece, call for dam construction. One important problem that occurs is the selection of the optimum placement of a dam. In order to select the best position, several criteria are considered. These criteria may conflict each other, and so there is the need to use multiple criteria analysis methods. Every criterion is judged and quantified according to the properties of the dams and so it is possible to find an arithmetic solution of the problem. The problem is solved using compromise programming. The optimum solution is the one that belongs to the (by Pareto) nondominated set and minimizes the distance from an ideal value.

Key words: Compromise programming, water resources management, optimum placement of a dam.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Αν και η Ελλάδα χαρακτηρίζεται σαν μια σχετικά πλούσια χώρα σε υδατικούς πόρους, εντούτοις: α) Μεγάλο μέρος του υδατικού της δυναμικού είναι αναξιοποίητο, β) Υπάρχει άνιση χρονική και χωρική κατανομή των υδατικών αποθεμάτων, με το δυτικό της μέρος να είναι ευνοημένο, γ) Σε αρκετές περιοχές της Ελλάδας υπάρχει ο εφιάλτης της λειψυδρίας σε οποιαδήποτε μορφή, δ) Πολλές παραθαλάσσιες περιοχές αντιμετωπίζουν προβλήματα υφαλμύρωσης ε) Ένα μεγάλο μέρος των επιφανειακών αλλά και των υπόγειων υδροφορέων έχει μολυνθεί με φυτοφάρμακα, στ) Πλημμυρικά φαινόμενα είναι συχνά, ιδιαίτερα σε περιοχές που είχαν αποδασωθεί, ζ) Ο υπόγειος ορίζοντας έχει κατέβει σε πολύ χαμηλά επίπεδα

Οι αιτίες αυτών των φαινομένων είναι τόσο φυσικές όσο και ανθρωπογενείς (μόλυνση του φυσικού περιβάλλοντος, αποδάσωση, άλογη αστικοποίηση).

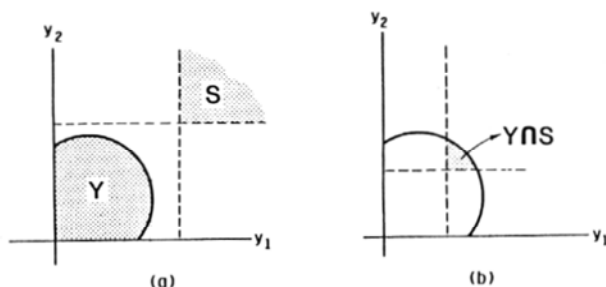
Είναι προφανές ότι καθίσταται αναγκαία μια πολιτική ορθολογικής διαχείρισης των υδάτινων πόρων, των οποίων οι αρχές προήλθαν από την Επιχειρησιακή Έρευνα (Operations Research and Management Science, OR/MS).

Η κατασκευή φραγμάτων είναι ένας από τους τρόπους που υπάρχουν για την ορθολογική αντιμετώπιση των προαναφερθέντων προβλημάτων. Ένα σημαντικό όμως πρόβλημα που προκύπτει είναι η επιλογή της βέλτιστης θέσης κατασκευής ενός φράγματος μεταξύ πολλών προτεινομένων. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να επιλυθεί κάνοντας χρήση των αρχών του συμβιβαστικού προγραμματισμού, όπως αναλύεται από τους: Zeleny, (1982), Wayne, (1994), and Po-Lung Yu, (1985). Στο χώρο της Υδραυλικής με ανάλογα προβλήματα έχουν ασχοληθεί οι Rivera et al (2003), οι Sousa και Lemos (1998) καθώς και η Μπάκα (2006).

2. ΤΟ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

2.1. ΤΟ ΙΚΑΝΟΠΟΙΗΤΙΚΟ ΣΥΝΟΛΟ (S)

Οι ικανοποιητικές λύσεις (satisficing solutions) μπορούν να ερμηνευτούν και σαν το αποτέλεσμα μιας όχι απόλυτης αλλά προσεγγιστικής βελτιστοποίησης. Είναι η διαδικασία λήψης απόφασης κατά την οποία αποδεχόμαστε μια «αρκετά καλή» λύση, η οποία προσπαθεί να εκπληρώσει κριτήρια επάρκειας περισσότερο παρά βελτιστοποίησης. Προσεγγίζει πιο πολύ τον ανθρώπινο τρόπο σκέψης. (Simon, 1983; Krippendorff, 1986). Το σύνολο των ικανοποιητικών λύσεων απαρτίζουν το ικανοποιητικό σύνολο S (satisficing set). Στην περίπτωση που $Y \cap S = \emptyset$ (Y είναι το σύνολο των τιμών) τότε θα πρέπει είτε να δημιουργηθούν νέες εναλλακτικές λύσεις, είτε να τροποποιηθεί το S, είτε να μεγεθυνθεί το X (ο χώρος των αποφάσεων), είτε να αναθεωρηθούν τα κριτήρια f.



Σχήμα 1. Το ικανοποιητικό σύνολο. (α) η περίπτωση που $Y \cap S = \emptyset$

2.2. ΤΟ ΜΗ ΚΥΡΙΑΡΧΟΥΜΕΝΟ ΣΥΝΟΛΟ (N)

Το μη κυριαρχούμενο σύνολο (nondominated set) συμβολίζεται με N και αναφέρεται και σαν αρχή του Pareto ή βέλτιστο κατά Pareto. Η κύρια ιδιότητά του είναι ότι

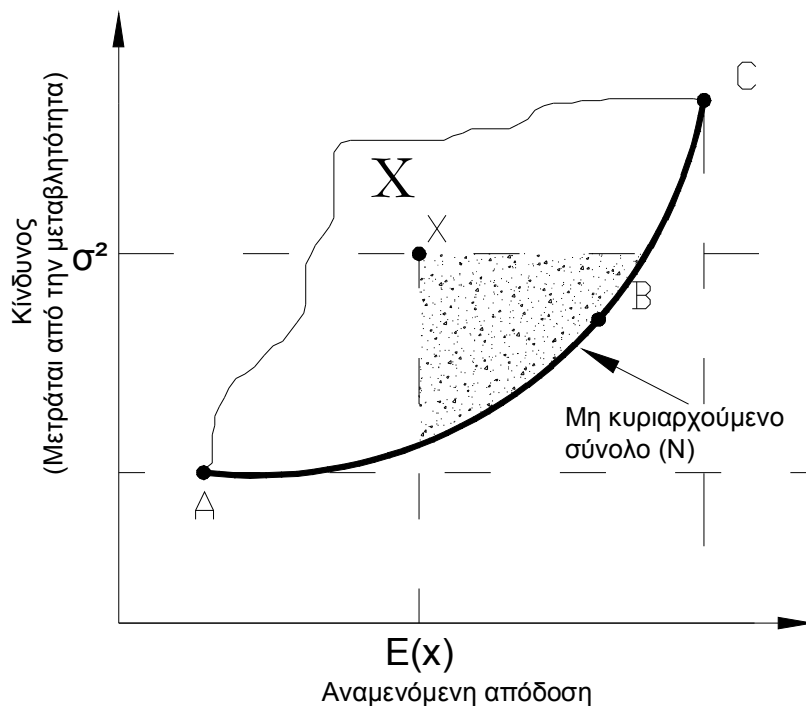
για κάθε κυριαρχούμενη λύση X , με κίνηση από τη λύση X προς την B βελτιώνεται τουλάχιστον μια αντικειμενική συνάρτηση, αφήνοντας τις άλλες αμετάβλητες. Έτσι η λύση B καλείται μη κυριαρχούμενη εάν δεν υπάρχει άλλη λύση η οποία θα βελτιώνει τουλάχιστον μια αντικειμενική συνάρτηση χωρίς να χειροτερεύσει οποιαδήποτε άλλη. (Zeleny, 1982). Π.χ. για δύο διανύσματα x και y ($x=\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, $y=\{y_1, y_2, \dots, y_n\}$), το x κυριαρχεί του y εάν:

$$x_i \geq y_i, \quad i=1, 2, \dots, n$$

και $x_i > y_i$ για ένα τουλάχιστον i .

Το σύνολο N αποτελείται από όλα τα σημεία που επαληθεύουν το βέλτιστο κατά Pareto. Η εύρεση του N στο X (χώρος των αποφάσεων) είναι μια από τις κυριότερες εργασίες του Πολυστοχικού Προγραμματισμού.

Ειδικά στο χώρο των δύο διαστάσεων μια μη κυριαρχούμενη λύση είναι μια επικτική λύση για την οποία μια αύξηση της αξίας του ενός κριτηρίου μπορεί να επιτευχθεί μόνο μέσω της μείωσης της αξίας κάποιου άλλου κριτηρίου.

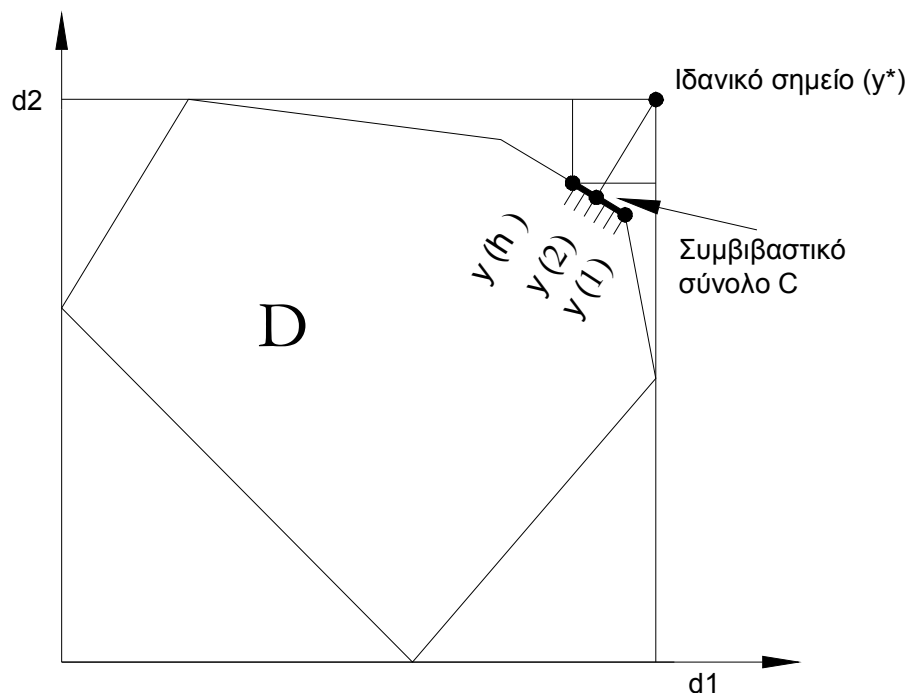


Σχήμα 2. Το μη κυριαρχούμενο σύνολο για το πρόβλημα μιας επένδυσης (efficient boundary)

2.3. ΤΟ ΣΥΜΒΙΒΑΣΤΙΚΟ ΣΥΝΟΛΟ (C)

Το συμβιβαστικό σύνολο (compromise set) συμβολίζεται με το γράμμα C . Αποτελείται από όλα τα σημεία y^p όπου $p=1, 2, \dots, \infty$. Οι συμβιβαστικές λύσεις εκφράζουν μια πολύ πιο ισχυρή προτίμηση από αυτές κατά Pareto, οπότε είναι και λιγότερες. Πιο συγκεκριμένα, το συμβιβαστικό σύνολο είναι ένα υποσύνολο του μη-κυριαρχούμενου συνόλου το οποίο με τη σειρά του μπορεί να θεωρηθεί υποσύνολο του ικανοποιητικού συνόλου

Δηλαδή ισχύει $C \subseteq N \subseteq S$



Σχήμα 3. Το συμβιβαστικό σύνολο (C)

2.4. Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ

Επιλέγεται εκείνη η τιμή (που ανήκει στο μη κυριαρχούμενο σύνολο N) που ελαχιστοποιεί την απόσταση από μια ιδανική τιμή, που συμβολίζεται με το διάνυσμα y^* . Η απόσταση r όμως δεν νοείται μόνο κατά την ευκλείδεια έννοια αλλά χρησιμοποιείται ο γενικός τύπος (Po-Lung Yu, 1985):

$$r(y;p,w) = \left[\sum_i w_i^p \left| \frac{y_i - y_i^*}{y_i^*} \right|^p \right]^{1/p} \quad \text{εξ. (1)}$$

ο οποίος αποτελεί μια ευρύτερη γενίκευση του Πυθαγορείου θεωρήματος στο χώρο των n διαστάσεων και στον ορισμό της νόρμας. Ο λόγος που γίνεται η διαίρεση με το y_i^* είναι ότι η συμβιβαστική λύση δεν είναι ανεξάρτητη από την κλίμακα. Η ανεξαρτησία κλίμακας, ένα σημαντικό κριτήριο σε προβλήματα απόφασης που αφορούν ομάδες, μπορεί να αποτρέψει τους λήπτες απόφασης από το να αλλάξουν τεχνηέντως την κλίμακα για να επιτύχουν ένα καλύτερο αποτέλεσμα για τους εαυτούς τους. Ας σημειωθεί ότι όταν αλλαχθεί η κλίμακα του y_i , αλλάζει κατά τον ίδιο τρόπο και η συμβιβαστική λύση. Είναι δυνατόν να επιτευχθεί ανεξαρτησία κλίμακας, αλλάζοντας ελαφρώς τον τύπο. Αυτό γίνεται διαιρώντας με τον παράγοντα y_i^* .

Το p παίρνει συνήθως τις χαρακτηριστικές τιμές $p=1,2,\infty$. Η επιλογή του p υποδεικνύει τον τρόπο που θα επιλυθεί το πρόβλημα της διάστασης ανάμεσα στις εναλλακτικές λύσεις y_i που παρέχονται και στην ιδανική λύση y^* .

1) Όταν $p=1$: Η παραπάνω απόσταση καλείται «απόσταση πολεοδομικών τετραγώνων» ή «απόσταση Μανχάτταν» (Zeleny, 1982) : Η κίνηση νοείται μόνο κατά τη διεύθυνση των τετμημένων ή των τεταγμένων. Αυτή η επιλογή εκφράζει τη μέγιστη απαξίωση του λήπτη απόφασης για το μέγεθος της απόκλισης του κάθε κριτηρίου ξεχωριστά από την ιδανική τιμή. Αυτό που μετράει είναι το συνολικό τους άθροισμα. Οπότε η εξ.(1) παίρνει τη μορφή:

$$r(y;1,w) = \sum_i w_i \left| \frac{y_i}{y_i^*} - 1 \right| \quad \text{εξ. (2)}$$

2) Όταν $p=2$: Είναι η γνωστή ευκλείδεια απόσταση. Από τη σχέση (1) λαμβάνεται:

$$r(y;2,w) = \left[\sum_i w_i^2 \left| \frac{y_i - y_i^*}{y_i^*} \right|^2 \right]^{1/2} \quad \text{εξ. (3)}$$

3) Όταν $p=\infty$: Η σχέση (1) καλείται στην περίπτωση αυτή και απόσταση Chebyshev (Cantrell, C.D., 2000): Η απόσταση ανάμεσα σε δύο διανύσματα είναι η μέγιστη των διαφορών τους κατά μήκος κάθε άξονα συντεταγμένων. Ο λήπτης απόφασης προσπαθεί να ελαχιστοποιήσει τη μέγιστη των αποκλίσεων του κάθε κριτηρίου. Από την εξ.(1):

$$r(y;\infty,w) = \max_i \left(w_i \left| \frac{y_i}{y_i^*} - 1 \right| \right) \quad \text{εξ. (4)}$$

Στις σχέσεις (1)-(4) w_i =τα βάρη. Τα βάρη (δηλαδή η σημασία που δίνεται στο κάθε κριτήριο), μπορεί να είναι τόσο υποκειμενικά (να καθορίζονται δηλαδή εξολοκλήρου από το λήπτη απόφασης) όσο και αντικειμενικά (δηλαδή να είναι συνάρτηση της εντροπίας της πληροφορίας (Zeleny, 1982)), y_i =το διάνυσμα των κριτηρίων, y_i^* = το διάνυσμα του βέλτιστου (ιδεατού) κριτηρίου.

Αποδεικνύεται ότι οι τιμές αυτές (για $1 \leq p \leq \infty$) ανήκουν σε ένα (κατά Pareto) μη κυριαρχούμενο σύνολο.

3. ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ

3.1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Σε αυτήν την εργασία εξετάζεται η βέλτιστη θέση κατασκευής ενός φράγματος στην περιοχή Λιβαδείου Λαρίσης (Καρασαββίδης, 2003). Οι προτεινόμενες τοποθεσίες (**εναλλακτικές λύσεις**) είναι τρεις: 1) Σαραντάπορο, 2) Πόρτες και 3) Βουβάλια. Για να βρεθεί η βέλτιστη τοποθεσία θεωρήθηκαν οι εξής τέσσερις ιδιότητες (x_i) των φραγμάτων: α) Ο όγκος του φράγματος, (x_1), β) Ο όγκος του αποθηκευμένου νερού που συγκρατεί το φράγμα, (x_2), γ) Η επιφάνεια του αποθηκευμένου νερού (καθρέπτης), (x_3) και δ) Το ύψος υδατόπτωσης, (x_4). Οι ιδιότητες αυτές παίρνουν διαφορετικές τιμές σε κάθε μια από τις τρεις διαφορετικές θέσεις φράγματος που προτείνονται.

Τα **κριτήρια** (f_i) μέσω των οποίων γίνεται η επιλογή της βέλτιστης θέσης φράγματος είναι τα εξής:

- 1) Το κόστος κατασκευής του φράγματος (f_1). Το κόστος μειώνεται, όσο μικρότερος είναι ο όγκος του φράγματος.
- 2) Η προστασία από τις πλημμύρες (f_2). Όσο μεγαλύτερος είναι ο όγκος του αποθηκευμένου νερού τόσο πιο αποτελεσματική είναι η προστασία από τις πλημμύρες.
- 3) Η προστασία του περιβάλλοντος και η αισθητική τοπίου (f_3). Όσο μεγαλύτερη η επιφάνεια του καθρέπτη του ταμιευτήρα, τόσο περισσότερο αυξάνεται η προστασία του περιβάλλοντος και η αισθητική του τοπίου.
- 4) Η ενεργειακή απόδοση του φράγματος (f_4). Όσο μεγαλύτερος ο αποθηκευμένος

όγκος νερού και όσο μεγαλύτερο το ύψος υδατόπτωσης τόσο περισσότερο αυξάνεται η παρεχόμενη ενέργεια.

- 5) Προσβασιμότητα (f_5). Είναι ένα κριτήριο που η βαθμολόγησή του έγινε βάσει της εγγύτητας της θέσης του κάθε φράγματος σε οδούς καθώς και των δυσκολιών δυσβατότητας λόγω του τοπογραφικού αναγλύφου της περιοχής.

Τα παραπάνω μπορούν να παρασταθούν με σχέσεις της μορφής $y=f(x)$:

Κόστος = $\gamma \cdot [\text{Όγκος φράγματος}]$ ή $y_1=f_1(x_1)=\gamma x_1$, όπου γ είναι η τιμή σε € ανά m^3 του ολικού όγκου του φράγματος. Η τιμή αυτή λήφθηκε από υπηρεσίες του ΥΠΕΧΩΔΕ

Προστασία από πλημμύρες = $\delta \cdot [\text{Όγκος αποθηκευμένου νερού}]$ ή $y_2=f_2(x_2)=\delta x_2$

Αισθητική τοπίου = $\varepsilon \cdot [\text{Καθρέπτης}]$ ή $y_3=f_3(x_3)=\varepsilon x_3$.

Ενέργεια = $\zeta \cdot [\text{Ύψος υδατόπτωσης}] \cdot [\text{Όγκος νερού}]$ ή $y_4=f_4(x_2, x_4)=\zeta x_4 x_2$, όπου η ενέργεια εκφράζεται σε kWh και η σταθερά ζ υπολογίστηκε με βάση τιμολόγια της ΔΕΗ

Οι σταθερές δ , ε είναι μεγαλύτερες του μηδενός και αξιολογήθηκαν με κατά το δυνατόν αντικειμενικό τρόπο.

Υπάρχει λοιπόν ένας πενταδιάστατος χώρος των αποφάσεων (για κάθε μια από τις τρεις θέσεις υπάρχει ένα διαφορετικό διάνυσμα $x=(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$) και ένας επίσης πενταδιάστατος χώρος των τιμών $y=(y_1, y_2, y_3, y_4, y_5)$, που δεν μπορούν να παρασταθούν εύκολα.

Το πρόβλημα μαθηματοποιείται πλέον ως εξής:

$$\min y_1=f_1(x)=\gamma x_1 \quad \text{εξ. (5)}$$

$$\max y_2=f_2(x)=\delta x_2 \quad \text{εξ. (6)}$$

$$\max y_3=f_3(x)=\varepsilon x_3 \quad \text{εξ. (7)}$$

$$\max y_4=f_4(x)=\zeta x_2 x_4 \quad \text{εξ. (8)}$$

$$\max y_5=f_5(x)$$

3.2. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ

Από μια προκαταρκτική μελέτη των φραγμάτων (Καρασαββίδης, 2003) προέκυψαν οι εξής τιμές:

1η Εναλλακτική λύση: Ιδιότητες φράγματος Σαρανταπόρου

- όγκος αποθηκευμένου νερού=55838281 m^3
- επιφάνεια αποθηκευμένου νερού=510000 m^2
- όγκος φράγματος=1880000 m^3
- ύψος υδατόπτωσης=32,9 m

2η Εναλλακτική λύση: Ιδιότητες φράγματος Πορτών

- όγκος αποθηκευμένου νερού=67804668 m^3
- επιφάνεια αποθηκευμένου νερού=511000 m^2
- όγκος φράγματος=2257812 m^3
- ύψος υδατόπτωσης=39,4 m

3η Εναλλακτική λύση: Ιδιότητες φράγματος Βουβαλίων

- όγκος αποθηκευμένου νερού=50800000 m^3
- επιφάνεια αποθηκευμένου νερού=307500 m^2
- όγκος φράγματος=3096843 m^3
- ύψος υδατόπτωσης=52,8 m

Πίνακας 1. Ο Πίνακας F (I,J).

ΚΡΙΤΗΡΙΑ (y_i)	ΣΑΡΑΝΤΑΠΟΡΟΣ	ΠΟΡΤΕΣ	ΒΟΥΒΑΛΙΑ
ΚΟΣΤΟΣ	5,4	4,5	2,2
ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΑΠΟ ΠΛΗΜΜΥΡΕΣ	8,6	10,0	7,5
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ-ΑΙΣΘΗΤΙΚΗ ΤΟΠΙΟΥ	9,9	10,0	6,0
ΕΝΕΡΓΕΙΑ	7,4	10,0	9,5
ΠΡΟΣΒΑΣΙΜΟΤΗΤΑ	8,0	9,0	9,0

Το σύμβολο J είναι για τις εναλλακτικές λύσεις (alternatives) ενώ το σύμβολο I για τα διαφορετικά κριτήρια. Ο πίνακας F(I,J) αποτελείται από στοιχεία τα οποία δείχνουν την αξία των διαφορετικών εναλλακτικών λύσεων, υπό διαφορετικά κριτήρια. Δείχνει δηλαδή την «βαθμολογία» ή την αξιολόγηση της κάθε εναλλακτικής λύσης με βάση τα διάφορα κριτήρια. Η «βαθμολογία» αυτή προέκυψε από τις εξισώσεις (5)-(8) και με βάση κατά το δυνατόν αντικειμενικές εκτιμήσεις, όπως ήδη αναφέρθηκε.

Ο υπολογισμός των αποστάσεων για τα διάφορα βάρη και για τα διάφορα p γίνεται βάσει προγράμματος σε γλώσσα προγραμματισμού Visual Fortran.

Παρακάτω παρατίθενται οι πίνακες αποτελεσμάτων του προγράμματος:

Πίνακας 2. Αποτελέσματα του προγράμματος (οι αποστάσεις L_p από μια ιδεατή τιμή) για επιλογές (διανύσματα) βαρών $W_0...W_8$, θέτοντας $p=1$, για κάθε μία από τις εναλλακτικές λύσεις.

J	W_0	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5	W_6	W_7	W_8
1	2,585	2,985	2,585	2,785	3,582	3,290	4,185	3,170	4,560
2	0,281	0,506	0,506	0,563	0,563	0,281	0,281	0,506	0,478
3	3,637	4,564	4,437	4,726	5,703	5,264	4,146	6,437	6,346

Πίνακας 3. Αποτελέσματα του προγράμματος (οι αποστάσεις L_p από μια ιδεατή τιμή) για επιλογές (διανύσματα) βαρών $W_0...W_8$, θέτοντας $p=2$, για κάθε μία από τις εναλλακτικές λύσεις.

J	W_0	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5	W_6	W_7	W_8
1	1,521	1,787	1,521	1,660	2,075	1,894	2,607	1,805	2,738
2	0,281	0,506	0,506	0,563	0,563	0,281	0,281	0,506	0,478
3	1,798	2,362	2,340	2,514	2,947	2,755	1,939	3,387	3,127

Πίνακας 4. Αποτελέσματα του προγράμματος (οι αποστάσεις L_p από μια ιδεατή τιμή) για επιλογές (διανύσματα) βαρών $W_0...W_8$, θέτοντας $p=80$, για κάθε μία από τις εναλλακτικές λύσεις.

J	W_0	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5	W_6	W_7	W_8
1	1,009	1,210	1,009	1,200	1,400	1,210	1,816	1,120	1,816
2	0,281	0,506	0,506	0,563	0,563	0,281	0,281	0,506	0,478
3	1,014	1,800	1,800	2,000	2,000	2,000	1,014	2,017	1,800

Σημείωση: α) Θεωρήθηκε ότι η τιμή $p=80$ είναι αρκούντως μεγάλη. β) Η επιλογή των βαρών ενέχει μια υποκειμενική κρίση, δεν είναι όμως αυθαίρετη και έχει τηρηθεί μια ιεράρχηση στη βαθμολόγησή τους. (Zeleny, 1982; Μπάκα, 2006).

Τελικά η εναλλακτική λύση που ελαχιστοποιεί τη απόσταση από την ιδανική τιμή είναι στην τοποθεσία Πόρτες αφού –όπως φαίνεται και στους πίνακες- επιτυγχάνει τη μικρότερη απόσταση σε όλες τις επιλογές βαρών και ειδικά στην επιλογή $p=2$.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο συμβιβαστικός προγραμματισμός είναι μια αξιόπιστη μέθοδος για την επίλυση προβλημάτων που έχουν να κάνουν με αλληλοσυγκρουόμενα κριτήρια. Αυτό φάνηκε και στο αριθμητικό παράδειγμα, αφού η εναλλακτική λύση στη θέση Πόρτες παρουσιάζονταν εκ των προτέρων ως η καλύτερη. Ο συμβιβαστικός προγραμματισμός παρέχει επίσης στο λήπτη απόφασης και αρκετή ευελιξία χάρη στην επιλογή διαφορετικών τιμών του p .

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Cantrell, C.D., 2000. *Modern Mathematical Methods for Physicists and Engineers*. Cambridge University Press.
- Καρασαββίδης, Π., 2003. Εφαρμογή της Πολυκριτηριακής Ανάλυσης (Συμβιβαστικός Προγραμματισμός) στη Διαχείριση Υδατικών Πόρων στην Περιοχή Λιβαδείου Λαρίσης. *Επιλογή Βέλτιστης Θέσης Φράγματος*. Μεταπτυχιακή Διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Krippendorff, K., 1986. *A Dictionary of Cybernetics*. Norfolk VA, The American Society of Cybernetics.
- Μπάκα, Μ., 2006. *Διαχείριση Υδατικών Πόρων με Μεθόδους Πολυκριτηριακής Ανάλυσης (Συμβιβαστικός Προγραμματισμός) και Εφαρμογή στην Υδρολογική Λεκάνη του Ποταμού Νέστου*. Μεταπτυχιακή Διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Po-Lung, Yu, 1985. *Multiple-Criteria Decision Making, Concepts, Techniques, and Extension*. Plenum Press, Lawrence, Kansas.
- Rivera, J., Velazquez, J., Villalobos, A., Hidalgo, J., Celis, E., 2003. *A decision support system for the operation of a reservoirs system*. Water Resources Management II, WIT Press, Southampton, Boston.
- Simon, H.A., 1983. *Reason in human affairs*. Stanford University Press.
- Sousa, V.G., Lemos, F.J., 1998. *Simulation and multicriteria decision analysis approach on water resources planning*. Computational Methods in Water Resources XII. Computational Mechanics Publications, Southampton, Boston.
- Wayne Winston, L., 1994. *Operations Research, Applications and Algorithms*, 3rd edition. Wadsworth, Belmont, California.
- Zeleny Milan, 1982. *Multiple Criteria Decision Making*. McGraw-Hill, New York.

ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΩΝ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΧΩΡΩΝ ΜΕ ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΤΗΣ ΑΣΑΦΟΥΣ ΛΟΓΙΚΗΣ. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΛΕΚΑΝΗ ΤΟΥ ΝΕΣΤΟΥ

Χ. Τζιμόπουλος, Σ. Γιαννόπουλος και Χ. Ευαγγελίδης
Εργαστήριο Υδραυλικών Έργων και Διαχείρισης Περιβάλλοντος,
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο παρόν άρθρο εφαρμόζεται η θεωρία της πολυκριτηριακής ανάλυσης σε περιβάλλον ασαφούς λογικής, προκειμένου να αποφασιστεί η επιλογή της καλύτερης θέσης για την κατασκευή ενός φράγματος στη λεκάνη απορροής του ποταμού Νέστου. Για το σκοπό αυτό επιλέγησαν τρεις θέσεις για την κατασκευή φράγματος: α) στη λεκάνη του Αρκουδορέματος, β) στη λεκάνη του Βαθυρέματος και γ) στη λεκάνη της Αγ. Βαρβάρας με αντικειμενικό σκοπό την βέλτιστη επιλογή ενός εξ αυτών. Σε όλα τα στάδια της ανάλυσης και σε όλα τα κριτήρια υπεισέρχεται η αβεβαιότητα ως προς τον καθορισμό των στοιχείων και το πρόβλημα με την εισαγωγή της ασαφούς λογικής καθίσταται περισσότερο πολύπλοκο. Για το σκοπό αυτό το πρόβλημα αντιμετωπίστηκε εδώ με έναν αλγόριθμο του Yager(1981) και έτσι επιτεύχθηκε η βέλτιστη απόφαση στην επιλογή του φράγματος.

Λέξεις κλειδιά: Ασαφής, Πολυκριτηριακή, διαχείριση, Υδατικοί πόροι.

MULTIOBJECTIVE DECISION MAKING IN WATER RESOURCES MANAGEMENT WITH FUZZY INFORMATION

C. Tzimopoulos, S. Yannopoulos and C. Evangelides
Laboratory of Hydraulics and Environmental Management,
Aristotle University of Thessaloniki

ABSTRACT

In the present paper we apply the multiobjective decision theory in a fuzzy environment, in order to decide on the best placement of a dam concerning Nestos watershed. Three places for dam construction were selected a) Arkoudorema, b) Bathyrema, and c) Agia Barbara. Multiobjective decisions problems present uncertainties, requiring the selection of one element from a set $\{X\}$ of possible alternatives, given also a collection of criteria of concern to the decision maker. Consequently two problems arise: a) evaluating how well each alternative or choice satisfies each objective and b) combining the objectives into an overall decision function D from which the best alternative is selected.

Key words: Fuzzy, multiple criteria, management, water resources.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι διαθέσιμοι υδατικοί πόροι στη χώρα μας παρουσιάζουν έντονη χωρική και χρονική κατανομή. Ως εκ τούτου απαιτείται κατάλληλη διαχείριση και ορθολογικός σχεδιασμός των Υδραυλικών Έργων με βάση τις αρχές της αειφόρου ανάπτυξης για την εξασφάλιση και διατήρηση της οικολογικής σταθερότητας στο περιβάλλον για να υπάρχει δυναμική ισορροπία και ταυτόχρονη κοινωνική αποδοχή των έργων.

Η πολυκριτηριακή ανάλυση εφαρμόζεται ευρέως σε προβλήματα διαχείρισης υδατικών συστημάτων για τα οποία η βέλτιστη απόφαση στηρίζεται σε περισσότερες από μία αντικειμενικές συναρτήσεις ή στόχους. Η πολυκριτηριακή ανάλυση θεωρείται ως μια σύνθετη και δυναμική διαδικασία στην οποία διακρίνονται δύο επίπεδα:

- Το επίπεδο διαχείρισης
- Το επίπεδο του μηχανικού.

Το επίπεδο διαχείρισης ή άνω επίπεδο ορίζει τους στόχους, πιθανόν αναγνωρίζει το επίπεδο των ιδιοτήτων και επιλέγει την τελική βέλτιστη εναλλακτική λύση. Το επίπεδο του μηχανικού έχει δύο υποεπίπεδα, δηλαδή ένα ενδιάμεσο και ένα επίπεδο σχεδιασμού.

Για την επίλυση ενός προβλήματος πολυκριτηριακής ανάλυσης, αναπτύχθηκαν πολλές μέθοδοι και θα πρέπει κάθε φορά να επιλέγεται η πιο κατάλληλη για το υφιστάμενο πρόβλημα. Μεταξύ των πολλών μεθόδων μνημονεύονται η ELECTRE I, ELECTRE II, ο συμβιβαστικός προγραμματισμός κλπ. (Zeleny, 1982, Μπάκα, 2006)

Σε όλα τα παραπάνω στάδια της ανάλυσης και σε όλα τα κριτήρια υπαισέρχεται η αβεβαιότητα ως προς τον καθορισμό των στοιχείων και το πρόβλημα με την εισαγωγή της ασαφούς λογικής καθίσταται περισσότερο πολύπλοκο. Τα τελευταία τριάντα χρόνια αναπτύχθηκαν διάφορες τεχνικές και αλγόριθμοι που λαμβάνουν υπόψη τις διάφορες αβεβαιότητες και με βάση αυτές υπολογίζεται πλέον η πολυκριτηριακή ανάλυση υπό καθεστώς αβεβαιότητας. Ως λήψη απόφασης σε ασαφές περιβάλλον θεωρείται η διαδικασία απόφασης στην οποίαν οι στόχοι και οι περιορισμοί είναι ασαφείς εκ φύσεως. Οι Belmann and Zadeh, (1970) έδωσαν στη λέξη απόφαση τον ακόλουθο ορισμό:

$$\text{Απόφαση} = \text{Συρροή των στόχων και των περιορισμών},$$

θεωρώντας ότι όλοι οι στόχοι παρουσιάζουν το ίδιο ενδιαφέρον. Οι Yager and Basson, (1975) και ο Yager (1977, 1978, 1981) παρουσίασαν μια νέα διαδικασία για την πολυκριτηριακή ανάλυση, θεωρώντας ότι ο κάθε στόχος παρουσιάζει ένα ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τον λήπτη της απόφασης.

Στο παρόν άρθρο εξετάζεται η εφαρμογή της παραπάνω θεωρίας του Yager(1981) στη λεκάνη του Νέστου, όπου επιλέχθηκε η διαχείριση τριών φραγμάτων με τους αντίστοιχους ταμιευτήρες σε παραποτάμους του Νέστου: 1) στη λεκάνη του Αρκουδορέματος (AR), 2) στη λεκάνη του Βαθυρέματος (BA) και 3) στη λεκάνη της Αγ. Βαρβάρας (AB). Ως κριτήρια για την βέλτιστη επιλογή επιλέγησαν τα ακόλουθα: α) Το κόστος του φράγματος, β) η επίδραση στο περιβάλλον και στην αισθητική του τοπίου, γ) η ενέργεια και δ) η προστασία από τις πλημμύρες. Τέλος τα κριτήρια αυτά θεωρήθηκε ότι παρουσιάζουν τις ακόλουθες προτιμήσεις ως προς τον λήπτη της απόφασης: b_1, b_2, b_3 , και b_4 .

2. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

2.1. ΓΕΝΙΚΟΤΗΤΕΣ

Στην κοινή λογική ένα γεγονός μπορεί να είναι αληθές ή όχι, ανάλογα με την ικανοποίηση ή όχι των κριτηρίων που έχουν τεθεί. Αντιθέτως, στην ασαφή λογική ένα

γεγονός μπορεί να είναι αληθές, αλλά σε μερικό βαθμό. Η ασαφής λογική αποτελεί μια πιο γενική μορφή της κοινής λογικής, καθώς δίνεται η δυνατότητα χειρισμού της έννοιας «μερικώς αληθές». «Ασαφές, λοιπόν, καλείται ένα σύνολο στοιχείων χωρίς ευδιάκριτα όρια, όπου είναι δυνατόν το καθένα από αυτά να ανήκει μερικώς στο σύνολο».

Έστω ένα σύνολο X . Το A καλείται υποσύνολο στο X , εάν αποτελείται από ένα σύνολο διατεταγμένων ζευγών της μορφής:

$$A = \{[x, \mu_A(x)]; x \in X, \mu_A(x) \in [0,1]\}, \quad (1)$$

όπου $\mu_A(x)$ η τιμή της συνάρτησης συμμετοχής (membership function) του x στο A .

Πεδίο ορισμού (support) ενός ασαφούς συνόλου A ονομάζεται το σύνολο εκείνο των στοιχείων x , των οποίων η συνάρτηση εμπιστοσύνης έχει θετικές τιμές, δηλαδή:

$$\text{supp}(A) = \{x; \mu_A(x) > 0\}.$$

Το πεδίο ορισμού ενός ασαφούς συνόλου αποτελεί διάστημα, όταν ισχύει η συνθήκη της κυρτότητας. Ένα ασαφές σύνολο είναι κυρτό, όταν η συνάρτηση εμπιστοσύνης που το περιγράφει αυξάνεται και έπειτα μειώνεται μονοτονικά και δεν υπάρχει τοπικό ελάχιστο. Για το ασαφές κυρτό σύνολο A , για κάθε $\lambda \in [0,1]$ και $(x_1, x_2) \in X$, ισχύει η ανισότητα :

$$\mu_A[\lambda x_1 + (1-\lambda)x_2] \geq \mu_A(x_1) \wedge \mu_A(x_2) = \min[\mu_A(x_1), \mu_A(x_2)]. \quad (2)$$

2.2. ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Στα προβλήματα της πολυκριτηριακής ανάλυσης με αβεβαιότητα απαιτείται η επιλογή ενός στοιχείου από ένα σύνολο $\{X\}$ δυνατών εναλλακτικών αποφάσεων με δεδομένα τα κριτήρια ή τους στόχους του λήπτη αποφάσεως. Έτσι δημιουργούνται δύο προβλήματα:

- Να γίνει εκτίμηση κατά πόσο κάθε εναλλακτική απόφαση ικανοποιεί τους στόχους ή τα κριτήρια ,
- να συδυαστούν όλοι οι στόχοι σε ένα γενικό στόχο ή συνάρτηση απόφασης D , από την οποία να επιλεγεί η καλύτερη εναλλακτική απόφαση.

Ιδιαίτερα όταν διατίθεται ένα σύνολο $\{A\} = \{A_1, A_2, A_3, \dots, A_p\}$ από στόχους που πρέπει να ικανοποιηθούν, η γενική αντικειμενική συνάρτηση είναι:

$$D = A_1 \text{ και } A_2 \text{ και } A_3 \dots \text{ και } A_p$$

και επιζητούνται λύσεις που να ικανοποιούν τους στόχους A_1 και A_2 και $A_3 \dots$ και A_p . Η μαθηματική μορφή για τον σύνδεσμο «και» στην ασαφή λογική είναι η τομή των ασαφών υποσυνόλων και η γενική αντικειμενική συνάρτηση γίνεται:

$$D = A_1 \cap A_2 \cap A_3 \dots \cap A_p \quad (3)$$

και αντίστοιχα για την συνάρτηση συμμετοχής:

$$\mu_D = \mu_{A_1} \wedge \mu_{A_2} \wedge \mu_{A_3} \wedge \dots \wedge \mu_{A_p}. \quad (4)$$

Σύμφωνα με τους Belmann and Zadeh (1970) η απόδοση του συνδέσμου «και» με

την τομή σημαίνει ότι ερμηνεύεται κατά σκληρή (hard) έννοια, δηλαδή δεν υπάρχουν αλληλεπιδράσεις μεταξύ των συναρτήσεων συμμετοχής. Στην περίπτωση μιας ελαστικότερης (soft) ερμηνείας χρησιμοποιείται από τους ίδιους το αλγεβρικό γινόμενο. Τελικά με βάση την πρώτη σκληρή ερμηνεία η παραπάνω έκφραση της συνάρτησης συμμετοχής γίνεται:

$$\mu_D = \text{Min}(\mu_{A_1}, \mu_{A_2}, \mu_{A_3}, \dots, \mu_{A_p}). \quad (5)$$

Η βέλτιστη τώρα λύση είναι $\text{Max}\{\mu(D)\}$, δηλαδή:

$$\text{Max}\{\mu_D\} = \text{Max}\{\min(\mu_{A_1}, \mu_{A_2}, \mu_{A_3}, \dots, \mu_{A_p})\} \quad (6)$$

Για την περίπτωση που εισάγεται ένα σύνολο προτιμήσεων $\{P\} = \{b_1, b_2, b_3, \dots, b_p\}$, η παραπάνω γενική αντικειμενική συνάρτηση D γίνεται:

$$D = M(A_1, b_1) \cap M(A_2, b_2) \cap M(A_3, b_3) \dots \cap M(A_p, b_p) = \bigcap_{i=1}^p (b'_i \cup A_i) \quad (7)$$

$$b'_i = 1 - b_i,$$

όπου $M(A_i, b_i)$ αποτελεί πλέον μια νέα συνάρτηση των στόχων A_i και των προτιμήσεων b_i . Έτσι το μέγιστο τώρα της νέας συνάρτησης γίνεται:

$$\text{Max}\{\mu_D\} = \text{Max}\{\min\{\mu_{C_1}, \mu_{C_2}, \mu_{C_3}, \dots, \mu_{C_p}\}\} \quad (8)$$

$$\text{όπου: } C_i = (1 - b_i) \cup A_i.$$

3. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΥ ΝΕΣΤΟΥ.

Ο ποταμός Νέστος είναι ένας διακρατικός ποταμός της Βαλκανικής χερσονήσου και εκτείνεται στη Δυτική Βουλγαρία και τη Βόρεια Ελλάδα (Myloropoulos et al., 2004, Μπάκα, 2006). Πηγάζει από το όρος Ρίλα της Βουλγαρίας και στην αρχή αποτελείται από δύο βραχίονες, τον Άσπρο και Μαύρο Νέστο, που στην πορεία τους ενώνονται με πολλούς άλλους παραποτάμους. Το όνομα του στα βουλγάρικα είναι Μέστα και εισέρχεται στο ελληνικό έδαφος από τα βορειοδυτικά του νομού Δράμας, από τις απολήξεις του Όρβηλου και της Ροδόπης. Μια σειρά παραπόταμοι που πηγάζουν από το ελληνικό, δυτικό τμήμα της οροσειράς της Ροδόπης, ενώνουν τα νερά τους με αυτά του Νέστου. Οι κυριότεροι από αυτούς είναι οι Δεσπάτης, Διαβολόρεμα και Αρκουδόρεμα. Ο ποταμός διασχίζει ολόκληρο το νομό Δράμας, διέρχεται μεταξύ των συνόρων των νομών Καβάλας και Ξάνθης και αφού εγκαταλείψει τους ορεινούς όγκους, εξαπλώνεται νότια προς το Θρακικό πέλαγος, με τη μορφή ριπιδίου, απέναντι από τη Θάσο, σχηματίζοντας Δέλτα.

Ο ποταμός έχει συνολικό μήκος 234 km, εκ των οποίων τα 130 km βρίσκονται στο ελληνικό έδαφος και τα υπόλοιπα στο βουλγαρικό. Η λεκάνη απορροής ανέρχεται σε 6 178 km², από τα οποία το 60 % περίπου ανήκει στη Βουλγαρία. Έχει έντονα ορεινό χαρακτήρα, περιβάλλεται από ιδιαίτερα μεγάλα υψόμετρα και χαρακτηρίζεται από ισχυρές κλίσεις. Στο βουλγαρικό τμήμα της λεκάνης απορροής περιλαμβάνεται και μια έκταση περίπου 565 km² της λεκάνης απορροής του Δεσπάτη, τα ύδατα της οποίας

έχουν εκτραπεί προς τη λεκάνη απορροής του Έβρου. Εκτός από τον κυρίως ποταμό, τους παραποτάμους και της λιμνοθάλασσες, το σύστημα του Νέστου περιλαμβάνει μεγάλα αρδευτικά δίκτυα με τάφρους και αυλάκια, στους κάμπους της Σταυρούπολης, Χρυσούπολης και Ξάνθης. Στον παρακάτω χάρτη φαίνεται η λεκάνη απορροής του Νέστου στο Ελληνικό έδαφος καθώς και οι τρεις υπολεκάνες της υπό έρευνα περιοχής AR(Αρκουδόρεμμα), BA(Βαθύρεμμα), και AB (Αγία Βαρβάρα)

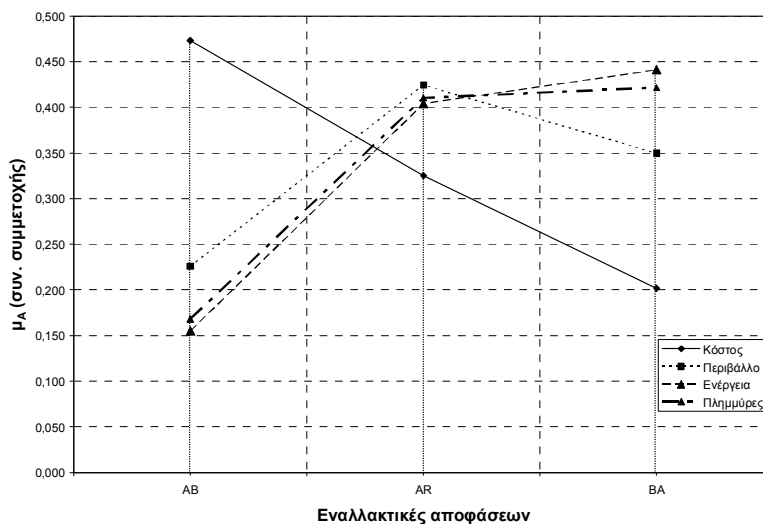


Σχήμα 1. Υδρολογική λεκάνη Νέστου (Υπολεκάνες AR, BA, AB)

Η έρευνα στις τρεις αυτές υπολεκάνες εστιάστηκε σε μια προεκτίμηση του κόστους εκάστου χωμάτινου φράγματος, του όγκου και του εμβαδού κάθε ταμιευτήρα, και της παραχθησόμενης ενέργειας σε kW (Μπάκα, 2006). Από τα στοιχεία αυτά προέκυψαν τα κριτήρια που θα πρέπει να πληρεί κάθε εναλλακτική αποφάσεως (εν προκειμένω τα φράγματα) και τα κριτήρια αυτά (A_1, A_2, A_3 , και A_4) είναι: το μικρό κόστος (A_1), η περιβαλλοντική συνιστώσα του κάθε φράγματος (A_2), η παραγόμενη ενέργεια (A_3) και η προστασία από τις πλημμύρες (A_4). Στον παρακάτω πίνακα δίνονται σε αδιάστατη μορφή τα κριτήρια αυτά. Τα ίδια κριτήρια δίνονται στο σχ. 2.

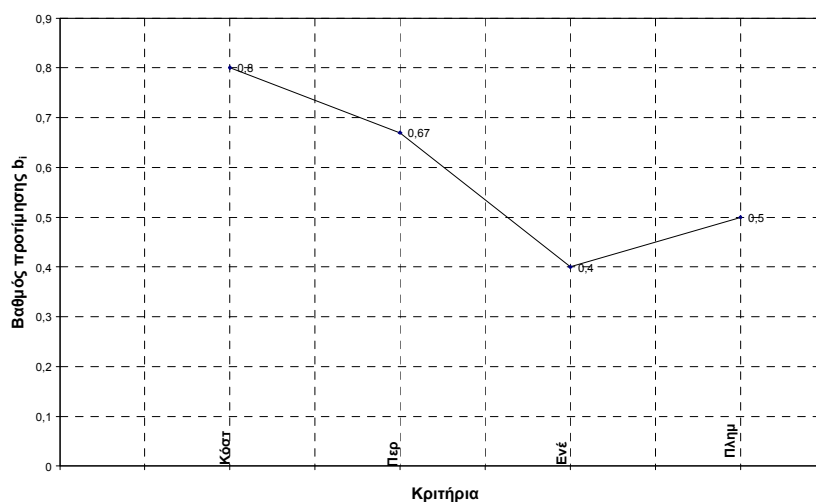
Πίνακας 1. Κριτήρια για τα τρία φράγματα

a/a	Κόστος	Περιβάλλον	Ενέργεια	Πλημμύρες
AB	0,473	0,226	0,155	0,168
AR	0,325	0,424	0,404	0,410
BA	0,202	0,350	0,441	0,422



Σχήμα 2. Κριτήρια εναλλακτικών αποφάσεων

Ταυτόχρονα έχουν καθοριστεί προτιμήσεις (b_1, b_2, b_3 , και b_4) για κάθε κριτήριο ως εξής: $b_1=0.8$, $b_2=0.67$, $b_3=0.4$, και $b_4=0.5$. Στο παρακάτω σχ. 3 φαίνονται οι προτιμήσεις αυτές.



Σχήμα 3. Βαθμοί προτεραιότητας

Τώρα το πρόβλημα μορφώνεται ως εξής:

$$X = \{ AB, AR, BA \} = \{ X_1, X_2, X_3 \}$$

$$A = \{ \text{Κόστος, Περιβάλλον, Ενέργεια, Πλημμύρες} \} = \{ A_1, A_2, A_3, A_4 \}$$

$$\Pi = \{ b_1, b_2, b_3, b_4 \}.$$

Σύμφωνα με τους συμβολισμούς του Yager(1981) τα παραπάνω σε ασαφές περιβάλλον γράφονται ως εξής:

$$\tilde{A}_1 = \left\{ \frac{0.473}{AB} + \frac{0.325}{AR} + \frac{0.202}{BA} \right\}$$

$$\tilde{A}_2 = \left\{ \frac{0.226}{AB} + \frac{0.424}{AR} + \frac{0.350}{BA} \right\}$$

$$\tilde{A}_3 = \left\{ \frac{0.155}{AB} + \frac{0.404}{AR} + \frac{0.441}{BA} \right\}$$

$$\tilde{A}_4 = \left\{ \frac{0.168}{AB} + \frac{0.410}{AR} + \frac{0.422}{BA} \right\}$$

Με βάση τις προτιμήσεις b_1, b_2, b_3 , και b_4 , γίνονται οι ακόλουθοι υπολογισμοί (Ross, 2004):

$$b_1 = 0.8, b_2 = 0.67, b_3 = 0.4, b_4 = 0.5$$

$$b'_1 = 0.2, b'_2 = 0.33, b'_3 = 0.6, b'_4 = 0.5.$$

$$\begin{aligned} \mu_{D(X_1)} &= (b'_1 \cup A_1) \cap (b'_2 \cup A_2) \cap (b'_3 \cup A_3) \cap (b'_4 \cup A_4) \\ &= (0.2 \vee 0.473) \wedge (0.33 \vee 0.226) \wedge (0.6 \vee 0.155) \wedge (0.5 \vee 0.168) = \\ &= 0.473 \wedge 0.33 \wedge 0.6 \wedge 0.5 = 0.33 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mu_{D(X_2)} &= (b'_1 \cup A_1) \cap (b'_2 \cup A_2) \cap (b'_3 \cup A_3) \cap (b'_4 \cup A_4) \\ &= (0.2 \vee 0.325) \wedge (0.33 \vee 0.424) \wedge (0.6 \vee 0.404) \wedge (0.5 \vee 0.410) = \\ &= 0.325 \wedge 0.424 \wedge 0.6 \wedge 0.5 = 0.325 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mu_{D(X_3)} &= (b'_1 \cup A_1) \cap (b'_2 \cup A_2) \cap (b'_3 \cup A_3) \cap (b'_4 \cup A_4) \\ &= (0.2 \vee 0.202) \wedge (0.33 \vee 0.350) \wedge (0.6 \vee 0.441) \wedge (0.5 \vee 0.422) = \\ &= 0.202 \wedge 0.33 \wedge 0.6 \wedge 0.5 = 0.202 \end{aligned}$$

$$\text{Max}\{\mu_D\} = \max\{\mu_{D(X_1)}, \mu_{D(X_2)}, \mu_{D(X_3)}\} = \max\{0.33, 0.325, 0.202\} = 0.33.$$

Με βάση τους υπολογισμούς αυτούς ως βέλτιστη λύση επιλέγεται το φράγμα X_1 , δηλαδή το φράγμα της Αγίας Βαρβάρας.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκε ένα πρόβλημα βέλτιστης απόφασης σχετικά με την επιλογή της καταλληλότερης θέσης ενός φράγματος, έχοντας τρεις εναλλακτικές λύσεις (θέσεις) φραγμάτων στην υδρολογική λεκάνη του Νέστου. Η βέλτιστη απόφαση ελήφθη, έχοντας θέσει και ορισμένα κριτήρια επιλογής καθώς και ορισμένες προτιμήσεις ως προς τα κριτήρια. Επειδή τα κριτήρια παρουσίαζαν αβεβαιότητες ως προς τη φύση τους, η επίλυση του προβλήματος έγινε σε ασαφές περιβάλλον με βάση τη θεωρία και τον αλγόριθμο που καθόρισε ο Yager το 1981. Τελικά επιλέχθηκε η θέση της Αγίας Βαρβάρας, ως βέλτιστη λύση, διότι η συνάρτηση συμμετοχής της ήταν η μεγαλύτερη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Belmann, R., Zadeh, L., 1970. *Decision making in a Fuzzy Environment*. Management Sciences, 17(4), B141-164.
- Μπάκα, Μ., 2006, *Διαχείριση υδατικών πόρων με μεθόδους πολυκριτηριακής ανάλυσης (συμβιβαστικός προγραμματισμός) και εφαρμογή στην περιοχή του ποταμού Νέστου*. Μεταπτυχιακή Διατριβή. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 222 σελ.
- Mylopoulos Y., Kolokytha E., Vagiona D., 2004. *Transboundary Water Management in Nestos River*. The European “Iron Curtain” Project”, Protection and Restoration of the Environment VII, Mykonos. Greece. pp. 1-8.
- Ross, T., 2004. *Fuzzy Logic with Engineering Applications*, Wiley, England, 628 pp.
- Yager, R., Basson, D., 1975. *Decision making with Fuzzy Sets*, Decision Sciences, 6:

590-600.

Yager, R., 1977. *Multiobjective Decision using Fuzzy Sets*, Decision Sciences, Int. J. Man-Machine Studies, 9: 375-382.

Yager, R., 1978. *Fuzzy Decision making including unequal objectives*, Fuzzy Sets and Systems, 1: 87-95.

Yager, R., 1981. *Concepts, Theory, and Techniques. A new Methodology for Ordinal Multiobjective Decisions based on Fuzzy Sets*, Decision Sciences, 12: 589-600.

Zeleny, M., 1982. *Multiple criteria decision making*, McGraw-Hill Book Co, 563 pp.

ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΤΙΚΗ ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΗΣ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΕΞΙΣΩΣΗΣ BOUSSINESQ ΓΙΑ ΤΗ ΜΗ ΜΟΝΙΜΗ ΣΤΡΑΓΓΙΣΗ

Η. Τελόγλου¹ και Θ. Ζήσης²

¹Τμήμα Φυτικής Παραγωγής, Σχολή Τεχνολογίας Γεωπονίας

Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Θεσσαλονίκης, 57400 Σίνδος

²Τομέας Εγγείων Βελτιώσεων, Εδαφολογίας και Γεωργικής Μηχανικής
Γεωπονική Σχολή ΑΠΘ, 54124 Θεσσαλονίκη

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται μια προσεγγιστική λύση της μη γραμμικής εξίσωσης Boussinesq, η οποία περιγράφει το πρόβλημα της ασταθούς στράγγισης μεταξύ παράλληλων στραγγιστικών αγωγών. Η λύση βασίζεται στην ολοκληρωματική μέθοδο του Goodman, η οποία αποτελεί μερική περίπτωση της μεθόδου των ροπών. Χρησιμοποιείται μια πολυωνυμική συνάρτηση 2^{ου} βαθμού για την προσέγγιση του προφίλ της υπόγειας στάθμης. Η προσεγγιστική λύση που είναι σε απλή ρητή μορφή, συγκρινόμενη με μια αναλυτική καθώς και μια αριθμητική λύση έδωσε πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Λέξεις κλειδιά: προσεγγιστική λύση, ασταθής στράγγιση, μη γραμμική εξίσωση Boussinesq.

APPROXIMATE SOLUTION OF THE NON-LINEAR BOUSSINESQ EQUATION FOR THE UNSTEADY DRAINAGE

I. Teloglou¹ and T. Zissis²

¹Dept. of Crop production, School of Agricultural Technology
Technological Educational Institute of Thessaloniki, 57400 Sindos, Greece

²Dept. of Hydraulics, Soil Science and Agricultural Engineering
School of Agriculture, Aristotle University, 54124 Thessaloniki, Greece

ABSTRACT

In this study, an approximate solution is presented to the non-linear Boussinesq equation, which describes the unsteady one-dimensional free surface groundwater flow towards parallel drains. The approximate solution is obtained by an integral method which is based on the method of moments. A polynomial function is introduced to approximate the water table profile and the resulted solution is compared with an exact and a numerical solution.

Key words: Approximate solution, unsteady drainage, non-linear Boussinesq equation.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο σχεδιασμός ενός στραγγιστικού δικτύου με κριτήριο την ασταθή στράγγιση απαιτεί τον ακριβή προσδιορισμό της υπόγειας στάθμης μεταξύ των στραγγιστικών αγωγών. Η ροή του νερού κατά τη στράγγιση ενός εδάφους με παράλληλους στραγγιστικούς αγωγούς, θεωρώντας ότι ισχύουν οι απλοποιητικές παραδοχές των Dupuit-Forchheimer, περιγράφεται από τη γνωστή μη γραμμική μερική διαφορική εξίσωση του Boussinesq. Λόγω της μη γραμμικότητάς της, δεν είναι σήμερα γνωστές κλειστές αναλυτικές λύσεις που να ισχύουν για γενικές βοηθητικές συνθήκες. Υπάρχουν όμως αρκετές λύσεις γραμμικοποιημένων μορφών της εξίσωσης Boussinesq για το πρόβλημα της ροής μεταξύ παράλληλων στραγγιστικών αγωγών (Glover (Dumm, 1954), Krayenhoff van de Leur (1958), Maasland (1959), Terzidis (1968)). Αναλυτικές λύσεις της μη γραμμικής εξίσωσης υπάρχουν ελάχιστες. Η πρώτη ακριβής αναλυτική λύση του Boussinesq (1904) ισχύει για την περίπτωση που οι στραγγιστικοί αγωγοί επικάθονται στην αδιαπέρατη στρώση. Ο van Schilfgaarde (1963) ακολουθώντας τη μεθοδολογία του Boussinesq, πέτυχε την επέκταση της λύσης για την περίπτωση που οι στραγγιστικοί αγωγοί βρίσκονται σε μια απόσταση d πάνω από την αδιαπέρατη στρώση. Ωστόσο, η λύση αυτή είναι ακριβής για μικρούς χρόνους και αποκλίνει σημαντικά για μεγάλους χρόνους. Ακολουθώντας, ο van Schilfgaarde (1964) εφάρμοσε την μέθοδο των διαδοχικών σταθερών καταστάσεων στην υπάρχουσα λύση, προκειμένου να βελτιώσει την ακρίβειά της. Βελτιωμένη μορφή της εργασίας των παραπάνω ερευνητών, ακριβέστερη και μαθηματικώς αυστηρότερη, δίνεται από τον Τερζίδη (1969α). Προσεγγιστικές αναλυτικές λύσεις της μη γραμμικής εξίσωσης Boussinesq για προβλήματα ροής σ' ελεύθερους υδροφορείς έχουν παρουσιασθεί μεταξύ των άλλων από τους Tolikas et al. (1984), Lockington (1997) και Τελόγλου και Ζήση (2002).

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται μια προσεγγιστική λύση της μη γραμμικής εξίσωσης Boussinesq, για το πρόβλημα της ροής προς παράλληλους στραγγιστικούς αγωγούς, που βασίζεται στην ολοκληρωματική μέθοδο Goodman (Crank, 1975). Αποτελεί μερική περίπτωση της μεθόδου των ροπών και παρουσιάζει πολλές ομοιότητες με τη μέθοδο των διαδοχικών σταθερών καταστάσεων που εισήγαγε ο Lembke το 1887 (Aravin and Numeron, 1965). Για την προσέγγιση του προφίλ της υπόγειας στάθμης χρησιμοποιείται μια πολυωνυμική συνάρτηση. Η λαμβανόμενη προσεγγιστική λύση, που είναι σε απλή ρητή μορφή, συγκρίνεται με μια αριθμητική λύση και την αναλυτική λύση του Boussinesq που ισχύει για αγωγούς τοποθετημένους πάνω στο αδιαπέρατο υπόστρωμα.

2. ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

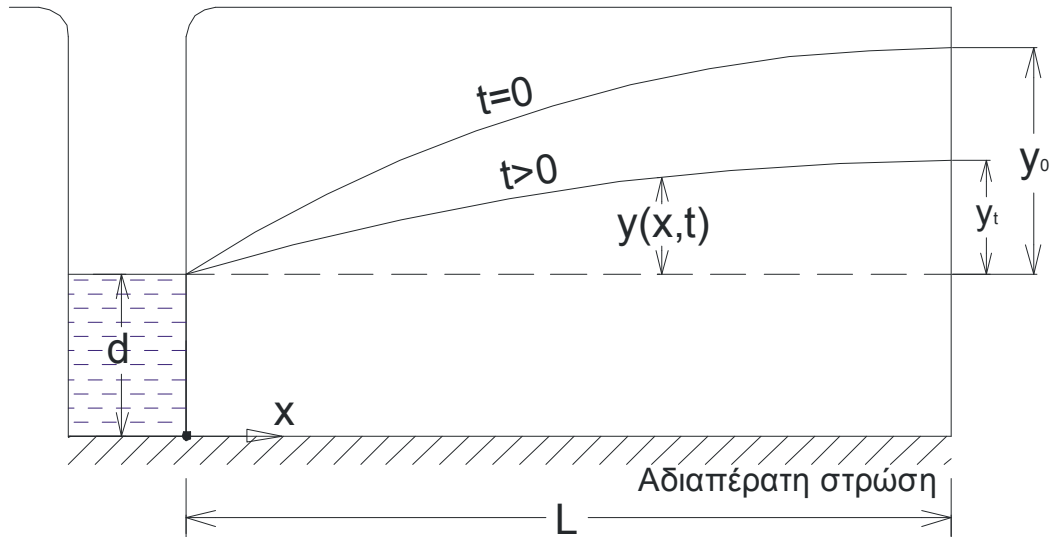
Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται διαγραμματικά το πρόβλημα της ασταθούς ροής προς στραγγιστική τάφρο που ο πυθμένας της εδράζεται πάνω στην οριζόντια αδιαπέρατη στρώση. Αρχικά θεωρείται ότι η υπόγεια στάθμη έχει ελλειπτικό σχήμα. Η στάθμη του νερού μέσα στην τάφρο διατηρείται στο ύψος d , ενώ το ύψος της υπόγειας στάθμης στο μέσον της ισαποχής και πάνω από το επίπεδο της στάθμης του νερού στην τάφρο είναι y_0 . Θεωρώντας ότι το έδαφος είναι ομογενές και ισότροπο και επιπλέον ισχύουν οι παραδοχές των Dupuit-Forchheimer, το πρόβλημα της ασταθούς ροής περιγράφεται από τη μη γραμμική μερική διαφορική εξίσωση του Boussinesq:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[(y + d) \frac{\partial y}{\partial x} \right] = \frac{S}{K} \frac{\partial y}{\partial t} \quad (1)$$

και τις βοηθητικές συνθήκες

$$y(L,0) = y_0, \quad y(0,t) = 0 \quad \text{και} \quad \frac{\partial y(L,t)}{\partial x} = 0 \quad (2\alpha,\beta,\gamma)$$

όπου $y=y(x,t)$ είναι το ύψος της υπόγειας στάθμης σε απόσταση x από την τάφρο και χρόνο t μετά την έναρξη της στράγγισης, K , S είναι η υδραυλική αγωγιμότητα και η ειδική σε νερό απόδοση του εδάφους, αντίστοιχα.



Σχήμα 1. Ασταθής ροή προς στραγγιστική τάφρο

Εισάγοντας τις αδιάστατες μεταβλητές

$$Y = \frac{y}{y_0}, \quad \xi = \frac{x}{L}, \quad \tau = \frac{K(y_0 + d)t}{2SL^2} \quad (3\alpha,\beta,\gamma)$$

η διαφορική εξίσωση (1) με τις βοηθητικές συνθήκες (2α,β,γ) μπορούν να γραφούν σε αδιάστατη μορφή, όπως παρακάτω:

$$\frac{2d}{y_0 + d} \frac{\partial^2 Y}{\partial \xi^2} + \frac{y_0}{y_0 + d} \frac{\partial^2 Y^2}{\partial \xi^2} = \frac{\partial Y}{\partial \tau} \quad (4)$$

$$Y(1,0) = 1 \quad (5\alpha)$$

$$Y(0,\tau) = 0 \quad (5\beta)$$

$$\frac{\partial Y(1,\tau)}{\partial \xi} = 0 \quad (5\gamma)$$

Ολοκληρώνοντας την (4) ως προς ξ μεταξύ των ορίων $\xi=0$ έως $\xi=1$, προκύπτει:

$$\frac{2d}{y_0 + d} \frac{\partial Y}{\partial \xi} \Big|_0^1 + \frac{y_0}{y_0 + d} \frac{\partial Y^2}{\partial \xi} \Big|_0^1 = \frac{d}{d\tau} \int_0^1 Y d\xi \quad (6)$$

Για την περιγραφή του ύψους της υπόγειας στάθμης από την τάφρο μέχρι το μέσον της ισαποχής, $0 \leq \xi \leq 1$, χρησιμοποιείται η πολυωνυμική εξίσωση 2^{ου} βαθμού:

$$Y^2(\xi, \tau) = c_0 + c_1(\tau) \xi + c_2(\tau) \xi^2 \quad (7)$$

όπου οι άγνωστοι συντελεστές c_0 , c_1 και c_2 , προσδιορίζονται με τη βοήθεια των οριακών συνθηκών (5β) και (5γ).

Εισάγοντας τις οριακές συνθήκες (5β) και (5γ) στην (7), λαμβάνουμε:

$$Y^2(\xi, \tau) = \frac{c_1(\tau)}{2} (2\xi - \xi^2), \quad 0 < \xi < 1, \quad \tau > 0 \quad (8)$$

Αντικαθιστώντας την (8) στην (6) θα έχουμε:

$$-\frac{2d c_1}{(y_0 + d) \lambda} - \frac{y_0 c_1}{(y_0 + d)} = \frac{d}{d\tau} \int_0^1 \sqrt{c_1/2} \sqrt{2\xi - \xi^2} d\xi \quad (9)$$

όπου λ είναι μια αδιάστατη παράμετρος ($0 < \lambda < 1$) η οποία συνδέει την κλίση της υπόγειας στάθμης στη θέση $\xi=0$ με την αδιάστατη παράμετρο $c_1(\tau)$.

Υπολογίζοντας το ολοκλήρωμα στο δεύτερο μέλος της εξίσωσης (9) προκύπτει η συνήθης διαφορική εξίσωση:

$$\frac{d\omega}{d\tau} = -\frac{8}{\pi} \left(\frac{2d + \lambda y_0}{(y_0 + d) \lambda} \right) \omega^2 \quad (10)$$

$$\text{όπου } \omega = \sqrt{c_1/2}$$

Η λύση της διαφορικής εξίσωσης (10) που υπόκειται στην οριακή συνθήκη $\omega|_{\tau=0} = 1$, είναι:

$$\omega = \frac{1}{1 + \frac{8}{\pi} \left(\frac{2d + \lambda y_0}{(y_0 + d) \lambda} \right) \tau} \quad (11)$$

Αντικαθιστώντας την εξ. (11) στην (8), παίρνουμε το αδιάστατο ύψος της υπόγειας στάθμης

$$Y(\xi, \tau) = \frac{1}{1 + \frac{8}{\pi} \left(\frac{2d + \lambda y_0}{(y_0 + d)\lambda} \right) \tau} \sqrt{2\xi - \xi^2} \quad (12)$$

Στο μέσον της ισαποχής ($\xi=1$) και με αντικατάσταση του λόγου $\frac{d}{(y_0 + d)} \equiv D$, από την εξ. (12) παίρνουμε:

$$\frac{y_t}{y_0} = \frac{1}{1 + \frac{8}{\pi} \left(1 + D \left(\frac{2}{\lambda} - 1 \right) \right) \tau} \quad (13)$$

Με δοκιμές βρέθηκε ότι η παράμετρος $\lambda=f(D, \tau)$ μπορεί να προσεγγιστεί με την εξίσωση:

$$\lambda = \frac{1}{1 + 6D e^{0.76D} \tau^2} \quad (14)$$

Αντικαθιστώντας την εξ. (14) στην (13) λαμβάνουμε:

$$\frac{y_t}{y_0} = \frac{1}{1 + \frac{8}{\pi} \left[1 + D \left(1 + 12D e^{0.76D} \tau^2 \right) \right] \tau} \quad (15)$$

Από την εξ. (12) προκύπτει ότι το αδιάστατο ύψος της υπόγειας στάθμης για $d=0$, περιγράφεται από την εξίσωση:

$$\frac{y_t}{y_0} = \frac{1}{1 + \frac{4}{\pi} \frac{K y_0 t}{S L^2}} \sqrt{2\xi - \xi^2} \quad (16)$$

Στο μέσον της ισαποχής ($\xi=1$) το αδιάστατο ύψος της υπόγειας στάθμης δίνεται από την εξίσωση:

$$\frac{y_t}{y_0} = \frac{1}{1 + \frac{4}{\pi} \frac{K y_0 t}{S L^2}} \quad (17)$$

Η αντίστοιχη αναλυτική λύση του Boussinesq, είναι:

$$\frac{y_t}{y_0} = \frac{1}{1 + 1.115 \frac{K y_0 t}{S L^2}} \quad (18)$$

Λύνοντας την εξ. (13) ως προς την ισαποχή L' ($=2L$), προκύπτει:

$$L' = \sqrt{\frac{16}{\pi} \left(\frac{2d + \lambda y_0}{\lambda} \right) \frac{Kt}{S} \left(\frac{y_t}{y_t - y_0} \right)} \quad (19)$$

Για την περίπτωση της άδειας τάφρου ($d=0$), η εξ. (19) γράφεται:

$$L' = \sqrt{\frac{16}{\pi} \frac{K y_0 t}{S} \left(\frac{y_t}{y_t - y_0} \right)} \quad (20)$$

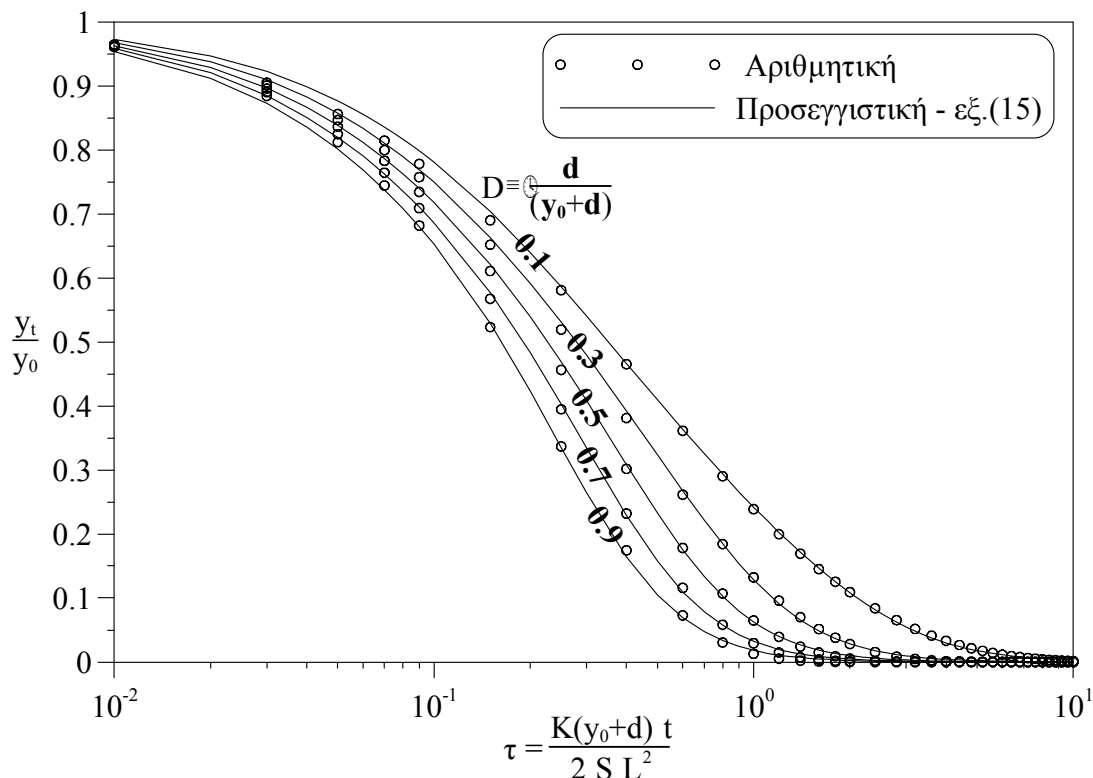
Η εξίσωση υπολογισμού της ισαποχής σύμφωνα με την αντίστοιχη λύση του Boussinesq είναι:

$$L' = \sqrt{4.46 \frac{K y_0 t}{S} \left(\frac{y_t}{y_0 - y_t} \right)} \quad (21)$$

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Για τον έλεγχο της ακρίβειας της προσεγγιστικής λύσης της μη μόνιμης στράγγισης, αυτή συγκρίνεται με μια αναλυτική και μια αριθμητική λύση αντιστοίχων προβλημάτων.

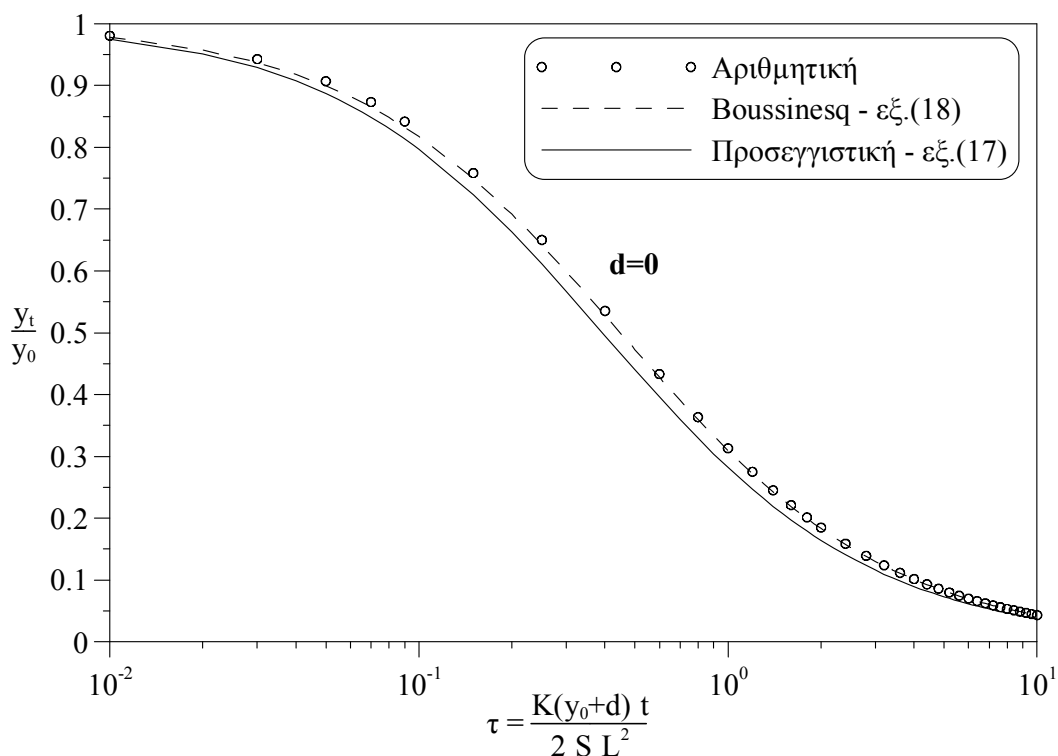
Η αναλυτική λύση της μη γραμμικής εξίσωσης Boussinesq για την περίπτωση στραγγιστικών σωλήνων εγκατεστημένων πάνω στο αδιαπέρατο υπόστρωμα ή για την περίπτωση άδειας τάφρου, δίνεται από τον Boussinesq (1904).



Σχήμα 2. Αδιάστατο ύψος υπόγειας στάθμης. Σύγκριση αριθμητικής και προσεγγιστικής λύσης.

Η αριθμητική λύση της μη γραμμικής εξίσωσης Boussinesq λαμβάνεται με τη βοήθεια ενός υπολογιστικού σχήματος πεπερασμένων διαφορών, πεπλεγμένης μορφής, προσαρμοσμένο για μη γραμμικές εξισώσεις (Τερζίδης, 1969β).

Στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται η μεταβολή με το χρόνο του ύψους της υπόγειας στάθμης στο μέσο της ισαποχής, όπως υπολογίζεται από την προσεγγιστική λύση για διάφορες τιμές της παραμέτρου D , καθώς και οι αντίστοιχες αριθμητικές λύσεις. Από τη σύγκριση των λύσεων φαίνεται ότι η προσεγγιστική λύση δίνει πολύ καλά αποτελέσματα ιδιαίτερα για χρόνους κατά τους οποίους ο λόγος y_t/y_0 , παίρνει τιμές μικρότερες του 0.5. Έτσι, στην πράξη η εφαρμογή της εξ. (19) για τον υπολογισμό της ενδεδειγμένης ισαποχής δίνει πολύ καλά αποτελέσματα.



Σχήμα 3. Αδιάστατο ύψος υπόγειας στάθμης. Σύγκριση αριθμητικής, αναλυτικής και προσεγγιστικής λύσης.

Στο Σχήμα 3 παρουσιάζεται η μεταβολή με το χρόνο του ύψους της υπόγειας στάθμης στο μέσο της ισαποχής, για $D=0$, όπως λαμβάνεται από την προσεγγιστική λύση, την αναλυτική λύση του Boussinesq και την αντίστοιχη αριθμητική λύση. Παρατηρείται ότι η αναλυτική λύση του Boussinesq με την αριθμητική λύση, έχουν πολύ μικρές διαφορές για μικρούς χρόνους ενώ βαθμιαία μειώνονται οι διαφορές και για μεγαλύτερους χρόνους οι δύο λύσεις σχεδόν ταυτίζονται. Οι μικρές διαφορές μεταξύ της αριθμητικής λύσης και της λύσης Boussinesq στους μικρούς χρόνους αποδίδονται στην ελαφρώς διαφορετική προσέγγιση του σχήματος της αρχικής υπόγειας στάθμης. Η προσεγγιστική λύση δίνει για όλους τους χρόνους μικρότερες τιμές του αδιάστατου ύψους της υπόγειας στάθμης με μέγιστη απόλυτη διαφορά του αδιάστατου ύψους 0.033.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται μια προσεγγιστική λύση της μη γραμμικής εξίσωσης Boussinesq, η οποία περιγράφει το πρόβλημα της μη μόνιμης στράγγισης προς παράλληλους στραγγιστικούς αγωγούς. Η ολοκληρωματική μέθοδος που

εφαρμόζεται, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για διάφορες συνθήκες στη θέση των στραγγιστικών αγωγών, ενώ οι λύσεις που λαμβάνονται είναι σε απλή ρητή μορφή. Από τη σύγκριση της προσεγγιστικής λύσης με αναλυτική και αριθμητική λύση, προκύπτει ότι για πρακτικούς σκοπούς η ακρίβειά της είναι ικανοποιητική.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Aravin, V.I. and Numerov, S.N., 1965. *Theory of fluid flow in undeformable porous media*. Translated from Russian. Israel program for scientific translations, Jerusalem.
- Boussinesq, J., 1904. *Recherches théoriques sur l'écoulement des nappes d'eau infiltrées dans le sol et sur le débit des sources*. *Journal de mathématiques pures et appliquées*, (5^o series), Tome X-Fasc. 1, pp. 5-58.
- Crank, J., 1975. *The mathematics of diffusion*. Second edition, Clarendon Press-Oxford.
- Dumm, L.D., 1954. *New formula for determining depth and spacing of subsurface drains in irrigated lands*. *Agricultural Engineering* 35: 726-730.
- Krayenhoff van de Leur, D.A., 1958. *A study of nonsteady groundwater flow with special reference to a reservoir coefficient*. *De Ingenieur* 70B: 87-94.
- Lockington, D.A., 1997. *Response of unconfined aquifer to sudden change in boundary head*. *J. Irrigation and Drainage Engineering, ASCE*, 123(1):24-27.
- Maasland, M., 1959. *Water table fluctuations induced by intermittent recharge*. *Journal of Geophysical Research* 64: 549-559.
- Τελόγλου Η. και Ζήσης, Θ., 2002. *Προσεγγιστικές λύσεις μη μόνιμης ροής σ' ελεύθερους υδροφορείς*. *Υδροτεχνικά*, 12: 3-16.
- Terzidis, G., 1968. *Discussion. Falling water table between tile drains*. *American Society of Civil Engineering, Proceedings* 94(IR1): 159-165.
- Τερζίδης, Γ., 1969α. *Ασταθής στράγγισις γεωργικών εδαφών*. *Τεχνικά Χρονικά*, 4: 251-257.
- Τερζίδης, Γ., 1969β. *Λύσις της εξισώσεως της ασταθούς στραγγίσεως δια της μεθόδου των παλινδρομήσεων*. *Γεωπονικά* 180-181, 455-466.
- Tolikas, P.K., Sidiropoulos, E.G. and Tzimopoulos, C.D., 1984. *A simple analytical solution for the Boussinesq one-dimensional groundwater flow equation*. *Water Resources Research* 20(1), 24-28.
- Van Schilfgaarde, J., 1963. *Design of tile drainage for falling water tables*. *American Society of Civil Engineering, Proceedings* 89(IR2): 1-11.
- Van Schilfgaarde, J., 1964. *Closing discussion: design of tile drainage for falling water tables*. *American Society of Civil Engineering, Proceedings* 90(IR3): 71-73.

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΣΤΡΑΓΓΙΣΗΣ ΤΩΝ ΔΙΑΣΤΡΩΜΕΝΩΝ ΕΛΑΦΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ TOKSOZ - KIRKHAM

M.E. Θεοχάρης

Τμήμα ΤΕΙ Ηπείρου, Τμήμα Φυτικής Παραγωγής, 471 00 Άρτα

E-mail: theoxar@teiep.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ακριβέστερη μέθοδος υπολογισμού της σταθερής στράγγισης των διαστρωμένων εδαφών με παράλληλους αγωγούς (σωλήνες ή τάφρους) θεωρείται από πολλούς ερευνητές ότι είναι η μέθοδος των Toksoz - Kirkham. Η αριθμητική λύση του προβλήματος με τη μέθοδο αυτή επιτυγχάνεται με διαδοχικές προσεγγίσεις, μία διαδικασία πολύπλοκη η οποία απαιτεί πολλές και κοπιαστικές πράξεις. Για το λόγο αυτό κατασκευάστηκαν από τους ίδιους ερευνητές ειδικά νομογραφήματα για την απόκτηση γραφικών λύσεων τα οποία όμως είναι δύσχρηστα, εισάγουν σφάλματα στην ανάγνωση τιμών και ακρίβεια των υπολογισμών είναι σχετικά μικρή. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται ένα απλό πρόγραμμα υπολογισμού σε γλώσσα VBA (Visual Basic for Applications) το οποίο μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιοδήποτε τύπο εδάφους, δίνει γρήγορες και ακριβείς λύσεις και μπορεί να ενσωματωθεί σε λογισμικά πακέτα υπολογισμών στραγγιστικών δικτύων.

Λέξεις κλειδιά: συνέδρια, στράγγιση, Toksoz , Kirkham, διαστρωμένα εδάφη, ισαποχή.

A COMPUTER SYSTEM FOR CALCULATING THE STEADY STATE DRAINAGE OF LAYERED SOILS USING THE TOKSOZ - KIRKHAM METHOD

M.E. Theocharis

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

E-mail: theoxar@teiep.gr

ABSTRACT

One of most accurate method in calculating the steady-state drainage of layered soils with parallel tiles or ditches is the Toksoz-Kirkham's method. The numerical solution of the problem using this method, calls for a lot and very complex calculations. In response, various nomographs have been developed by Toksoz and Kirkham but with significant inaccuracies in value determination. In this paper a simple computer system that has been developed in VBA (Visual Basic for Applications) for the steady state drain spacing computation of layered soils using the Toksoz-Kirkham's method is presented, which gives quick and accuracy computational solutions. The system is approachable to a wide range of researchers and can be applied as a subroutine in computational programs of drainage networks.

Key words: conferences, drainage, Toksoz , Kirkham, layered soils, drain distance.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το πρόβλημα της σταθερής στράγγισης των γεωργικών εδαφών είναι εξαιρετικά πολύπλοκο τόσο από μαθηματικής όσο και από φυσικής άποψης. Οι πιο διαδεδομένες ικανοποιητικές κατά προσέγγιση λύσεις αυτού του προβλήματος για την περίπτωση διαστρωμένου εδάφους, που αποτελείται από δύο διαπερατές στρώσεις και οι παράλληλοι στραγγιστικοί αγωγοί (σωλήνες ή τάφροι) βρίσκονται σε οποιαδήποτε θέση από τη διαχωριστική επιφάνεια των δύο στρώσεων, είναι αυτές που δόθηκαν από τους Toksöz-Kirkham (1971a,b), τον Ernst (1962,1963), και τον Τερζίδη (1975).

Η μέθοδος των **Toksöz-Kirkham** (1971a,b), που αποτελεί επέκταση της μεθόδου του Kirkham (1958) για τη στράγγιση των ομογενών εδαφών, δεν χρησιμοποιεί τις παραδοχές των Dupuit-Forchheimer, αλλά θεωρεί τη ροή δισδιάστατη και λύνει την αντίστοιχη εξίσωση Laplace, που προκύπτει με τη δυναμική θεωρία. Η αναλυτική λύση του προβλήματος είναι σε μορφή πεπλεγμένων σειρών Fourier με άπειρους όρους και η εφαρμογή τους σε πρακτικά προβλήματα γίνεται με τα ειδικά νομογραφήματα που κατασκευάστηκαν από τους ίδιους ερευνητές. Η μέθοδος των Toksöz - Kirkham θεωρείται από πολλούς ερευνητές ότι είναι πιο ακριβής για τα πρακτικά προβλήματα στράγγισης (Luthin, 1966) και η ακρίβεια της έχει ελεγχθεί πειραματικά με μετρήσεις εργαστηρίου και υπαίθρου (Khan, et.al.,1989).

Ο **L. Ernst** το 1962, δημοσίευσε μια προσεγγιστική μέθοδο επίλυσης του προβλήματος, η οποία αποτελεί επέκταση της μεθόδου που αναπτύχθηκε το 1940 από τον Hooghoudt (1940) για τη στράγγιση των ομογενών εδαφών. Χρησιμοποιεί τις παραδοχές των Dupuit-Forchheimer για το τμήμα που θεωρείται ότι είναι της οριζόντιας ροής και την παραδοχή της ακτινικής καμπυλόγραμμης ροής για την περιοχή κοντά στους στραγγιστικούς αγωγούς. Η μέθοδος του Ernst είναι ειδικά χρήσιμη όταν η πάνω στρώση έχει πολύ μικρότερο συντελεστή αγωγιμότητας από την κάτω στρώση. Μία τροποποίηση της μεθόδου του Ernst, η οποία δίνει με απλό και ακριβή τρόπο αποτελέσματα σχεδόν ίδια με αυτά της μεθόδου Toksoz-Kirkham, παρουσίασε ο Τερζίδης (2003).

Ο **Τερζίδης** το 1975 (Τερζίδης, Γ., και Καραμούζης, Δ., 1986) ακολουθώντας ίδια μεθοδολογία με αυτήν που ακολούθησε ο Dagan (1964,1965) για τη στράγγιση των ομογενών εδαφών, αλλά με περιοχή γραμμικοποίησης της ακτινικής ροής κοντά στους στραγγιστικούς αγωγούς και σε απόσταση 2,82D από αυτούς, επέτυχε την εξαγωγή απλών εξισώσεων υπολογισμού της ισαποχής των στραγγιστικών αγωγών με ακρίβεια σχεδόν ίδια με αυτή της μεθόδου των Toksöz -Kirkham (1971a,b).

2. Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ TOKSÖZ - KIRKHAM

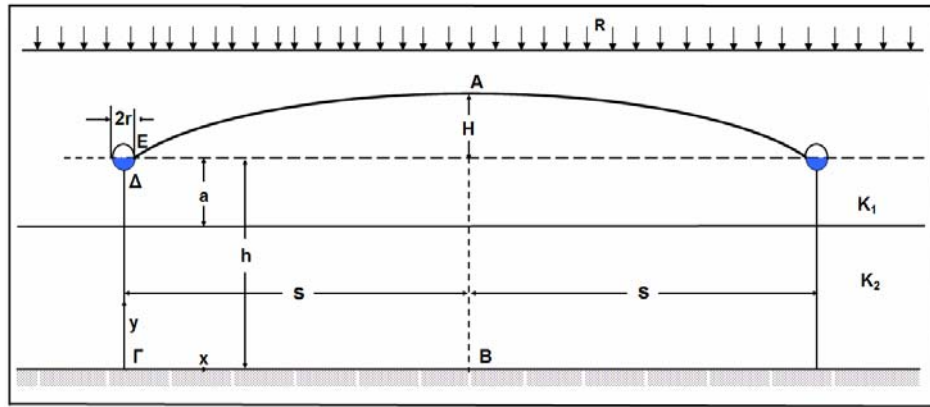
Το 1971 οι Toksöz-Kirkham (1971a,b) παρουσίασαν την επίλυση του προβλήματος της στράγγισης ενός διαστρωμένου εδάφους που αποτελείται από δύο διαπερατές στρώσεις ομογενείς και ισότροπες και οι παράλληλοι στραγγιστικοί αγωγοί είναι τοποθετημένοι σε οποιαδήποτε θέση στην επάνω στρώση κατά τέτοιο τρόπο ώστε να είναι γεμάτοι με νερό μέχρι τη μέση τους. Για την επίλυση του προβλήματος του σχήματος 1 οι Toksöz -Kirkham χρησιμοποίησαν την εξίσωση του Laplace:

$$\nabla^2 \varphi = 0 \Rightarrow \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0 \quad (1)$$

όπου:

$$\phi = Kh = K \left(\frac{p}{\gamma} + y \right) \quad (2)$$

είναι το είναι δυναμικό της ταχύτητας.



Σχήμα 1. Στράγγιση διαστρωμένου εδάφους σύμφωνα με τη μέθοδο των Toksöz-Kirkham

Η επίλυση της εξίσωσης Laplace επιτεύχθηκε με σειρές Fourier αφού λήφθηκαν υπόψη οι οριακές συνθήκες του προβλήματος: $\frac{\partial \phi}{\partial x} = 0$ στα όρια AB και ΓΔΕ, $\frac{\partial \phi}{\partial y} = 0$ στο

όριο ΒΓ και $\left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right)^2 - (q_0 + K) \frac{\partial \phi}{\partial y} + Kq_0 = 0$ στην ελεύθερη επιφάνεια της

υπόγειας στάθμης. Στη διεπιφάνεια χρησιμοποίησαν τη συνθήκη $\phi_1 = \phi_2$, δηλαδή σε οποιοδήποτε σημείο της διεπιφάνειας το ολικό φορτίο εκατέρωθεν είναι το ίδιο. Επίσης καταρχήν θεώρησαν ότι η περιοχή μεταξύ της υπόγειας στάθμης και του επιπέδου των δραίνων αποτελείται από μεταλλικές μεμβράνες από ιδεατό αμμοχάλικο με άπειρη υδραυλική αγωγιμότητα και στη συνέχεια αφαίρεσαν το αμμοχάλικο και το αντικατέστησαν με έδαφος υδραυλικής αγωγιμότητας K_1 . Επίσης θεώρησαν ότι τα δράινα είναι λεπτές οριζόντιες ορθογωνικές σχισμές απειροστού πάχους. Η γενική λύση στην οποία κατέληξαν οι Toksöz-Kirkham με τους δικούς τους συμβολισμούς έχει τη μορφή:

$$\frac{H}{a} \left(\frac{K_1}{R} - 1 \right) = \frac{2s}{a} \left(E + \sum_{m=1}^{m=\infty} F - \sum_{m=1}^{m=\infty} FG \right) \quad (3)$$

όπου οι συναρτήσεις E, F και G έχουν τις παρακάτω μορφές:

$$E \left(\frac{2S}{a}, \frac{a}{2r} \right) = \frac{1}{\pi} \ln \frac{1}{\sin \left[\frac{\pi}{2} \frac{2r}{a} \frac{a}{2s} \right]} \quad (4)$$

$$G \left(\frac{2S}{a}, \frac{a}{h}, \frac{K_1}{K_2} \right) = \frac{\exp \left(\frac{2m\pi a}{2S} \right)}{\sinh \frac{2m\pi a}{2s}} \left[\frac{1}{\frac{K_1}{K_2} \coth \left[2m\pi \left(\frac{h}{a} \frac{a}{2s} - \frac{a}{2s} \right) \right] + \coth \frac{2m\pi a}{2s}} \right] \quad (5)$$

$$F\left(\frac{2S}{a}, \frac{a}{2r}\right) = \frac{1}{\pi} \frac{1}{m} \left(-1 + \coth \frac{m\pi a}{s}\right) \left[\cos\left(m\pi \frac{2r}{a} \frac{a}{2s}\right) - \cos m\pi\right] \quad (6)$$

Μετά την εκτέλεση των πράξεων και αν τεθεί $2s = L$, $h = D$ και $R = q$ (συμβολισμοί που επικράτησε διεθνώς να εφαρμόζονται στα στραγγιστικά δίκτυα) οι εξισώσεις (3) έως (6) παίρνουν τη μορφή:

$$\frac{H}{a} \left(\frac{K_1}{q} - 1\right) = \frac{L}{a} \left(E + \sum_{m=1}^{m=\infty} F - \sum_{m=1}^{m=\infty} FG\right) \quad (3a)$$

$$E(L, r) = -\frac{1}{\pi} \ln\left(\sin\left(\frac{\pi r}{L}\right)\right) \quad (4a)$$

$$G(L, a, D, K_1, K_2) = \frac{\exp\left(\frac{2m\pi a}{L}\right)}{\sinh \frac{2m\pi a}{L} \left[\frac{K_1}{K_2} \coth \frac{2m\pi(D-a)}{L} + \coth \frac{2m\pi a}{L}\right]} \quad (5a)$$

$$F(L, r, a) = \frac{1}{\pi} \frac{1}{m} \left(-1 + \coth \frac{2m\pi a}{L}\right) \left[\cos\left(\frac{2m\pi r}{L}\right) - \cos m\pi\right] \quad (6a)$$

Στις παραπάνω εξισώσεις: **H** είναι το μέγιστο ύψος της υπόγειας στάθμης από το επίπεδο των κέντρων των σωλήνων σε m, **a** είναι πάχος της πάνω στρώσης από το επίπεδο των κέντρων των σωλήνων προς τα κάτω σε m, **h = D** είναι το βάθος από το επίπεδο των κέντρων των σωλήνων μέχρι το αδιαπέρατο στρώμα σε m, **K₁** και **K₂** είναι οι συντελεστές υδραυλικής αγωγιμότητας της πάνω και της κάτω στρώσης αντίστοιχα σε m/d, **R = q** είναι η παροχή επαναπλήρωσης από σταθερή βροχή ή άρδευση σε m/d, **L = 2s** είναι η ισαποχή μεταξύ των κέντρων των σωλήνων σε m, **r** είναι η ακτίνα των σωλήνων μαζί με το φίλτρο χαλικιών σε m και **m = 1, 2, ...,** μέχρι τη σύγκλιση της κάθε σειράς.

3. ΕΠΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

3.1. ΕΠΛΥΣΗ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΝΟΜΟΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ

Το σύστημα των εξισώσεων (3) ως (6) δεν μπορεί να επιλυθεί και να δώσει την ισαποχή **L** γιατί η ισαποχή εμφανίζεται πεπλεγμένη και μέσα στις λογαριθμικές, τριγωνομετρικές και υπερβολικές συναρτήσεις. Για το λόγο αυτό οι Toksöz-Kirkham (Toksöz, and Kirkham, 1971b., Τερζίδης, και Καραμούζης, 1986, σελ. 101-108., Τερζίδης, και Παπαζαφειρίου, 1997, σελ. 479 - 485., Τζιμόπουλος, 1997, σελ. 90 - 96.), κατασκεύασαν 27 αδιάστατα νομογραφήματα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό της ισαποχής. Τα νομογραφήματα αυτά κατασκευάστηκαν για τιμές $a/2r = 1, 8, 64$ και 512 και τους συνδυασμούς των K_1/K_2 και a/h που δίνονται στον πίνακα 1.

Πίνακας 1. Οι συνδυασμοί των K_1/K_2 και a/h για τους οποίους κατασκευάστηκαν νομογραφήματα από τους Toksöz-Kirkham

$K_1/K_2 \backslash a/h$	1/50	1/20	1/10	1/5	1/2	2	5	10	50	∞
0	*			*	*	*	*	*	*	$K_2 = 0, a/h = 1$ ομογενές έδαφος
0,2	*			*	*	*	*	*	*	
0,4	*	*	*	*	*	*				
0,8	*	*	*	*	*	*				

Σε κάθε νομογράφημα η αδιάστατη ποσότητα $(H/a)[(K_1/R)-1]$ είναι σε λογαριθμική κλίμακα στον κατακόρυφο άξονα των τεταγμένων για τιμές 2 έως 1000 και η αδιάστατη ισαποχή $2s/a$ σε λογαριθμική κλίμακα στον οριζόντιο άξονα των τεταγμένων για τιμές 2 έως 100. Οι τέσσερες καμπύλες αντιστοιχούν στις τιμές $a/2r = 1, 8, 64$ και 512. Για τιμές που δεν υπάρχουν στα νομογραφήματα μπορεί να γίνει γραμμική παρεμβολή.

Με τα υπόψη νομογραφήματα: α. Δεν αντιμετωπίζεται το πρόβλημα στο σύνολό του αλλά συγκεκριμένες ειδικές περιπτώσεις εδαφών. β. Η ακρίβεια των υπολογισμών είναι σχετικά μικρή. γ. Τα νομογραφήματα είναι δύσχρηστα ιδιαίτερα αν υπάρχει ανάγκη γραμμικής παρεμβολής μεταξύ δύο διαφορετικών νομογραφημάτων. δ. Εισάγουν σφάλματα στην ανάγνωση των τιμών που μπορεί να είναι μεγαλύτερα και από 5%. ε. Δεν είναι δυνατή η αυτόματη χρησιμοποίηση των αποτελεσμάτων σε περαιτέρω υπολογισμούς, ούτε η ενσωμάτωση των υπολογισμών σε λογισμικά πακέτα στραγγιστικών δικτύων.

3.2. ΕΠΙΛΥΣΗ ΜΕ ΤΗ ΒΟΗΘΕΙΑ Η/Υ

Για τους παραπάνω λόγους είναι αναγκαία η ανάπτυξη ενός προγράμματος υπολογισμού του L το οποίο να δίνει γρήγορες και ακριβείς λύσεις, να είναι προσιτό σε ευρύ φάσμα ερευνητών και να μπορεί να ενσωματωθεί ως υπορουτίνα σε λογισμικά πακέτα υπολογισμών στραγγιστικών δικτύων. Στα επόμενα αναπτύσσεται ένα πρόγραμμα σε Visual Basic for Applications, με το οποίο υπολογίζεται η ισαποχή των στραγγιστικών αγωγών με τη μέθοδο Toksöz-Kirkham για την περίπτωση διαστρωμένων εδαφών με τους στραγγιστικούς αγωγούς σε οποιαδήποτε θέση της πάνω στρώσεως. Το πρόγραμμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλες τις περιπτώσεις εδαφών με τους στραγγιστικούς αγωγούς σε οποιαδήποτε θέση.

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΣΤΡΑΓΓΙΣΗΣ ΤΩΝ ΔΙΑΣΤΡΩΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΤΟΚΣΟΖ - KIRKHAM

Δρ. Μενέλαος Θεοχάρης
Πολυτεχνικός Μηχανικός Ε.Μ.Π.
Μ. Sc. Παν/μίου Θεσσαλίας
Διδάκτορας Α.Π.Θ.
47100 Άρτα, theoxar@teiep.gr

Δεδομένα

Υδραυλική αγωγιμότητα της πάνω στρώσεως (m/d) $K_1 = 0,55$	Υδραυλική αγωγιμότητα της κάτω στρώσεως (m/d) $K_2 = 0,11$
Παροχή επαναπλήρωσης (m/d) $q = 0,010$	Υδραυλικό φορτίο στο μεσοδιάστημα (m) $H = 0,80$
Ακτίνα των στραγγιστικών αγωγών (m) $r = 0,01$	Βάθος των στραγγιστικών αγωγών (m) $D = 5,00$
Βάθος της πάνω στρώσης από το επίπεδο των κέντρων των σωλήνων προς τα κάτω (m) $a = 1,00$	

Υπολογισμός

Η ισαποχή L προκύπτει από την επίλυση του συστήματος εξισώσεων:

$$\frac{H}{a} \left(\frac{K_1}{q_0} - 1 \right) = \frac{L}{a} \left(E + \sum_{m=1}^{\infty} F - \sum_{m=1}^{\infty} FG \right) \quad F = \frac{1}{\pi m} \left(-1 + \coth \frac{2m\pi a}{L} \right) \left[\cos \left(\frac{2m\pi r}{L} \right) - \cos m\pi \right]$$

$$E = -\frac{1}{\pi} \ln \left(\sin \left(\frac{\pi r}{L} \right) \right) \quad \text{και} \quad G = \frac{\exp \left(\frac{2m\pi a}{L} \right)}{\sinh \frac{2m\pi a}{L} \left[\frac{K_1}{K_2} \coth \frac{2m\pi (D-a)}{L} + \coth \frac{2m\pi a}{L} \right]}$$

Το σύστημα επιλύεται με διαδοχικές δοκιμές.

Η λύση προκύπτει στην επανάληψη 14: $L = 16,085 \text{ m}$

Σχήμα 2. Το λογιστικό φύλλο εφαρμογής της μεθόδου Toksöz-Kirkham

3.2.1. Εισαγωγή δεδομένων

Στα κελιά F15, I15, F18, I18, F21, I21, F24, ενός λογιστικού φύλλου, Σχήμα 2, εισάγονται οι τιμές των δεδομένων K_1 , K_2 , q , H , r , D και a αντίστοιχα.

3.2.2. Επίλυση του προβλήματος

Αναπτύσσεται η επόμενη μακροεντολή.

Sub Steady_Drainage_of_Layered_Soils()

'Καταγραφή μακροεντολής 24/4/2009 από τον Μενέλαο Θεοχάρη

'Συντόμευση πληκτρολογίου: Ctrl+a

Range("f3") = "ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΣΤΡΑΓΓΙΣΗΣ"

Range("f4") = "ΤΩΝ ΔΙΑΣΤΡΩΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΩΝ"

Range("f5") = "ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ TOKSÖZ - KIRKHAM"

Range("D14") = "Υδραυλική αγωγιμότητα της πάνω στρώσεως (m/d)"

Range("j14") = "Υδραυλική αγωγιμότητα της κάτω στρώσεως (m/d)"

Range("d17") = "Παροχή επαναπλήρωσης (m/d)"

Range("j17") = "Υδραυλικό φορτίο στο μεσοδιάστημα (m)"

Range("d20") = "Ακτίνα των στραγγιστικών αγωγών (m)"

Range("j20") = "Βάθος των στραγγιστικών αγωγών (m)"

Range("D23") = "Βάθος της πάνω στρώσης από το επίπεδο των κέντρων των σωλήνων προς τα κάτω (m)"

$K1 = \text{Range}("f15").\text{Value}$

$K2 = \text{Range}("I15").\text{Value}$

$q = \text{Range}("f18").\text{Value}$

$H = \text{Range}("I18").\text{Value}$

$r = \text{Range}("f21").\text{Value}$

$D = \text{Range}("I21").\text{Value}$

$a = \text{Range}("f24").\text{Value}$

$L = 50$

$\text{metritis} = \text{Range}("h3").\text{Value}$

$\text{metritis} = 0$

Do

$S0 = 0$

$L0 = L$

For $m = 1$ To 100

$p = 4 * \text{Atn}(1)$

$X = m * p * a * 2 / L0$

$\text{Range}("q27") = X$

$E = -1 / p * (\text{Log}(\text{Sin}(p * r / L0)) / \text{Log}(\text{Exp}(1)))$

$\text{Range}("q28") = E$

$F = 1 / (m * p) * (-1 + (\text{Exp}(X) + \text{Exp}(-X)) / (\text{Exp}(X) - \text{Exp}(-X))) * (\text{Cos}(m * p * r * 2 / L0) - \text{Cos}(m * p))$

$\text{Range}("q29") = F$

$G = \text{Exp}(X) / (((\text{Exp}(X) - \text{Exp}(-X)) / 2) * (k1 / k2 * ((\text{Exp}(m * p * (D - a) * 2 / L0) + \text{Exp}(-m * p * (D - a) * 2 / L0)) / (\text{Exp}(m * p * (D - a) * 2 / L0) - \text{Exp}(-m * p * (D - a) * 2 / L0))) + (\text{Exp}(X) + \text{Exp}(-X)) / (\text{Exp}(X) - \text{Exp}(-X))))$

$\text{Range}("q30") = G$

$S0 = S0 + F - F * G$

Next m

$\text{Range}("s29") = S0$

$S = S0 + E$


```

L = ((k1 / q) - 1) * H / S
Range("K38") = "L= " & Round(L, 5) & " m"
metritis = metritis + 1
Range("D38") = "Η λύση προκύπτει στην επανάληψη " & metritis & ":"
Loop While (Abs(L - L0) > 0.0001)
MsgBox "Λύση στην επανάληψη " & metritis & " L= " & Round(L, 3) & " m"
Range("c56") = L
End Sub

```

Η εκτέλεση της μακροεντολής γίνεται με το πάτημα του κουμπιού με την ένδειξη “Υπολογισμός”, Σχήμα 2. Η τιμή του υπολογιζόμενου L εμφανίζεται στο κελί K38. Επίσης αναγράφεται ο αριθμός των επαναλήψεων που απαιτήθηκαν για να προκύψει το L . Τέλος σε ένα μήνυμα (MsgBox), το οποίο και πιστοποιεί την ορθότητα των υπολογισμών, εμφανίζονται ο αριθμός των επαναλήψεων και η τιμή του L .

4. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Επλύονται τα προβλήματα στράγγισης τα οποία παρουσιάζονται στα συγγράμματα των Γ. Τερζίδη - Ζ. Παπαζαφειρίου (1997) και Χ. Τζιμόπουλου (1997) και συγκρίνονται τα αποτελέσματα.

1. Δίδονται: $K_1 = 0,55 \text{ m/d}$, $K_2 = 0,11 \text{ m/d}$, $q = 0,01 \text{ m/d}$, $D = 5,00 \text{ m}$, $r = 1/128 \text{ m}$, $H = 0,80 \text{ m}$ και $a = 1,00 \text{ m}$ (Τερζίδης – Παπαζαφειρίου, 1997, σελ. 487).

Από την επίλυση των συγγραφέων με τη χρήση των νομογραφημάτων προκύπτει ισαποχή $L = 16,00 \text{ m}$, ενώ από την επίλυση με το πρόγραμμα προκύπτει ισαποχή $L = 16,085 \text{ m}$ στη 14η επανάληψη. Η απόκλιση μεταξύ των δύο υπολογισμών είναι $0,5313 \%$

2. Δίδονται: $K_1 = 0,20 \text{ m/d}$, $K_2 = 0,4 \text{ m/d}$, $q = 0,01 \text{ m/d}$, $D = 2,50 \text{ m}$, $r = 0,05 \text{ m}$, $H = 1,20 \text{ m}$ και $a = 0,50 \text{ m}$ (Τζιμόπουλος, 1997, σελ. 97-98).

Από την επίλυση του συγγραφέα με τη χρήση των νομογραφημάτων προκύπτει ισαποχή $L = 19,00 \text{ m}$, ενώ από την επίλυση με το πρόγραμμα προκύπτει ισαποχή $L = 17,034 \text{ m}$ στη 11η επανάληψη. Η απόκλιση μεταξύ των δύο υπολογισμών είναι $10,35 \%$

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Με την προαναφερθείσα διαδικασία είναι δυνατή η επίλυση των προβλημάτων σταθερής στράγγισης των διαστρωμένων εδαφών όταν οι στραγγιστικοί αγωγοί βρίσκονται σε οποιαδήποτε θέση της πάνω διάστρωσης.

Για την περίπτωση ομογενών εδαφών ισχύει πάλι η ίδια διαδικασία αν στους υπολογισμούς τεθεί $K_1 = K_2 = K$ και αντί για a οποιαδήποτε θετική τιμή μικρότερη του D .

Επίσης είναι δυνατόν να εξειδικευτούν οι υπολογισμοί στα ομογενή εδάφη με το να τεθεί $K_2 = \varepsilon > 0$ και $D - a = \varepsilon > 0$ όπου $\varepsilon \rightarrow 0$.

Σημειώνεται ότι δεν είναι δυνατόν να εξειδικευτούν οι υπολογισμοί στα ομογενή εδάφη με το να τεθεί $K_2 = 0$ και $a = D$, διότι τότε η συνάρτηση G είναι απροσδιόριστη.

Για την περίπτωση διαστρωμένων εδαφών με τους στραγγιστικούς αγωγούς σε οποιαδήποτε θέση της κάτω διάστρωσης πάχους b , ισχύει η διαδικασία υπολογισμού αν τεθεί αντί για a μία οποιαδήποτε πολύ μικρή θετική τιμή $a = \varepsilon > 0$ και $\varepsilon \rightarrow 0$ και αντί της K_1 ληφθεί:

$$\bar{K}_1 = \frac{(H_0 - b + D)K_1 + (b - D)K_2}{H} \quad \text{αν} \quad b - D < H \quad (7)$$

ή

$$\bar{K}_1 = K_2 \quad \text{αν} \quad b - D \geq H \quad (8)$$

Τέλος για την περίπτωση διαστρωμένων εδαφών με τους στραγγιστικούς αγωγούς στη διαχωριστική επιφάνεια των δύο στρώσεων ισχύει πάλι η ίδια διαδικασία αν στους υπολογισμούς τεθεί $a = \varepsilon > 0$ και $\varepsilon \rightarrow 0$ και τούτο διότι αν τεθεί $a = 0$ δεν ορίζονται οι συναρτήσεις F και G.

Οι εξισώσεις των Toksöz-Kirkham εφαρμόζονται για την περίπτωση τάφρων αν τεθεί $r = B/2$ όπου B είναι το πλάτος του πυθμένα της τάφρου σε m .

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η μέθοδος των Toksöz-Kirkham θεωρείται από πολλούς ερευνητές ότι είναι η πιο ακριβής μέθοδος υπολογισμού της ισαποχής των στραγγιστικών αγωγών γιατί βασίζεται στη δυναμική θεωρία, δηλαδή στην επίλυση της διαφορικής εξίσωσης Laplace χωρίς τις παραδοχές των Dupuit-Forchheimer.

Με το πρόγραμμα επίλυσης, που αναπτύχθηκε στην παρούσα μελέτη, είναι δυνατή η επίλυση των προβλημάτων σταθερής στράγγισης οποιονδήποτε εδαφών (ομογενών ή διαστρωμένων) με τους στραγγιστικούς αγωγούς να έχουν οποιαδήποτε διάμετρο και να είναι τοποθετημένοι σε οποιαδήποτε θέση (στην πάνω διάστρωση ή στην κάτω διάστρωση ή στη διαχωριστική επιφάνεια των δύο στρώσεων).

Το πρόγραμμα δίνει γρήγορες και ακριβείς λύσεις, είναι απλό στη χρήση, δεν απαιτεί εξειδικευμένες γνώσεις πληροφορικής, είναι προσιτό σε ευρύ φάσμα ερευνητών και μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην καθημερινή πράξη.

Με την εφαρμογή του προγράμματος αποφεύγεται η χρήση των ειδικών νομογραφημάτων επίλυσης τα οποία είναι δύσχρηστα, εισάγουν σφάλματα στην ανάγνωση των τιμών και δεν είναι δυνατή η αυτόματη χρησιμοποίηση των αποτελεσμάτων σε περαιτέρω υπολογισμούς, ούτε η ενσωμάτωση των υπολογισμών σε λογισμικά πακέτα στραγγιστικών δικτύων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Dagan, G., 1965. *Steady Drainage of a Two-Layered Soil*. J. Irrig. and Drain. Div., Amer. Soc. Civil Eng. Proc. 91(IR3):51-64.
- Ernst, L.F., 1962. *Grondwaterstromingen in de verzadigde zone en hun berekening bij aanwezigheid van horizontale evenwijdige open leidingen*. Versl. Landbouwk. Onderz. Nr. 76.15, Wageningen (Niederlande).
- Hooghoudt, S.B., 1940. *Bijdragen tot de kennis van enige natuurkundige grootheden van de grond*. Versl. Landbouwk. Onderzoek No.46. (14) B. pp. 515-707.
- Khan, G.I., Shukla, K.N., Chauhan, H.S., and Ram, Sewa, 1989. *Verification of Kirkham's Problem of Layered Soils Layered Soil Drainage*. J. Irrig. and Drain. Div., Amer. Soc. Civil Eng. Vol. 115(IR4):521-529.
- Kirkham, Don., 1958. *Seepage of steady rainfall through soil into drains*. Amer. Geophys. Union Trans. 39:892-908.
- Luthin, J. N., 1966. *Drainage Engineering*. J. Wiley, N.Y., 1966.
- Τερζίδης, Γ., και Καραμούζης, Δ., 1986. *Στραγγίσεις Γεωργικών Εδαφών*. Εκδ. Ζήτη, Θεσ/νίκη.
- Τερζίδης, Γ., 2003. *Απλή και Ακριβής Μέθοδος Στράγγισης Διαστρωμένων Εδαφών*. Πρακτ. 3ου Εθν. Συνεδρίου της, ΕΓΜΕ, Οκτώβριος 2003, Θεσ/νίκη, σελ. 505- 513.
- Τερζίδης, Γ. και Παπαζαφειρίου, Ζ., 1997. *Γεωργική Υδραυλική*. Εκδ. Ζήτη, Θεσ/νίκη.
- Τζιμόπουλος, Χ. Δ., 1997. *Στραγγίσεις-Υδραυλική Φρεάτων*. Εκδ. Ζήτη, Θεσ/νίκη.
- Toksöz, S. and Kirkham, Don, 1971a. *Steady Drainage of Layered Soils: I. Theory*. J. Irrig. and Drain. Div., Amer. Soc. Civil Eng. Proc. 97(IR1):1-18.
- Toksöz, S., and Kirkham, Don, 1971b. *Steady Drainage of Layered Soils: II. Nomographs*. J. Irrig. and Drain. Div., Amer. Soc. Civil Eng. Proc. 97(IR1):19-37.

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΧΕΙΡΙΣΜΩΝ ΘΥΡΟΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΜΙΚΡΗΣ ΠΡΕΣΠΑΣ ΣΤΗ ΣΤΑΘΜΗ ΤΗΣ ΛΙΜΝΗΣ

Γ. Παρισόπουλος^{1*}, Μ. Μαλακού², Γ. Σαπουντζάκης¹ και Μ. Γιαμούρη¹

¹ΕΘ.Ι.ΑΓ.Ε., Ινστιτούτο Γεωργικών Μηχανών και Κατασκευών (Ι.ΓΕ.Μ.Κ.),
Δημοκρατίας 61, Άγιοι Ανάργυροι Αττικής, Τ.Κ. 13561 Αθήνα

²Εταιρία Προστασίας Πρεσπών (Ε.Π.Π.), 530 77 Αγ. Γερμανός, Πρέσπες

*E-mail: iamc@ath.forthnet.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διαχείριση της στάθμης της λίμνης Μικρή Πρέσπα, μέσω της λειτουργίας του θυροφράγματος στην περιοχή της Κούλας, επηρεάζει καθοριστικά την αγροτική παραγωγή, αλλά και το οικοσύστημα της περιοχής. Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται διαγράμματα υπολογισμού της επίδρασης στη στάθμη της λίμνης, διάφορων χειρισμών των ρουφρακτών του θυροφράγματος. Με τη βοήθεια των διαγραμμάτων διευκολύνεται η επιτυχής διαχείριση της στάθμης της λίμνης, όπως αποδεικνύεται από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τα δεδομένα του υδρολογικού έτους 2005-2006.

Λέξεις κλειδιά: Μικρή Πρέσπα, διαχείριση στάθμης λίμνης, λειτουργία θυροφράγματος.

DIAGRAMS FOR ASSESSING GATES OPERATION IMPACT ON THE WATER LEVEL OF LAKE MICRO PRESPA

G. Parisopoulos^{1*}, M. Malakou², G. Sapountzakis¹, M. Giamouri¹

¹N.AG.RE.F., Institute of Agricultural Machinery and Construction (I.A.M.C.),
61 Demokratias av., Agioi Anargiroi, PS 13561 Athens

²Society for the Protection of Prespa (S.P.P.), 530 77 Agios Germanos, Prespa

*E-mail: iamc@ath.forthnet.gr

ABSTRACT

Water level management in Lake Micro Prespa, which is achieved through the operation of sluice gates at Koula, has a dominant impact both on the agricultural production as well as on the function of the ecosystem. In the present work a number of diagrams were developed allowing a quick and reliable estimation of the impact on the water lake level of Micro Prespa, of various gates operation scenarios. The use of the above diagrams resulted in successful simulation of gates operation and water level control for the hydrological conditions of year 2005-2006.

Key words: Micro Prespa, lake level management, sluice gate operation.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η λίμνη Μικρή Πρέσπα είναι η μικρότερη λίμνη του συστήματος των λιμνών Μικρή Πρέσπα-Μεγάλη Πρέσπα-Λίμνη Οχρίδας. Οι τρεις λίμνες επικοινωνούν υδραυλικά μεταξύ τους και αποτελούν, ως σύνολο, τη μεγαλύτερη υδάτινη (λιμναία) επιφάνεια στη Βαλκανική χερσόνησο και τη σημαντικότερη από οικολογική άποψη (Catsadorakis, 1997; Hollis and Stevenson, 1997). Το 2000, η Ελλάδα, η Αλβανία και η ΠΓΔ της Μακεδονίας ανακήρυξαν το «Πάρκο Πρεσπών», που περιλαμβάνει τη λεκάνη απορροής της Μικρής και της Μεγάλης Πρέσπας, ως την πρώτη διασυνοριακά προστατευόμενη περιοχή στη Νοτιοανατολική Ευρώπη (Prespa Park, 2003).

Η λίμνη Μικρή Πρέσπα προστατεύεται από τη συνθήκη Ramsar, ως υγρότοπος παγκόσμιας σημασίας, ενώ επιπλέον ισχύουν για αυτήν πλήθος άλλων διατάξεων, σχετικών με την προστασία του περιβάλλοντος σε διεθνές και εθνικό επίπεδο. Η Μικρή Πρέσπα βρίσκεται σε μέσο υψόμετρο +850,00m και έχει σχήμα επίμηκες, με κατεύθυνση ΒΑ-ΝΔ, μέγιστο μήκος 13Km και μέγιστο πλάτος 6Km. Το μέσο βάθος της εκτιμάται σε 4m περίπου και το μέγιστο βάθος σε 8,4m. Το μήκος της ακτογραμμής της στο ελληνικό τμήμα ανέρχεται σε 46,5Km και περιβάλλεται στο μεγαλύτερο τμήμα της από καλαμιώνες. Η υδρόβια βλάστηση καλύπτει περίπου το 25% της επιφάνειας της λίμνης. Στη βόρεια πλευρά της λίμνης υπάρχει διάυλος ανάμεσα στους καλαμιώνες μήκους περίπου 200m και μεταβλητού πλάτους της τάξεως των 10m, μέσω του οποίου η Μικρή Πρέσπα εκφορτίζεται στη Μεγάλη Πρέσπα. Οι δύο λίμνες χωρίζονται με ένα ισθμό μήκους 4Km και πλάτους, που κυμαίνεται από 200m-500m. Ο όγκος νερού στη λίμνη Μικρή Πρέσπα εκτιμάται σε 204,5hm³ για στάθμη +850,60m, ενώ η έκταση της υδάτινης επιφάνειας στη στάθμη αυτή είναι 48,5km², από τα οποία 5km² ανήκουν στην Αλβανία. Η λίμνη εκφορτίζεται στη Μεγάλη Πρέσπα με υπερχειλίση στο ρέμα Κούλας μέσω θυροφράγματος και υπόγεια μέσω του ισθμού, που χωρίζει τη Μικρή από τη Μεγάλη Πρέσπα.

Η διακύμανση της στάθμης της λίμνης επιδρά αποφασιστικά στη λειτουργία όλου του οικοσυστήματος της λίμνης και της παραλίμνιας περιοχής (Parisopoulos and Malakou, 2008). Η βέλτιστη κατάσταση του οικοσυστήματος προϋποθέτει τη διατήρηση υψηλής στάθμης την εαρινή περίοδο (η οποία έχει προσδιοριστεί μεταξύ των υψομέτρων +850,60m και +851,00m) και στη συνέχεια βραδείς ρυθμούς ταπείνωσής της. Τυχόν υψηλή στάθμη την άνοιξη δυσχεραίνει την καλλιέργεια των παραλίμνιων αγρών, λόγω κακής στράγγισης και συνεπώς η διατήρηση της, πλησίον στο ορισμένο κάθε φορά υψόμετρο, πρέπει να είναι ακριβής (Μαλακού κ.α., 2007). Ο έλεγχος της στάθμης επιτυγχάνεται με κατάλληλους χειρισμούς των τεσσάρων ρουφρακτών του θυροφράγματος. Η επίδραση των χειρισμών του θυροφράγματος στη διακύμανση της στάθμης της λίμνης εξαρτάται από το υδατικό ισοζύγιο της λίμνης. Σε περιόδους όπου το ισοζύγιο είναι έντονα πλεονασματικό, με ρυθμό αύξησης μεγαλύτερο από την παροχτευτική ικανότητα του θυροφράγματος (σε δεδομένη στάθμη), το άνοιγμα των ρουφρακτών μειώνει το ρυθμό αύξησης, αλλά δεν αποτρέπει την περαιτέρω άνοδο της στάθμης της λίμνης. Όταν ο ρυθμός αύξησης του ισοζυγίου είναι μικρότερος από την παροχτευτική ικανότητα του θυροφράγματος, τότε, ανάλογα με τους χειρισμούς που θα επιλεγούν, είναι δυνατή η ρύθμιση της μεταβολής της στάθμης (άνοδος ή πτώση). Σε περιόδους με αρνητικό υδατικό ισοζύγιο, που εκδηλώνεται με την πτώση της στάθμης, τυχόν εκροή μέσω του θυροφράγματος επιτείνει το φαινόμενο.

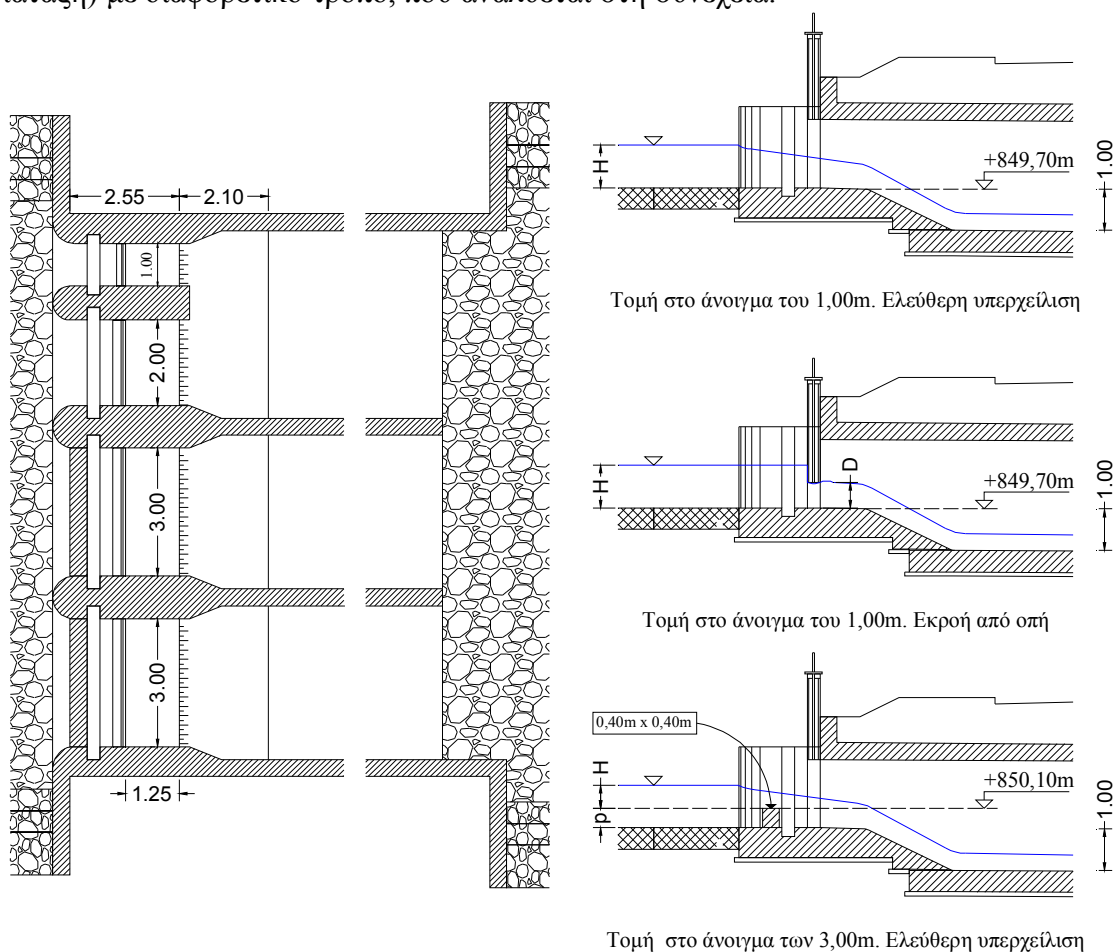
Στην εργασία αυτή δίδονται διαγράμματα υπολογισμού της επίδρασης στη στάθμη διαφόρων χειρισμών των θυροφραγμάτων, τα οποία διευκολύνουν τους διαχειριστές του θυροφράγματος να επιλέγουν τον κατάλληλο κάθε φορά χειρισμό των ρουφρακτών, ώστε η στάθμη της λίμνης να διατηρείται κατά το δυνατόν στο επιθυμητό υψόμετρο. Στη συνέχεια δίδεται παράδειγμα εφαρμογής για το υδρολογικό έτος 2005-2006.

2. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΠΑΡΟΧΗΣ ΥΠΕΡΧΕΙΛΙΣΗΣ

Το θυρόφραγμα αποτελείται από διάταξη τεσσάρων συνεχόμενων επίπεδων μεταλλικών ρουφρακτών, ασπίδων, ύψους 1,60m, αλλά διαφορετικού πλάτους, τοποθετημένων στην ανάντη πλευρά ενός κιβωτοειδούς οχετού. Ο πρώτος και δεύτερος ρουφράκτης έχουν πλάτος 1,00m και 2,00m αντίστοιχα και υψόμετρο υπερχειλίσης +849,70m. Ο τρίτος και τέταρτος ρουφράκτης έχουν πλάτος 3,00m έκαστος και υψόμετρο υπερχειλίσης +850,10m. Η κάτοψη και τρεις, κατά τη ροή, τομές του έργου δίδονται στο Σχήμα 1.

Ρουφράκτες 1 & 2

Ανάλογα με το άνοιγμα των ρουφρακτών και τη στάθμη της λίμνης μπορεί να προκύψουν δύο διαφορετικές καταστάσεις εκροής, ήτοι: α) ελεύθερη υπερχειλίση, όταν οι ρουφράκτες είναι επαρκώς ανοικτοί ώστε η ροή να μην εμποδίζεται. β) εκροή δια μέσου οπής, όταν οι ρουφράκτες είναι μερικώς ανοικτοί. Για κάθε κατάσταση εκροής η παροχή υπολογίζεται προσεγγιστικά (η κατασκευή δεν σχεδιάσθηκε ως μετρητική διάταξη) με διαφορετικό τρόπο, που αναλύεται στη συνέχεια.



Σχήμα 1. Οριζοντιογραφία και τομές (κατά τη ροή) θυροφράγματος Κούλας.

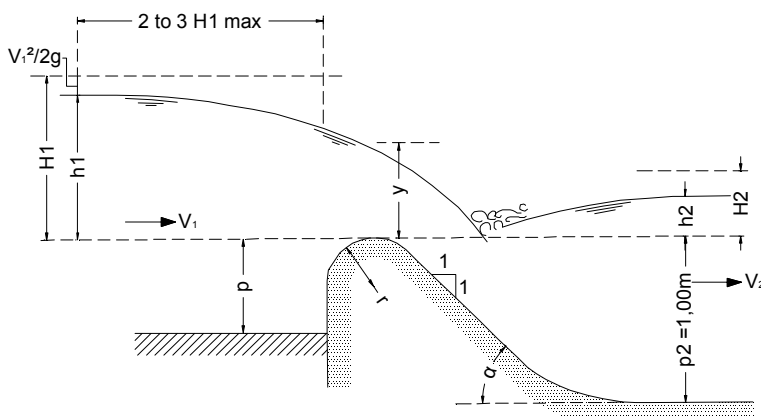
α) Ελεύθερη υπερχειλίση

Η παροχή ελεύθερης εκροής από λίμνη προς μία ορθογωνική διώρυγα με μεγάλη κλίση υπολογίζεται από την εξίσωση 1 (Τερζίδης, 1997) :

$$Q = C * b * H^{3/2} \quad (1)$$

όπου: Q (m^3/sec): η παροχή υπερχειλίσσης, b (m): το πλάτος της διώρυγας, H (m): το υδραυλικό φορτίο υπερχειλίσσης, C ($\text{m}^{1/2}/\text{sec}$) συντελεστής με τιμή 1,705 ($C = g^{1/2} * (2/3)^{3/2}$), g (m/sec^2): η επιτάχυνση της βαρύτητας.

Η τιμή 1,705 του συντελεστής C είναι η θεωρητικά προκύπτουσα, αλλά σε κάθε έργο απαιτείται ο προσδιορισμός της με βάση είτε μετρήσεις, είτε τα ιδιαίτερα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του έργου. Η κατασκευή στους ρουφράκτες 1 και 2 θεωρήθηκε ότι προσομοιάζει με τη διάταξη του Σχήματος 2, για $p=0$, στην οποία ο συντελεστής C λαμβάνει τιμή 1,675 (Bos, 1976).



Σχήμα 2. Σχηματική τομή κυλινδρικού υπερχειλιστή.

β) Ροή δια μέσου οπής

Σε περίπτωση που οι ρουφράκτες είναι μερικώς ανοικτοί, έτσι ώστε να περιορίζουν την ελεύθερη υπερχειλίση, υπάρχει εκροή από οπή χωρίς παρεμπόδιση. Η παροχή δύναται να υπολογισθεί είτε από την εξίσωση (2) (Bos, 1976), είτε από την εξίσωση (3) (Swamee, 1992).

$$Q=C_d^*C_v^*b^*D^{3/2}*\sqrt{2^*g^*((H/D)-C_c)} \quad (2)$$

$$Q = 0.864 * D * b * \left(\frac{H - D}{H + 15 * D} \right)^{0.072} * \sqrt{g * H} \quad (3)$$

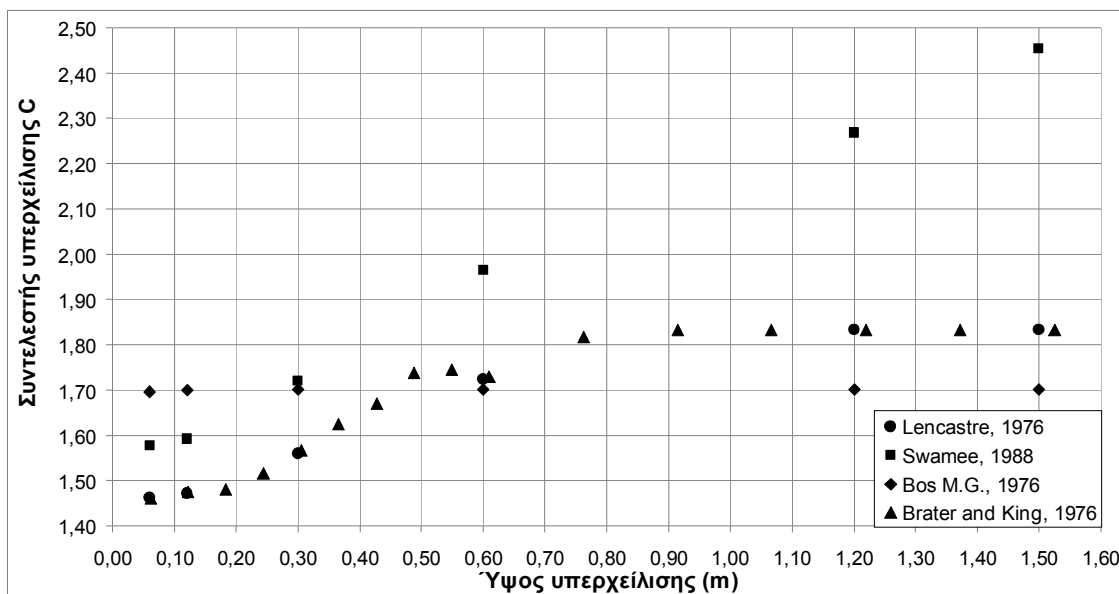
όπου: $D(m)$: το άνοιγμα του θυροφράγματος μετρούμενο από τον πυθμένα, C_d : παράμετρος που ισούται με 0,60 όταν $1,5 < (H/D) < 3,5$ ή 0,605 όταν $3,5 < (H/D) < 5,0$ ή 0,61 όταν $5,0 < (H/D)$, C_v : παράμετρος που λαμβάνει τιμές πλησίον του 1, καθώς η ταχύτητα στη θέση μέτρησης της στάθμης είναι πολύ μικρή, C_c : παράμετρος που λαμβάνει τιμές μεταξύ 0,63 και 0,62.

Για τα δεδομένα του θυροφράγματος των Πρεσπών οι δύο εξισώσεις (2) και (3) δίδουν παραπλήσια αποτελέσματα (οι διαφορές είναι έως του 3%). Στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση (2) με $C_d = 0,60$ και $C_c = 0,625$.

Ρουφράκτες 3 & 4

Οι ρουφράκτες 3 και 4 στην πράξη ανοίγονται ή κλείνονται πλήρως. Λόγω του αναβαθμού (0,4m*0,4m) στην είσοδό τους –ο οποίος δεν δικαιολογείται υδραυλικά– η εκροή αντιστοιχεί σε ροή πάνω από υπερχειλιστή ευρείας στέψης. Εξετάσθηκαν τέσσερις εξισώσεις υπολογισμού της παροχής, οι οποίες έχουν τη γενική μορφή της εξίσωσης (1), με το συντελεστή C να λαμβάνει για τα γεωμετρικά στοιχεία του συγκεκριμένου

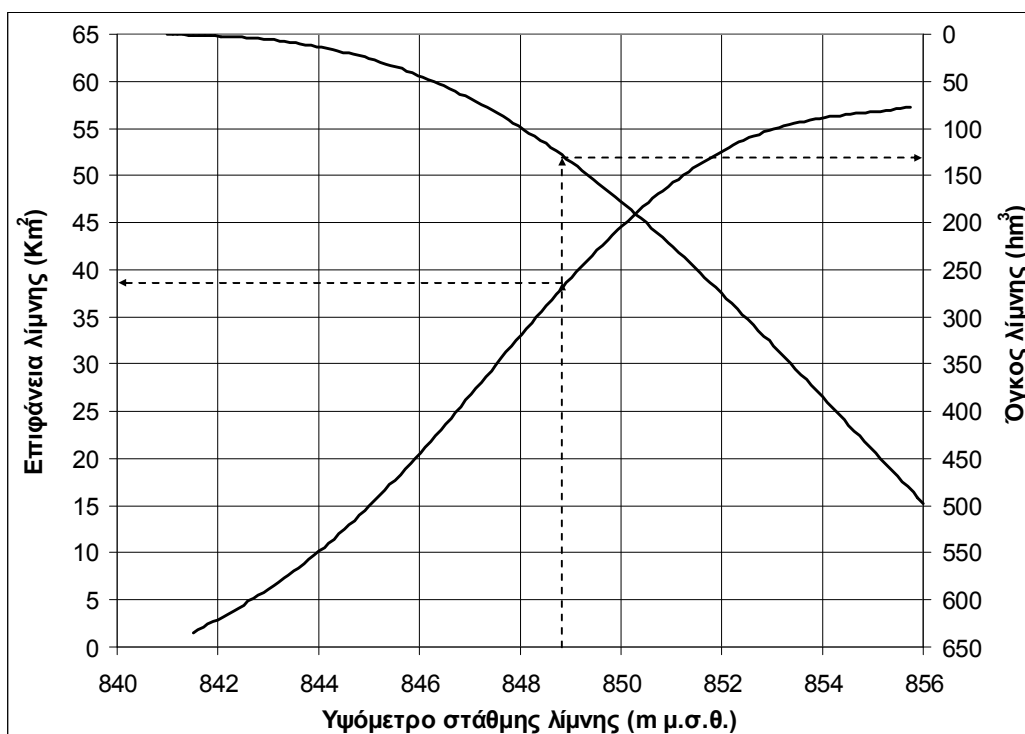
υπερχειλιστή τις τιμές που δίνονται στο Σχήμα 3. Υιοθετήθηκαν οι τιμές του C, που δίδονται από τους Brater και King (1976) οι οποίες έχουν ευρεία αποδοχή.



Σχήμα 3. Μεταβολή συντελεστή υπερχείλισης

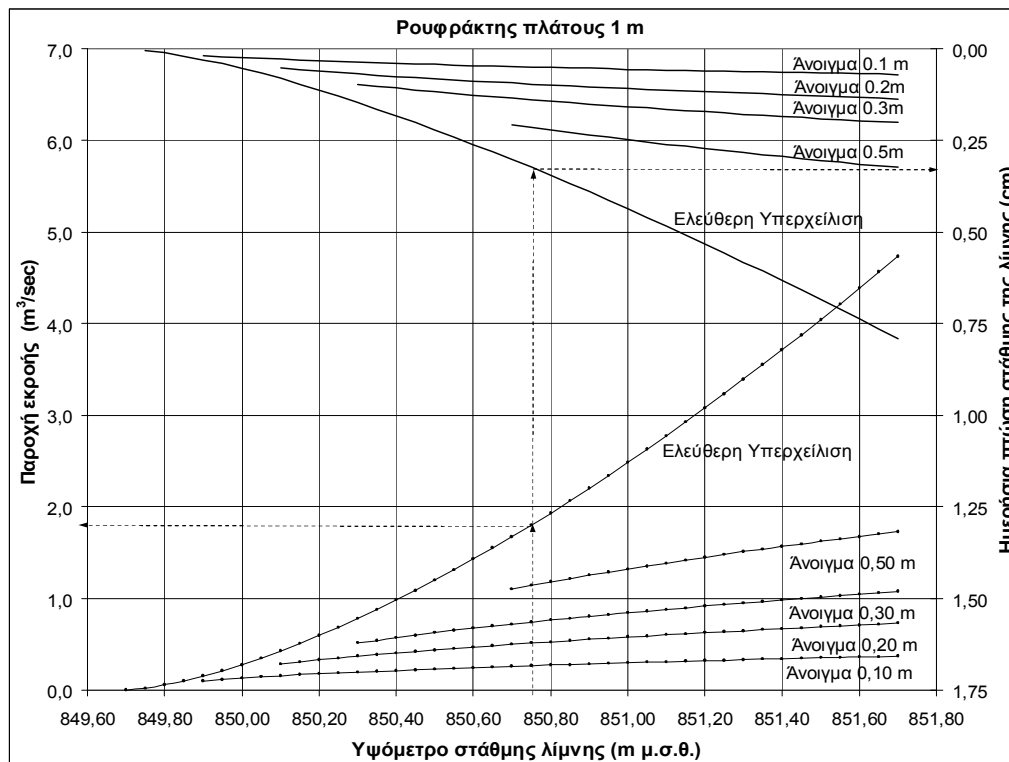
3. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΧΕΙΡΙΣΜΩΝ ΘΥΡΟΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΣΤΗ ΣΤΑΘΜΗ ΤΗΣ ΛΙΜΝΗΣ

Η αντιστοίχιση μιας παροχής εκροής από μία λίμνη σε μεταβολή στάθμης απαιτεί τη γνώση της καμπύλης στάθμης - όγκου, η οποία για τη λίμνη Μικρή Πρέσπα δίδεται στο Σχήμα 4 (Μαλακού κ.α., 2007). Οι υπολογισμοί και τα διαγράμματα της εργασίας βασίστηκαν στην παραδοχή ότι το υδατικό ισοζύγιο της λίμνης, χωρίς τη λειτουργία του θυροφράγματος, είναι σε ισορροπία (εισροές = εκροές).



Σχήμα 4. Καμπύλη υψόμετρου στάθμης – επιφάνειας – όγκου λίμνης Μικρής Πρέσπας

Η επίδραση των χειρισμών του πρώτου ρουφράκτη (πλήρως ή μερικώς ανοικτός) στη στάθμη της λίμνης δίδεται στο Σχήμα 5. Στο Σχήμα 6 δίδεται η επίδραση του πλήρους ανοίγματος κάθε μεμονωμένου ρουφράκτη στη στάθμη της λίμνης, καθώς και πέντε συνδυασμών ανοιγμάτων (προκύπτουν από επαλληλία των στοιχείων για τους μεμονωμένους ρουφράκτες).



Σχήμα 5. Διάγραμμα στάθμης- παροχής εκροής - ημερήσιας πτώσης στάθμης της λίμνης Μικρής Πρέσπας

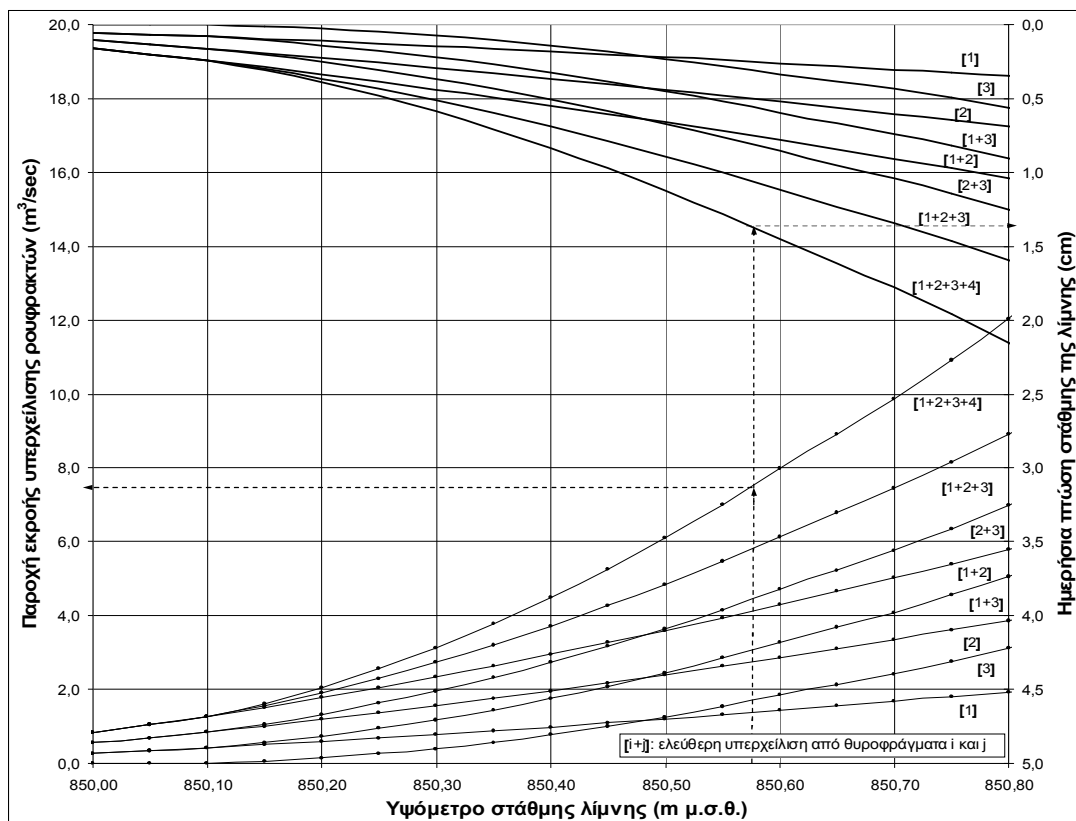
4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

Έγινε προσομοίωση της διαχείρισης του θυροφράγματος από τρεις διαφορετικούς χειριστές, με τη χρήση των δεδομένων της στάθμης του έτους 2005-2006 και του διαγράμματος του Σχήματος 6 και θεωρώντας ότι τα θυροφράγματα μπορούν να είναι μόνο πλήρως ανοικτά ή κλειστά. Επιδίωξη κάθε χειριστή ήταν η διατήρηση της στάθμης της λίμνης στο υψόμετρο στόχο, ορίστηκε στο +850,57m, για το μέγιστο δυνατό διάστημα. Για την εφαρμογή της μεθόδου η μετρηθείσα χρονοσειρά της διακύμανσης της στάθμης μετασχηματίστηκε στη χρονοσειρά που θα καταγραφόταν, εάν όλα τα θυροφράγματα παρέμεναν συνεχώς κλειστά. Με τον τρόπο αυτό έγινε γνωστή η φυσική τάση του συστήματος κάθε χρονική στιγμή. Η διαδικασία που εφαρμόστηκε συνοψίζεται στα εξής:

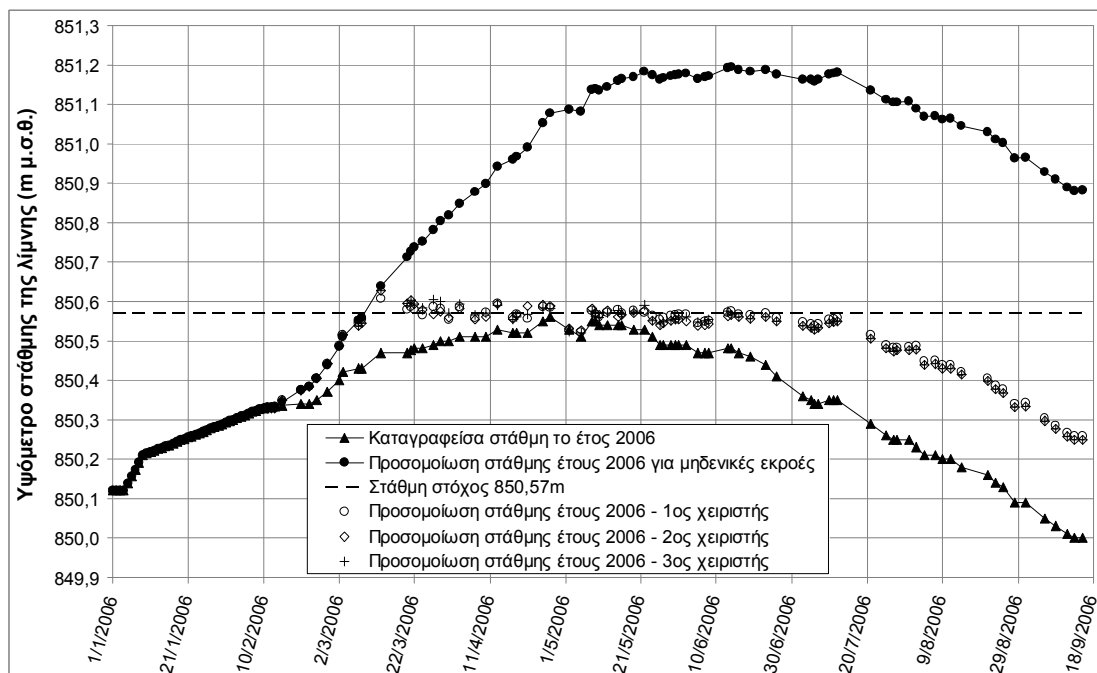
1. Ο χειριστής είχε στη διάθεσή του τα διαγράμματα που αναπτύχθηκαν και τα στοιχεία της στάθμης της λίμνης και των χειρισμών, που είχαν γίνει μέχρι τη στιγμή i , κατά την οποία εκκαλείτο να αποφασίσει για τυχόν απαιτούμενο χειρισμό των ρουφρακτών.
2. Εάν ο χειριστής επέλεγε κάποιο χειρισμό των θυροφραγμάτων τη στιγμή i , η χρονοσειρά της στάθμης της λίμνης από τη στιγμή i και μετά μεταβαλλόταν αναλόγως του όγκου εκροής, που προκάλεσε ο χειρισμός που είχε αποφασίσει.

Η διαχείριση του θυροφράγματος και από τους τρεις χειριστές, για το χρονικό διάστημα από 27/2/2006 έως 14/6/2006, έδωσε ιδιαίτερα ικανοποιητικά αποτελέσματα (Σχήμα 7). Σημειώνεται ότι οι χειριστές δεν είχαν ιδιαίτερη εξειδίκευση και έλαβαν

μόνο ολιγόλεπτη εκπαίδευση για τη χρήση του διαγράμματος. Κάθε απόφαση χειρισμού ή όχι των ρουφρακτών λαμβανόταν σε διάστημα μικρότερο των 5 λεπτών.



Σχήμα 6. Διάγραμμα στάθμης – παροχής εκροής υπερχείλισης ρουφρακτών – ημερήσιας πτώσης στάθμης της λίμνης



Σχήμα 7. Προσομοίωση διαχείρισης θυροφράγματος και στάθμης λίμνης με χρήση του διαγράμματος του σχήματος 6 για τα δεδομένα του υδρολογικού έτους 2005-2006.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα διαγράμματα υπολογισμού της επίδρασης των χειρισμών του θυροφράγματος στη στάθμη της λίμνης Μικρής Πρέσπας, που παρουσιάστηκαν στην εργασία αυτή, αποτελούν ένα απλό και εύχρηστο εργαλείο για τη διαχείριση της στάθμης της λίμνης. Η χρήση τους δεν απαιτεί εξειδικευμένες γνώσεις, ούτε ιδιαίτερη εκπαίδευση και επιτρέπει την εκτίμηση, σε πολύ σύντομο χρόνο, της επίδρασης κάθε χειρισμού ή συνδυασμού χειρισμών στη στάθμη της λίμνης και συνεπώς στη λήψη των κατάλληλων αποφάσεων χειρισμού του θυροφράγματος σε πραγματικό χρόνο. Η χρήση των διαγραμμάτων είναι ανεξάρτητη της στάθμης στόχου. Η ακρίβεια των διαγραμμάτων είναι συνάρτηση της ακρίβειας υπολογισμού των εκροών και του διαγράμματος στάθμης-όγκου της λίμνης. Η χρήση τους σε περιόδους ανόδου ή καθόδου της στάθμης είναι επίσης απλή καθώς απαιτεί μόνο την αφαίρεση ή προσθήκη της εκτιμώμενης μεταβολής της στάθμης (χωρίς κανένα χειρισμό θυροφράγματος).

Σε επόμενο στάδιο προβλέπεται ο προγραμματισμός της διαδικασίας που παρουσιάστηκε, ώστε κάθε χρονική στιγμή να υπολογίζεται αυτόματα ο βέλτιστος χειρισμός. Επίσης, η αξιολόγηση της διαχείρισης σε μια περίοδο θα γίνεται με αντικειμενικούς δείκτες όπως π.χ. αυτοί που αναπτύχθηκαν από τους Parisopoulos et al. (2009) για το οικοσύστημα της Μικρής Πρέσπας (διάρκεια και μέγεθος απόκλισης στάθμης από προκαθορισμένο εύρος, άθροισμα των αποκλίσεων από στάθμη στόχο, διάρκεια υπέρβασης του μέγιστου ρυθμού μεταβολής στάθμης).

Ευχαριστίες

Ευχαριστίες οφείλονται στην Εταιρεία Προστασίας Πρεσπών για την παραχώρηση των στοιχείων πεδίου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Bos, M.G., 1976. *Discharge measurement structures*. Publication 161, Delft Hydraulics Lab, Delft.
- Brater, E.F. and King, H.W., 1976. *Handbook of Hydraulics*. 6th Ed. New York: McGraw Hill Book Company.
- Catsadorakis, G., 1997. *The importance of Prespa National Park for breeding and wintering birds*. Hydrobiologia 351, pp157-174.
- Hollis, G.E., Stevenson, A.C., 1997. *The physical basis of the lake Mikri Prespa systems: geology, climate, hydrology and water quality*. Hydrobiologia 351, pp 1-19.
- Lencastre, A., 1976. *Εγχειρίδιο γενικής υδραυλικής*. Εκδόσεις Μ. Γκιούρδας, Αθήνα.
- Μαλακού, Μ., Καζόγλου, Ι., Κουτσερή, Ε., Παρισόπουλος, Γ., Ρήγας, Α., Ζιάνκας, Γ., Μέρτζιου, Ε., 2007. *Σχέδιο – Οδηγός αποκατάστασης και διαχείρισης των υγρών λιβαδιών στη λίμνη Μικρή Πρέσπα*. Ε.Π.Π., Αγ. Γερμανός. Πρεσπών.
- Parisopoulos, G. and Malakou, M., 2008. *Lake Level Management in Sensitive Ecosystems. The case of Micro Prespa*. World Water Congress and Exhibition, Vienna 7-12 September 2008, Abstracts p. 144.
- Parisopoulos, G.A., Malakou, M., Giamouri, M., 2009. *Evaluation of lake level control using objective indicators: The case of Micro Prespa*. Journal of Hydrology 367, pp 86-92.
- Prespa Park, 2003. Newsletter First Issue, July 2003.
- Swamee, P.K., 1988. *Generalized Rectangular Weir Equations*. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 114, No 8, pp 945-949.
- Swamee, P.K., 1992. *Sluice-gate discharge equations*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol 118, No 1, pp 56-60.
- Τερζίδης Γ.Α., 1997. *Εφαρμοσμένη υδραυλική*. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ ΔΑΣΙΚΩΝ ΠΥΡΚΑΓΙΩΝ ΣΤΙΣ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΕΣ ΑΠΟΡΡΟΕΣ

Κ. Σούλης^{*}, Π. Λόντρα, Δ. Αλωνιστιώτη, Ε. Πολλάλης και Ι. Βαλιάντζας
Τομέας Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και
Γεωργικής Μηχανικής, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Ιερά Οδός 75, 11855 Αθήνα
^{*}E-mail: soco@aua.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται η διερεύνηση της επίδρασης των δασικών πυρκαγιών στις πλημμυρικές απορροές στην υδρολογική λεκάνη του χείμαρρου Λυκόρρεμα του όρους Πεντέλη, η επιφάνεια της οποίας κάηκε στη μεγάλη πυρκαγιά που συνέβη το 1995. Η επίδραση της πυρκαγιάς αυτής στις πλημμυρικές απορροές διερευνάται με την πραγματοποίηση έμμεσων μετρήσεων των μέγιστων παροχών το διάστημα αμέσως μετά την πυρκαγιά και με τη μελέτη των φυσικών-υδραυλικών ιδιοτήτων των εδαφών της λεκάνης πριν και μετά την επίδραση της πυρκαγιάς. Από την ανάλυση των μετρήσεων, συμπεραίνεται ότι η κύρια επίδραση των δασικών πυρκαγιών στις πλημμυρικές απορροές είναι η αύξηση του συντελεστή απορροής με την καταστροφή της φυτοκάλυψης και τη μείωση της διηθητικής ικανότητας του εδάφους. Οι παραπάνω αλλαγές έχουν σαν συνέπεια τη σημαντική αύξηση του κινδύνου πλημμύρας.

Λέξεις κλειδιά: δασική πυρκαγιά, απορροή, υδραυλική αγωγιμότητα στον κορεσμό.

INVESTIGATION OF WILDFIRES EFFECT ON FLOOD RUNOFF

K. Soulis, P. Londra, D. Alonistioti, E. Pollalis and J. Valiantzas
Sector of Water Resources Management, Dept. of Natural Resources Management
and Agricultural Engineering, Agricultural University of Athens,
75, Iera Odos str., GR11855, Athens
^{*}E-mail: soco@aua.gr

ABSTRACT

This study presents the investigation of the impact of wildfires on the peak runoff values of the Lykorrema stream watershed, which is located at the mount Penteli. The surface of this watershed was burned in the wildfire occurred in 1995. The impact on peak runoff values was investigated by indirect measurements of the maximum water flow rates during the post-fire period and by the study of the physical - hydraulic properties of the watershed's soils before and after the impact of fire. The analysis of the measurements indicated that the main ways that the wildfires influence flood risk are the destruction of the vegetation cover and the reduction of the infiltration capacity of the soil. These changes have as an effect the significant increment of flood risk.

Key words: wildfire, runoff, saturated hydraulic conductivity.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια οι αυξανόμενες σε αριθμό δασικές πυρκαγιές στις χώρες της Μεσογείου έχουν δημιουργήσει σημαντικά περιβαλλοντικά προβλήματα. Η Ελλάδα είναι από τις χώρες που πλήττονται ιδιαίτερα από το φαινόμενο αυτό. Τραγικό παράδειγμα αποτελούν οι δασικές πυρκαγιές του θέρους του 2007 που έκαψαν έκταση περίπου 2.8 εκατ. στρεμμάτων δασικών και γεωργικών περιοχών.

Εκτός από τις άμεσες επιπτώσεις των δασικών πυρκαγιών στη φυσική βλάστηση και τις γεωργικές καλλιέργειες, οι δασικές πυρκαγιές έχουν πολύ σημαντική επίδραση στην υδρολογική δίαιτα των λεκανών απορροής. Οι αλλαγές στην υδρολογική δίαιτα συνδέονται άμεσα με την καταστροφή της φυτοκάλυψης του εδάφους, η οποία συνεπάγεται σημαντική μείωση της παρεμπόδισης της βροχής από τα φυτά και άρα αύξηση της επιφανειακής απορροής, και επίσης σημαντική μείωση της εξατμισοδιαπνοής (Morris and Moses, 1987; Prosser and William, 1998; Johansen et al., 2001; Wohlgemuth et al., 2001; Moffet et al., 2007; Pierson et al., 2008). Οι σφοδρές δασικές πυρκαγιές μεταβάλλουν επίσης τις χημικές (DeBano et al., 1977; Giovannini and Lucchesi, 1983) και τις φυσικές (Doehring, 1968; Wells, 1981; Giovannini et al., 1988) ιδιότητες του εδάφους. Ειδικότερα, οι πυρκαγιές καταστρέφουν την οργανική ουσία στο επιφανειακό στρώμα του εδάφους και αλλοιώνουν τη δομή και τη χημική του σύσταση. Ως αποτέλεσμα, δημιουργείται ένα υδροφοβικό στρώμα στην επιφάνεια του εδάφους που μειώνει σημαντικά τη διηθητική του ικανότητά (DeBano, 1971; van Dam et al., 1990). Η συνδυασμένη επίδραση της καταστροφής της φυτικής κάλυψης και της μείωσης της διηθητικής ικανότητας του εδάφους, μπορεί να επιφέρει πολύ σημαντική αύξηση του συνολικού όγκου της επιφανειακής απορροής και να αυξήσει ακόμα περισσότερο τον κίνδυνο εμφάνισης πλημμυρικών φαινομένων.

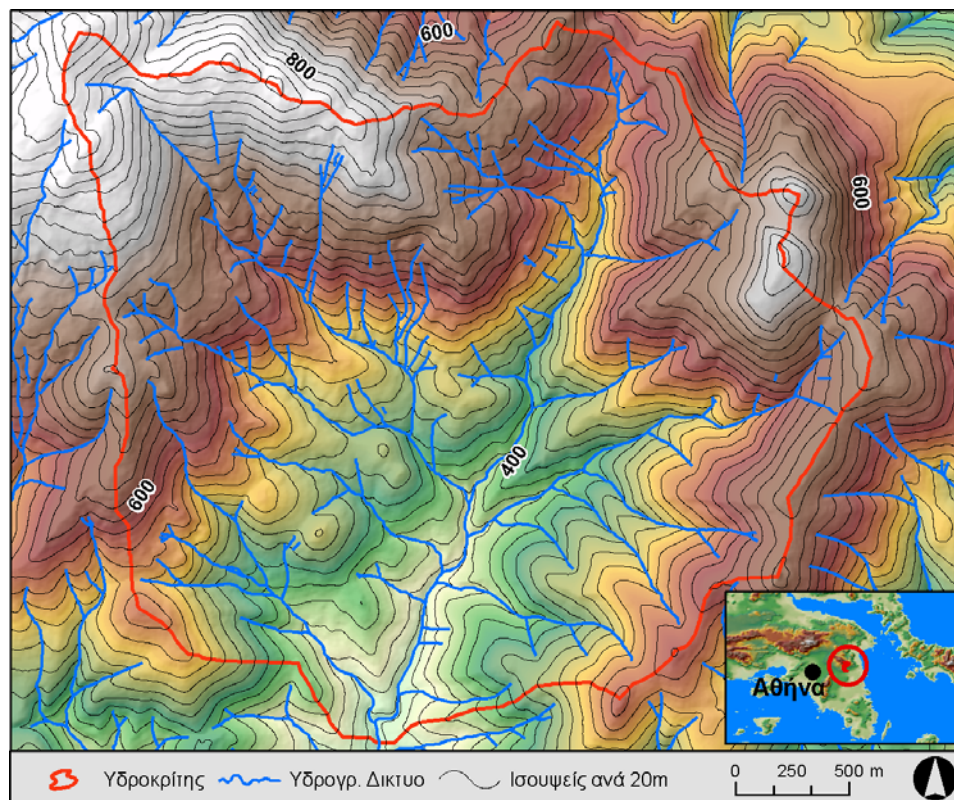
Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας διερευνάται η επίδραση των δασικών πυρκαγιών στις πλημμυρικές απορροές, λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση της πυρκαγιάς τόσο στη φυσική βλάστηση όσο και στις φυσικές και υδραυλικές ιδιότητες του εδάφους. Η ανάλυση της επίδρασης αυτής πραγματοποιείται στην πειραματική υδρολογική λεκάνη του Τομέα Διαχείρισης Υδατικών Πόρων του Γ.Π.Α. (Σούλης και συνεργάτες, 2007). Η πειραματική υδρολογική λεκάνη αποτελεί μέρος της υδρολογικής λεκάνης του χείμαρρου Λυκόρρεμα, του όρους Πεντέλη, οι δασικές εκτάσεις της οποίας καταστράφηκαν στη σφοδρή πυρκαγιά που κατέκαψε μεγάλες εκτάσεις στην Αττική το 1995. Η διερεύνηση βασίζεται σε έμμεση μέτρηση της μέγιστης τιμής της απορροής την περίοδο αμέσως μετά την πυρκαγιά και σε συστηματικές καταγραφές των απορροών που πραγματοποιήθηκαν μετά την αποκατάσταση της βλάστησης στην υδρολογική λεκάνη. Πραγματοποιήθηκε επίσης πειραματική διαδικασία για τη διερεύνηση της επίδρασης της πυρκαγιάς στη διηθητική ικανότητα του εδάφους.

2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η υδρολογική λεκάνη του χείμαρρου Λυκόρρεμα, έχει έκταση 7,8 Km² και περίμετρο 12,2 Km (Σχήμα 1). Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της γεωμορφολογίας της λεκάνης είναι το έντονο ανάγλυφο και οι μεγάλες κλίσεις. Το μέσο υψόμετρο της λεκάνης είναι 560 m, ενώ το ελάχιστο και το μέγιστο υψόμετρό της είναι 280 m και 950 m 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 τμήματα κοίτης έως και 5^{ης} τάξης σύμφωνα με τη μέθοδο Strahler (1952).

Η περιοχή χαρακτηρίζεται από Μεσογειακό ημίξηρο κλίμα. Η μέση ετήσια βροχόπτωση για τα πέντε χρόνια που μελετάται η λεκάνη είναι 595 mm.

Γεωλογικά, η λεκάνη χαρακτηρίζεται από την παρουσία σχιστόλιθων, οι οποίοι καλύπτουν το 96% της έκτασής της, ενώ η υπόλοιπη έκταση καλύπτεται κυρίως από



Σχήμα 1. Χάρτης πειραματικής υδρολογικής λεκάνης.

μάρμαρα. Οι σχιστολιθικοί σχηματισμοί της λεκάνης δεν είναι αδιαπέρατοι λόγω του ισχυρού τεκτονικού κατακερματισμού τους (Baltas et al., 2007). Τα εδάφη 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 λεκάνης, παρουσιάζει μεγάλη ανομοιομορφία.

Σε ότι αφορά στην κάλυψη της γης, το μεγαλύτερο μέρος της λεκάνης παλαιότερα καλυπτόταν από πυκνό πευκοδάσος, το οποίο καταστράφηκε ολοσχερώς από την μεγάλη πυρκαγιά που το 1995 έκαψε την ανατολική πλευρά της Πεντέλης. Σήμερα, το μεγαλύτερο μέρος της λεκάνης καλύπτεται από θάμνους ενώ σε μεγάλο τμήμα της περιοχής αναγεννιέται το παλαιό δάσος με φυσικό τρόπο ή κατόπιν αναδάσωσης. Σημαντική επίδραση στην υδρολογική συμπεριφορά της λεκάνης έχουν το εκτεταμένο δίκτυο δασικών δρόμων (6.2% της συνολικής επιφάνειας).

3. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΩΝ ΠΑΡΟΧΩΝ ΠΡΙΝ ΚΑΙ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

Την περίοδο αμέσως μετά την πυρκαγιά του 1995, εμφανίστηκαν στην περιοχή της μελετώμενης υδρολογικής λεκάνης ασυνήθιστα υψηλές πλημμυρικές αιχμές απορροών. Μεταξύ των μικρών ή μεγαλύτερων καταστροφών που προκάλεσαν αυτές οι πλημμυρικές αιχμές, συμπεριλαμβάνεται και η καταστροφή πετρόκτιστης γέφυρας, η οποία βρισκόταν στην περιοχή Ντράφι του όρους Πεντέλη, κατασκευασμένης τον 18^ο αιώνα. Το γεγονός αυτό αποτέλεσε σημαντική ένδειξη για το ασυνήθιστα μεγάλο μέγεθος της αιχμής της απορροής. Για το λόγο αυτό, πραγματοποιήθηκε μια προσπάθεια εκ των υστέρων εκτίμησης της μέγιστης πλημμυρικής αιχμής της απορροής την περίοδο αμέσως μετά από την πυρκαγιά του 1995.

Για την έμμεση μέτρηση της απορροής αξιοποιήθηκαν σημάδια, τα οποία υποδεικνύουν τη μέγιστη στάθμη του νερού σε πλακοσκεπή αγωγό ορθογωνικής διατομής, ο οποίος βρίσκεται στην έξοδο της πειραματικής υδρολογικής λεκάνης (Σχήμα 2). Ο αγωγός αυτός κατασκευάστηκε αμέσως μετά την καταστροφική δασική πυρκαγιά του 1995 στο πλαίσιο των πραγματοποιηθέντων αντιπλημμυρικών έργων. Το γεγονός αυτό καθιστά βέβαιο ότι τα παρατηρούμενα σημάδια αφορούν την περίοδο μετά την πυρκαγιά.



Σχήμα 2. Σημάδια μέγιστου βάθους ροής στον πλακοσκεπή αγωγό ορθογωνικής διατομής Της πειραματικής υδρολογικής λεκάνης.

Για την εκτίμηση της παροχής, η οποία αντιστοιχεί στη μέγιστη παρατηρούμενη στάθμη, αξιοποιήθηκε το μεγάλο μήκος, η σταθερή γεωμετρία και η σταθερή κλίση του αγωγού. Η εκτίμηση πραγματοποιήθηκε με τον τύπο του Manning, θεωρώντας ότι η κλίση της επιφάνειας του νερού συμπίπτει με την κλίση του πυθμένα. Αυτή η παραδοχή δεν επηρεάζει σημαντικά την ακρίβεια της εκτιμώμενης παροχής λόγω της σημαντικής κλίσης και του μεγάλου μήκους του αγωγού (Chow et al., 1988). Με αυτή τη διαδικασία υπολογίστηκε ότι η μέγιστη παροχή που έχει περάσει από τον αγωγό είναι περίπου ίση με $65 \text{ m}^3/\text{sec}$.

Στη συνέχεια, η παροχή αυτή συγκρίθηκε με τα δεδομένα παροχών που καταγράφονται συστηματικά στην είσοδο του πλακοσκεπούς αγωγού από το Σεπτέμβριο του 2004 έως σήμερα. Η μέγιστη καταγραφείσα τιμή παροχής την περίοδο αυτή είναι $6,9 \text{ m}^3/\text{sec}$, δηλαδή περίπου 10 φορές μικρότερη από τη μέγιστη παροχή μετά από την πυρκαγιά. Συγκρίθηκαν επίσης τα ύψη βροχών που αντιστοιχούν στα σημαντικά γεγονότα καταιγίδων που συνέβησαν από το Σεπτέμβριο του 2004 μέχρι σήμερα με το μέγιστο ύψος βροχής που παρατηρήθηκε την περίοδο αμέσως μετά από την πυρκαγιά του 1995. Με αυτό τον τρόπο διερευνήθηκε αν η ακραία εκτιμώμενη τιμή της παροχής μπορεί να αποδοθεί σε κάποιο εξαιρετικά μεγάλο γεγονός καταιγίδας. Από τη σύγκριση αυτή προέκυψε ότι το μέγιστο ύψος βροχής που παρατηρήθηκε την περίοδο αμέσως μετά από την πυρκαγιά ήταν μικρότερο από τα ύψη βροχής που αντιστοιχούν στις μέγιστες τιμές παροχής των πρόσφατων καταγραφών (Πίνακας 1).

Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται η μέγιστη παροχή, το συνολικό ύψος βροχής και το συνολικό ύψος απορροής, για κάθε γεγονός καταιγίδας, το οποίο προκάλεσε σημαντική απορροή (μέγιστη παροχή $\geq 0,4 \text{ m}^3/\text{sec}$). Επίσης, υποθέτοντας ότι η προσαρμοσμένη κατανομή πιθανότητας, όπως προέκυψε από τη στατιστική ανάλυση των μέγιστων τιμών παροχής, ισχύει και μετά την πυρκαγιά, εκτιμήθηκε ο συνολικός όγκος απορροής που αντιστοιχεί στην περίοδο επαναφοράς της μέγιστης εκτιμώμενης παροχής μετά από την πυρκαγιά.

Η εξαιρετικά μεγάλη τιμή της παροχής, σε συνδυασμό με τα μικρά ύψη βροχής

που μετρήθηκαν την πρώτη περίοδο μετά από την πυρκαγιά (Πίνακας 1), αποτελούν σημαντική ένδειξη ότι η υδρολογική συμπεριφορά της λεκάνης έχει αλλάξει σημαντικά μετά από την πυρκαγιά.

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά των γεγονότων βροχόπτωσης που προκάλεσαν σημαντικές απορροές κατά την περίοδο 12/2004-12/2007.

Νº	Γεγονός	Διάρκεια (h)	Μέγιστη ωριαία ένταση βροχόπτωσης (mm/hr)	Βροχή (mm)	Απορροή (mm)	Μέγιστη Παροχή (m ³ /sec)
1	19/12/2004	25	18,7	91,3	7	6,7
2	29/12/2004	12	7,5	29,7	1	0,8
3	31/12/2004	16	7,3	28,9	1,4	0,4
4	15/01/2005	31	5,8	103,9	5,5	0,8
5	20/01/2005	18	7,4	37,3	2,5	0,6
6	06/08/2005	2	20,4	21	1,6	0,9
7	23/09/2005	7	31,8	35,2	1,9	1,9
8	22/11/2005	22	20,5	114,1	6,1	6,3
9	24/11/2005	21	12,4	85	5,1	3,1
10	25/11/2005	9	7,3	31,6	2,4	2,3
11	05/02/2006	11	11,8	59,8	5,1	6,9
12	09/10/2006	14	15,8	38,6	2,2	2,2
13	10/10/2006	7	20,5	43,2	2,1	3,7
14	30/10/2006	38	10,8	105,9	6,1	1,1
15	11/02/2007	12	14,6	33,6	1,7	1,6
16	22/03/2007	17	8,0	72,2	3,4	1,5
17	08/12/2007	14	12,3	40,1	1,6	1,5
Μέγιστη τιμή αμέσως μετά από την πυρκαγιά (27/1/1996)		<i>Για τα γεγονότα αμέσως μετά από την πυρκαγιά διατίθενται μόνο ημερήσιες τιμές βροχόπτωσης</i>		53	32	65

4. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΠΑΡΑΓΟΝΤΩΝ ΑΥΞΗΣΗΣ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ

Η εκτίμηση της αύξησης του κινδύνου πλημμύρας μετά από δασικές πυρκαγιές είναι ένα σημαντικό πεδίο των υδρολογικών εφαρμογών. Μια συνηθισμένη μέθοδος εκτίμησης είναι η εφαρμογή της μεθόδου SCS-CN (SCS 1956, 1964, 1971, 1985, 1993), με την οποία εκτιμάται η επιφανειακή απορροή πριν και μετά από την πυρκαγιά. Η μέθοδος αυτή επιλέγεται διότι είναι απλή και λαμβάνει υπόψη τους κύριους παράγοντες που επιδρούν στο σχηματισμό άμεσης απορροής, ενσωματώνοντάς τους σε μια μοναδική παράμετρο, τον αριθμό καμπύλης CN. (Ponce and Hawkins, 1996). Η τιμή του CN εξαρτάται μόνο από την κάλυψη του εδάφους και την υδρολογική κατηγορία του εδάφους και λαμβάνεται από πίνακες διαθέσιμους στην τεκμηρίωση της μεθόδου. Κατ' αυτό τον τρόπο, η εκτίμηση του κινδύνου πλημμύρας μετά από δασικές πυρκαγιές μπορεί να πραγματοποιηθεί εύκολα, επιλέγοντας έναν νέο αριθμό καμπύλης που να αντιστοιχεί στις νέες συνθήκες.

Για να διερευνηθεί αν η αλλαγή της κάλυψης του εδάφους, λόγω της καταστροφής της βλάστησης από την πυρκαγιά, είναι η κύρια αιτία εμφάνισης ακραίων πλημμυρικών παροχών, εκτιμήθηκε το ύψος της άμεσης απορροής με τη μέθοδο SCS-CN, επιλέγοντας τις αντίστοιχες παραμέτρους CN για τις δύο κατηγορίες κάλυψης. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 2. Τα σύμπλοκα υδρολογικής κατηγορίας εδάφους – κάλυψης προέκυψαν από συστηματική μελέτη της υδρολογικής λεκάνης, η οποία παρουσιάζεται από τους Soulis et al. (2009).

Πίνακας 2. Εκτίμηση απορροής πριν και μετά την επίδραση της πυρκαγιάς με τη μέθοδο SCS-CN για το μέγιστο ύψος βροχής των 53 mm.

Υδρολογική κατηγορία - κάλυψη	Επιφάνεια %	Πριν την πυρκαγιά		Μετά την πυρκαγιά	
		CN	Απορροή (mm)	CN	Απορροή (mm)
A-Δάσος	77,18	45	0	68	5.7
B- Δάσος	17,76	66	4.6	79	14.6
D - αδιαπέρατο	5,06	97	44.6	97	44.6
Σταθμισμένη Τιμή	100	51	3.1	71	9.2

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 2, το συνολικό ύψος απορροής που προκύπτει τροποποιώντας την παράμετρο CN, ώστε να αντιπροσωπεύει τις νέες συνθήκες κάλυψης εδάφους είναι σημαντικά μεγαλύτερο από το αντίστοιχο ύψος απορροής που προκύπτει χρησιμοποιώντας τον αριθμό CN που αντιστοιχεί στις σημερινές συνθήκες. Παρόλα αυτά η εκτιμώμενη απορροή υπολείπεται σημαντικά της απορροής που προκύπτει με βάση τη στατιστική ανάλυση που περιγράφεται στην προηγούμενη παράγραφο. Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία, εκτός από την άμεση επίδραση της καταστροφής της βλάστησης, πολύ σημαντική επίδραση στην μεταβολή της υδρολογικής διαίτας της λεκάνης απορροής έχει η δημιουργία ενός υδροφοβικού στρώματος στην επιφάνεια του εδάφους κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς, το οποίο αποκαθίσταται μετά από περίοδο ενός ή δύο ετών (Robichaud and Waldrop, 1994; DeBano, 2000). Το υδροφοβικό στρώμα έχει σαν συνέπεια την σημαντική μείωση της διηθητικής ικανότητας του εδάφους.

5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

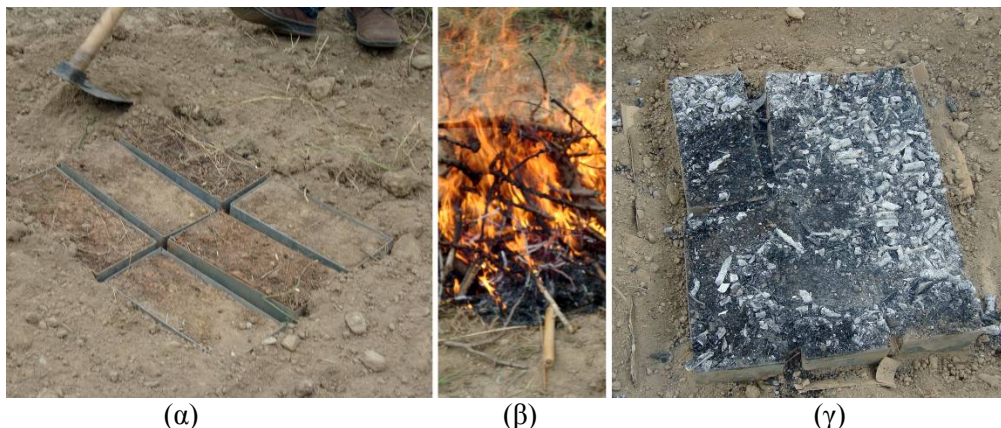
Προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση της πυρκαγιάς στη διηθητική ικανότητα των εδαφών της πειραματικής υδρολογικής λεκάνης πραγματοποιήθηκε πείραμα προσδιορισμού της υδραυλικής αγωγιμότητας στον κορεσμό (K_s) των εδαφών της πειραματικής υδρολογικής λεκάνης πριν και μετά από τη επίδραση της πυρκαγιάς.

Ελήφθησαν αδιατάρακτα δείγματα από το επιφανειακό στρώμα τους εδάφους σε δύο θέσεις, με τη βοήθεια μεταλλικών κυλίνδρων ύψους 7,8 cm και εσωτερικής διαμέτρου 5,8 cm. Η θέση (1) χαρακτηρίζεται από αμμοαργιλώδη εδάφη, ενώ η θέση (2) από αμμοπηλώδη εδάφη. Τα δείγματα μεταφέρθηκαν στο εργαστήριο και διαβρέχτηκαν από τη βάση τους και αφέθηκαν στον κορεσμό για 48h. Ο προσδιορισμός της K_s έγινε με τη μέθοδο σταθερού φορτίου των Klute and Dirksen (1986).

Για τον προσδιορισμό της K_s των εξεταζόμενων εδαφών μετά την επίδραση της πυρκαγιάς, ελήφθησαν αδιατάρακτα δείγματα από τις θέσεις (1) και (2) με τη βοήθεια ειδικά κατασκευασμένων μεταλλικών δειγματοληπτών ορθογωνικής διατομής μήκους 31cm, πλάτους 15 cm και ύψους 10 cm. Τα δείγματα αυτά μεταφέρθηκαν στο εργαστήριο και αφέθηκαν για αεροξήρανση με στόχο την επίτευξη συνθηκών υγρασίας και θερμοκρασίας αντίστοιχων με αυτές του θέρους. Για τη μέτρηση της υδραυλικής αγωγιμότητας, K_s , μετά την πυρκαγιά, έλαβε χώρα προσομοίωση του φαινομένου της πυρκαγιάς στα εδαφικά δείγματα. Για τον σκοπό αυτό, τα δείγματα μεταφέρθηκαν σε πειραματικό αγρό του Εργαστηρίου Γεωργικής Υδραυλικής του Γ.Π.Α. Συγκεκριμένα, ανοίχτηκε λάκκος ίδιων διαστάσεων με αυτών των εδαφικών δειγμάτων και ενσωματώθηκαν πλήρως στο υπάρχον έδαφος (Σχήμα 3α). Στη συνέχεια τα δείγματα καλύφθηκαν με φυτικά υπολείμματα που συλλέχθηκαν από το χώρο δειγματοληψίας. Ακολούθησε ανάφλεξη των φυτικών υπολειμμάτων και παραμονή των δειγμάτων σε συνθήκες πυρκαγιάς (Σχήμα 3β). Τέλος, πραγματοποιήθηκε λήψη αδιατάρακτων δειγμάτων (Σχήμα 3γ) και μέτρηση της υδραυλικής αγωγιμότητας μετά την πυρκαγιά με την προαναφερθείσα μέθοδο. Οι τιμές της K_s που μετρήθηκαν μετά την επίδραση της πυρκαγιάς

ήταν πολύ μικρότερες από αυτές που μετρήθηκαν στις υπάρχουσες συνθήκες. Συγκεκριμένα, για τη θέση (1) παρατηρήθηκε μείωση 72% ($K_{s, \text{πριν}}=8,97 \text{ cm/h}$ και $K_{s, \text{μετά}}=2,50 \text{ cm/h}$) και για τη θέση (2) παρατηρήθηκε μείωση 83% ($K_{s, \text{πριν}}=14,80 \text{ cm/h}$ και $K_{s, \text{μετά}}=2,55 \text{ cm/h}$). Οι τιμές αφορούν μέσες τιμές τεσσάρων επαναλήψεων.

Η σημαντική μείωση της K_s , και κατά συνέπεια η μείωση της διηθητικής ικανότητας του εδάφους, είναι πιθανά αποτέλεσμα της δημιουργίας ενός υδροφοβικού στρώματος στην επιφάνεια του εδάφους λόγω της καταστροφής της οργανικής ουσίας που προκλήθηκε από την πυρκαγιά (DeBano, 1971; van Dam et al., 1990).



Σχήμα 3. Προσομοίωση πυρκαγιάς στο πλαίσιο της πειραματικής διαδικασίας.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σύμφωνα με όσα προαναφέρθηκαν, γίνεται αντιληπτό ότι για την ακραία παροχή αιχμής, η οποία υπολογίστηκε έμμεσα με την εμπειρική εξίσωση του Manning, ευθύνεται τόσο η καταστροφή της φυτικής κάλυψης όσο και η μεταβολή των υδραυλικών ιδιοτήτων του εδάφους. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με τα αποτελέσματα των μετρήσεων, παρατηρήθηκε πολύ μεγάλη μείωση της υδραυλικής αγωγιμότητας μετά την πυρκαγιά και στις δύο θέσεις. Συμπεραίνεται λοιπόν, ότι για την εκτίμηση του κινδύνου πλημμύρας πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη και η επίδραση της πυρκαγιάς στις ιδιότητες του εδάφους.

Η μέθοδος που ακολουθήθηκε αφήνει πολλά περιθώρια σφάλματος. Αυτό οφείλεται κυρίως στη μη ύπαρξη άμεσων και συστηματικών μετρήσεων την περίοδο αμέσως μετά από την πυρκαγιά. Για το λόγο αυτό, τα παραπάνω αποτελέσματα είναι επισφαλής. Η έλλειψη συστηματικών υδρομετρικών καταγραφών στην Ελλάδα δεν επιτρέπει τη διεξαγωγή αντίστοιχων μελετών, από τις οποίες να μπορούν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα. Παρόλα αυτά τα κύρια αποτελέσματα της εργασίας επιβεβαιώνουν τα δεδομένα που παρουσιάζονται στη διεθνή βιβλιογραφία από μελέτες που πραγματοποιήθηκαν σε άλλες χώρες, τονίζοντας την αναγκαιότητα περαιτέρω συστηματικής διερεύνησης του φαινομένου αυτού στη Ελλάδα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Baltas, E.A., Dervos, N.A. and Mimikou, M.A., 2007. Technical note: *Determination of the SCS initial abstraction ratio in an experimental watershed in Greece*. Hydrology and Earth System Sciences, 11(6):1825-1829.
- Chow V.T., Maidment, D. and Mays, L., 1988. *Applied Hydrology*, McGraw-Hill, 281-285.
- DeBano, L.F., Dunn, P.H. and Conrad, C.E., 1977. *Fire's effect on physical and chemical properties of chaparral soils*. USDA Forest Service General Technical Report, WO-3: 65-7.
- DeBano, L.F., 1971. *The effect of hydrophobic substances on water movement in soil during infiltration*. Soil Science Society of America Proceedings, 35(2): 340-343.

- DeBano, L.F., 2000. *The role of fire and soil heating on water repellency in wildland environments: a review*. Journal of Hydrology, 231: 195-206.
- Doehring, D.O., 1968. *The effect of fire on geomorphic processes in the San Gabriel Mountains, California*. Contributions to Geology, 7(1): 43-65.
- Giovannini, G., Lucchesi, S., Giachetti, M., 1988. *Effect of heating on some physical and chemical parameters related to soil aggregation and erodibility*. Soil Science, 146(4): 255-261.
- Giovannini, G., Lucchesi, S., 1983. *Effect of fire on hydrophobic and cementing substances of soil aggregates*. Soil Science, 136(4): 231-236.
- Johansen, M.P., Hakonson, T.E. and Breshears, D.D., 2001. *Post-fire runoff and erosion from rainfall simulation: contrasting forests with shrublands and grasslands*. Hydrological Processes, 15: 2953-2965.
- Klute, A. and Dirksen, C., 1986. *Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. 2nd ed., Monograph 9, Am. Soc. of Agronomy, Madison, WI. In A. Klute (ed.). Hydraulic conductivity and diffusivity: laboratory methods, 687-734 pp.
- Moffet, C.A., Pierson, F.B., Robichaud, P.R., Spaeth, K.E., and Hardegree, S.P., 2007. *Modeling soil erosion on steep sagebrush rangeland before and after prescribed fire*. Catena, 71: 218-228.
- Morris, S.E. and Moses, T.A., 1987. *Forest fire and the natural soil erosion regime in the Colorado Front Range*. Annals of the Association of American Geographers, 77: 245-254.
- Pierson, F.B., Robichaud, P.R., Moffet, C.A., Spaeth, K.E., Hardegree, S.P., Clark, P.E., and Williams, C.J., 2008. *Fire effects on rangeland hydrology and erosion in a steep sagebrush dominated landscape*. Hydrological Processes, 22: 2916-2929.
- Ponce, V.M. and Hawkins, R.H., 1996. *Runoff curve number: Has it reached maturity?* Journal of Hydrological Engineering. ASCE, 1(1): 11-18.
- Prosser, I.P. and Williams, L., 1998. *The effect of wildfire on runoff and erosion in native Eucalyptus forest*. Hydrological Processes, 12: 251-265.
- Robichaud, P.R. and Waldrop, T.A., 1994. *A comparison of surface runoff and sediment yields from low-severity and high-severity site preparation burns*. Water Resources Bulletin, 30: 27-34.
- SCS national engineering handbook, Section 4: Hydrology, 1956, 1964, 1971, 1985, 1993. Soil Conservation Service, USDA, Washington, D.C.
- Soulis, K.X., Valiantzas, J.D., Dercas, N. and Londra, P.A., 2009. *Analysis of the runoff generation mechanism for the investigation of the SCS-CN method applicability to a partial area experimental watershed*. Hydrological Earth System Sciences, 13: 605-615.
- Strahler, R.E., 1952. *Hypsometric (area- altitude) analysis of erosional topography*. Geological Society of America Bulletin, 63: 1117-1142.
- Van Dam, J.C., Hendrickx, J.M.H., van Ommen, H.C., Bannink, M.H., van Genuchten, M.Th. and Dekker, L.W., 1990. *Water and solute movement in a coarse-textured waterrepellent field soil*. Journal of Hydrology, 120: 359-379.
- Wells II, W.G., 1981. *Some effects of brushfires on erosion processes in coastal Southern California*. Erosion and Sediment Transport in Pacific Rim Steeplands. IAHS Publ., No. 132: 305-342.
- Wohlgemuth, P.M., Hubbert, K.R., and Robichaud, P.R., 2001. *The effects of log erosion barriers on post-fire hydrologic response and sediment yield in small forested watersheds, Southern California*. Hydrological Processes, 15: 3053-3066.
- Σούλης, Κ., Δέρκας, Ν. και Βαλιάντζας, Ι.Δ., 2007. *Παρουσίαση πειραματικής λεκάνης απορροής στον χείμαρρο Λυκόρρεμα του όρους Πεντέλη*. Πρακτικά 5ου Εθνικού Συνεδρίου Γεωργικής Μηχανικής, Λάρισα: 18-20 Οκτωβρίου.

ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΚΛΙΜΑΤΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΩΝ ΣΤΟ ΥΔΑΤΙΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΜΙΚΡΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ ΛΕΚΑΝΩΝ ΑΠΟΡΡΟΗΣ

Κ. Χατζηπαραδείση¹, Κ. Τολικά² και Ν. Θεοδοσίου³

^{1,3}Τομέας Υδραυλικής και Τεχνικής Περιβάλλοντος, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 54 124 Θεσσαλονίκη

²Τομέας Μετεωρολογίας – Κλιματολογίας, Τμήμα Γεωλογίας, Σχολή Θετικών Επιστημών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 54 124 Θεσσαλονίκη
E-mails: ¹hatzil@civil.auth.gr, ²diatol@geo.auth.gr, ³niktheod@civil.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διαφαινόμενη περίοδος κλιματικών αλλαγών επιβάλλει την μεταβολή των πρακτικών διαχείρισης των φυσικών πόρων μεταξύ των οποίων πρωτεύοντα ρόλο έχει η διαχείριση των υδατικών πόρων. Βασική παράμετρος αναγνώρισης των επιπτώσεων των κλιματικών αλλαγών είναι η εκτίμηση του υδατικού ισοζυγίου των λεκανών απορροής. Στην παρούσα εργασία τα δεδομένα ενός σύγχρονου μοντέλου δυναμικού υποβιβασμού κλίμακας χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία μελλοντικών προβολών των μέσων μηνιαίων και ακραίων βροχοπτώσεων και θερμοκρασιών στην, μικρής κλίμακας, λεκάνη απορροής των Μουδανιών Χαλκιδικής. Με βάση τα στοιχεία αυτά, τα οποία εμφανίζουν καλύτερη προσομοίωση της θερμοκρασίας από αυτήν των βροχοπτώσεων, επιχειρείται η εκτίμηση του υδατικού ισοζυγίου της λεκάνης απορροής. Το συμπέρασμα που προκύπτει από την εφαρμογή αυτή, πέραν της εμφανούς κατασπατάλησης των ανανεώσιμων αποθεμάτων, είναι η επιδείνωση του υδατικού ισοζυγίου λαμβάνοντας υπόψη και την αναμενόμενη μεταβολή του προφίλ των βροχοπτώσεων και την εμφάνιση πιο συχνών ακραίων φαινομένων.

Λέξεις κλειδιά: Διαχείριση υδατικών πόρων, κλιματικές αλλαγές, υδατικό ισοζύγιο.

CLIMATE CHANGE IMPACTS ON THE WATER BALANCE OF SMALL SCALE WATER BASINS

K. Chatziparadeisi¹, K. Tolika² and N. Theodosiou³

^{1,3}Div. of Hydraulics and Environmental Engineering, Department of Civil Engineering, School of Engineering, Aristotle University of Thessaloniki, 54 124 Thessaloniki

²Department of Meteorology – Climatology, School of Geology, Faculty of Science, Aristotle University of Thessaloniki, 54 124 Thessaloniki

E-mails: ¹hatzil@civil.auth.gr, ²diatol@geo.auth.gr, ³niktheod@civil.auth.gr

ABSTRACT

The current climate change period imposes the need to change the natural resources management practices among which water resources management is of major importance. In this paper, data extracted from one of the most recent Regional Climate Models (RCMs) were applied aiming at the analysis of their future projections concerning the monthly average and extreme phenomena distribution of rainfall and temperature over the small scale water basin of Moudania in Chalkidiki. Based on these data which generally simulate temperature better rather than rainfall, an estimation over the water balance is attempted. The conclusion derived from this application, beyond the apparent misuse of the water resources, is that the water balance will be further degraded taking into consideration the estimated alteration of the rainfall profile to more extreme and intense phenomena

Key words: Water resources management, Climate change, water balance.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο πλαίσιο των κλιματικών αλλαγών που έχουν καταγραφεί κατά τη διάρκεια του 20ού αιώνα (IPCC, 2007a), είναι σημαντική η εκτίμηση της απόκρισης των υδατικών συστημάτων σε επίπεδο λεκάνης απορροής για εναλλακτικά σενάρια αλλαγής του κλίματος, με σκοπό την ολοκληρωμένη διαχείριση των υδατικών πόρων. Είναι πλέον αποδεκτό ότι το μεγαλύτερο μέρος της θέρμανσης που καταγράφηκε από τα μέσα του 20^{ου} αιώνα οφείλεται, κατά μεγάλη πιθανότητα, στην αύξηση των ανθρωπογενών εκπομπών των θερμοκηπικών αερίων (CO₂, CH₄, N₂O και υδροφθοράνθρακες) (IPCC, 2007a). Έτσι, τα εναλλακτικά σενάρια που κατασκευάστηκαν με σκοπό τη μελέτη του κλίματος αφορούν στις εκτιμήσεις των επιστημόνων για τις μελλοντικές εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου και τους παράγοντες που τις επηρεάζουν και είναι γνωστά ως σενάρια SRES (IPCC, 2000). Τα σενάρια εκπομπών SRES (οικογένειες σεναρίων A1, A2, B1, B2) βασίζονται σε μία σειρά υποθέσεων για τη μελλοντική εξέλιξη του πληθυσμού, της τεχνολογίας, της οικονομίας, των αλλαγών στις χρήσεις γης και ενέργειας, και αποτελούν κεντρικό συστατικό οποιασδήποτε αξιολόγησης της αλλαγής του κλίματος.

Για την εκτίμηση όμως των παραμέτρων του κλίματος, τα σενάρια εκπομπών χρησιμοποιούνται σε διάφορα κλιματικά μοντέλα, τα οποία προσομοιώνουν τις κλιματικές διαδικασίες της ατμόσφαιρας και των ωκεανών. Τέτοια μοντέλα είναι τα Μοντέλα Γενικής Κυκλοφορίας (General Circulation Models-GCMs), τα οποία προσομοιώνουν την απόκριση του παγκόσμιου κλιματικού συστήματος χρησιμοποιώντας ένα τρισδιάστατο πλέγμα σε όλη την υδρόγειο με ανάλυση ~200-300km (<http://www.metoffice.gov.uk/>). Η ανάλυση αυτή δεν επαρκεί όμως για την προσομοίωση του τοπικού κλίματος, το οποίο επηρεάζεται πολύ από τα τοπικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα κάθε περιοχής (ορεογραφία, αλληλεπιδράσεις εδάφους - θάλασσας, κ.ά.). Προς αυτό το σκοπό εφαρμόζονται διάφορες μέθοδοι στατιστικού ή δυναμικού υποβιβασμού κλίμακας (Tolika et al., 2007; Tolika et al., 2008), οι οποίες στηρίζονται στα Μοντέλα Γενικής Κυκλοφορίας (μοντέλο «γονέας»). Οι μέθοδοι αυτές απαιτούν μεν μεγαλύτερη υπολογιστική δύναμη, αλλά επιτρέπουν τη μελέτη του κλίματος με πολύ υψηλότερη ανάλυση έως και 25km.

Κύριος στόχος της παρούσας εργασίας είναι η εκτίμηση των επιπτώσεων των τοπικών κλιματικών αλλαγών στο υδατικό ισοζύγιο της περιοχής μελέτης, με βάση τα ημερήσια δεδομένα μελλοντικών μεταβολών μέσων θερμοκρασιών και βροχοπτώσεων ενός διαθέσιμου δυναμικού μοντέλου.

2. ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.1. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η Ελλάδα ανήκει στις υποτροπικές περιοχές του πλανήτη και εντάσσεται υδρολογικά στη λεκάνη της Μεσογείου. Εκτός από τα μεσογειακά κλιματικά χαρακτηριστικά της, έχει τοπικές ιδιαιτερότητες, όπως ορεινούς όγκους και πολυάριθμα νησιά, που επηρεάζουν το τοπικό κλίμα. Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε ως περιοχή μελέτης η λεκάνη απορροής της ευρύτερης περιοχής των Μουδανιών, στο νοτιοδυτικό τμήμα του Νομού Χαλκιδικής. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1, η περιοχή έρευνας είναι προς το βορρά λοφώδης και ορεινή, ενώ προσεγγίζοντας τη θάλασσα η περιοχή είναι επίπεδη και πεδινή. Η έκταση της λεκάνης απορροής είναι 127,22 km². Το 80% αυτής είναι καλλιεργήσιμη έκταση και το 20% είναι δασική, ενώ παρουσιάζει συνολικά μικρές κλίσεις και σχετικά διαπερατές εδαφικές στρώσεις, που επηρεάζουν σημαντικά την απορροή της λεκάνης. Στην περιοχή υπάρχει πυκνό υδρογραφικό δίκτυο, στο οποίο κυριαρχούν οι υπόγειοι υδατικοί πόροι. (Λατινόπουλος, 2003)

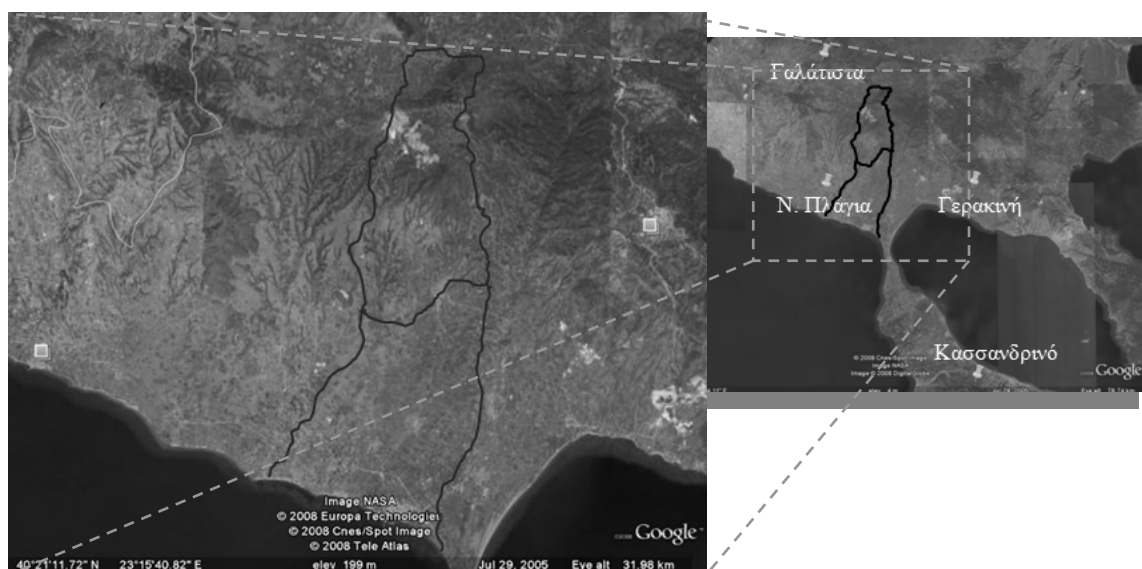
Όσον αφορά στα κλιματικά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης, η μέση ετήσια

θερμοκρασία είναι $16,6^{\circ}\text{C}$ και η μέση ετήσια βροχόπτωση είναι $404,4\text{mm}$. Τα κλιματικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται στην παρούσα μελέτη προέρχονται από τους μετεωρολογικούς σταθμούς Αγίου Μάμα και Πολυγύρου. Για την εκτίμηση των κλιματικών αλλαγών και των μελλοντικών ισοζυγίων στην λεκάνη απορροής των Μουδανιών, χρησιμοποιήθηκαν τα ημερήσια δεδομένα βροχόπτωσης και μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας ενός σύγχρονου δυναμικού μοντέλου υποβιβασμού κλίμακας, του KNMI-RACMO2. Πρόκειται για μοντέλο το οποίο έχει χωρική ανάλυση $25 \times 25\text{ km}$, με «γονέα» μοντέλο γενικής κυκλοφορίας το ECHAM5. Τα δεδομένα καλύπτουν τη χρονική περίοδο 1960-2100 και για τις μελλοντικές προβολές του χρησιμοποιήθηκε το σενάριο εκπομπών SRES A1B. (Τολίκα κ.ά., 2008).

Επιλέχθηκαν τέσσερα σημεία πλέγματος (grid points), τα οποία καλύπτουν την ευρύτερη περιοχή της Χαλκιδικής (Σχήμα 1). Είναι λογικό τα σημεία πλέγματος να μην εφαρμόζουν ακριβώς στην περιοχή έρευνας, γι' αυτό και λαμβάνεται το μεσοποιημένο σημείο πλέγματος, δηλαδή ο μέσος όρος των αντίστοιχων τιμών θερμοκρασίας και υψών βροχής των τεσσάρων σημείων. Παράλληλα, επειδή τα σημεία καλύπτουν μεγάλη περιοχή, εξετάζονται τα αποτελέσματα των μοντέλων και για το πλησιέστερο σημείο πλέγματος, που είναι στα Νέα Πλάγια, και επιχειρείται σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Πίνακας 1. Συντεταγμένες των τεσσάρων σημείων πλέγματος.

Σημείο πλέγματος	Grid point 1 Κασσανδρινό	Grid point 2 Ν. Πλάγια	Grid point 3 Γερακινή	Grid point 4 Γαλάτιστα	Μεσοποιημένο Grid point
Γεωγραφικό μήκος	$23,45^{\circ}$	$23,19^{\circ}$	$23,47^{\circ}$	$23,21^{\circ}$	$23,33^{\circ}$
Γεωγραφικό πλάτος	$40,03^{\circ}$	$40,27^{\circ}$	$40,25^{\circ}$	$40,49^{\circ}$	$40,26^{\circ}$



Σχήμα 1. Η λεκάνη απορροής των Μουδανιών (με μαύρο περίγραμμα και διαχωρισμό πεδινής-λοφώδους περιοχής) και τα τέσσερα σημεία πλέγματος σε μεγαλύτερο πλάνο της λεκάνης απορροής (πάνω-δεξιά). (Πηγή: GoogleEarth)

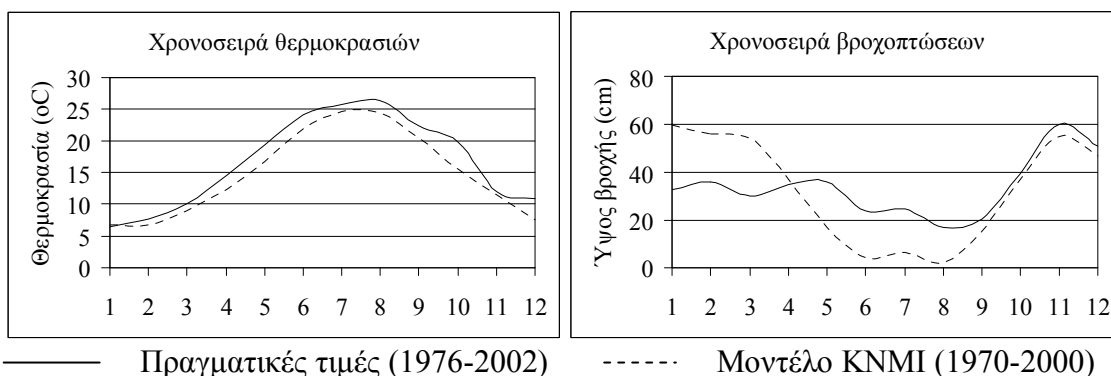
2.2. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΛΙΜΑΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΜΕ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ

Σε πρώτη φάση, για την αξιολόγηση των μοντέλων, επιχειρήθηκε η σύγκριση της μηνιαίας κατανομής μέσων θερμοκρασιών και βροχοπτώσεων της περιόδου 1970-2000,

όπως υπολογίστηκαν από το μοντέλο, με πραγματικές τιμές παρατηρήσεων της περιόδου 1976-2002 (Σχήμα 2). Όπως φαίνεται και στο σχήμα, οι τιμές που προέρχονται από το μοντέλο διαφέρουν, σε μικρότερο ή μεγαλύτερο βαθμό, από τις πραγματικές τιμές, ειδικά όσον αφορά στις βροχοπτώσεις. Ο βασικός λόγος που συμβαίνει αυτό, πέρα από τη δυσκολία προσομοίωσης της φυσικής μεταβλητότητας της παραμέτρου, είναι ότι τα τοπικά χαρακτηριστικά της περιοχής των Μουδανιών δε λαμβάνονται υπόψη από το μοντέλο στις διάφορες παραμετροποιήσεις (Χατζηπαραδείση, 2008).

Παρατηρώντας τα διαγράμματα, διαπιστώνεται ότι οι θερμοκρασίες προσεγγίζονται πολύ καλύτερα απ' ό,τι οι βροχοπτώσεις. Αυτό ισχύει γενικά στα κλιματικά μοντέλα, διότι η προσομοίωση των βροχοπτώσεων περιλαμβάνει παραμετροποιήσεις, όπως για την πρόγνωση των νεφών, που εμπεριέχουν μεγαλύτερο ποσοστό αβεβαιότητας. Στις βροχοπτώσεις οι αποκλίσεις του μοντέλου είναι σχετικά μεγαλύτερες. Γενικά διαπιστώνουμε ότι τους μήνες Μάιο ως Αύγουστο το μοντέλο δεν προσεγγίζει ικανοποιητικά τις πραγματικές τιμές των βροχοπτώσεων, με αποκλίσεις έως και 27,3 mm, ενώ οι χειμερινοί μήνες προσομοιώνονται γενικά καλύτερα.

Με τη βοήθεια του στατιστικού ελέγχου t-test υπολογίζεται ότι ισχύει $P > 0,05$ για το μοντέλο KNMI, επομένως οι διαφορές των αποτελεσμάτων του από τις τιμές των παρατηρήσεων δεν είναι στατιστικά σημαντικές. Από την εξέταση του πλησιέστερου σημείου πλέγματος προκύπτουν οι ίδιες παρατηρήσεις.



— Πραγματικές τιμές (1976-2002) - - - - - Μοντέλο KNMI (1970-2000)
Σχήμα 2. Μηνιαία κατανομή μέσων θερμοκρασιών και βροχοπτώσεων της περιόδου 1970-2000 για το μεσοποιημένο σημείο πλέγματος σε σύγκριση με τιμές παρατηρήσεων της περιόδου 1976-2002.

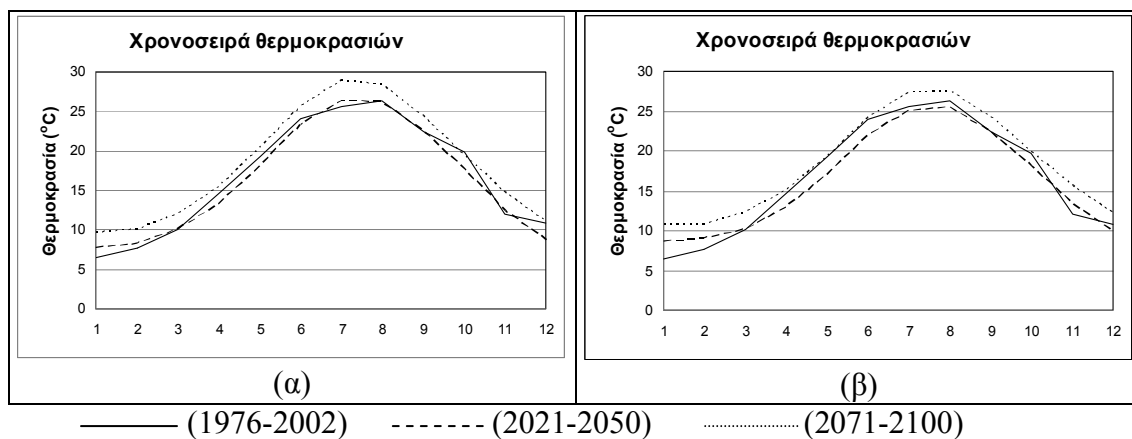
2.3. ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΚΤΙΜΗΣΕΙΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

Επιλέγονται δύο μελλοντικές περιόδους, οι τριακονταετίες 2021-2050 και 2071-2100, οι οποίες παρουσιάζονται σε σύγκριση με την περίοδο ελέγχου 1976-2002 (Σχήμα 3).

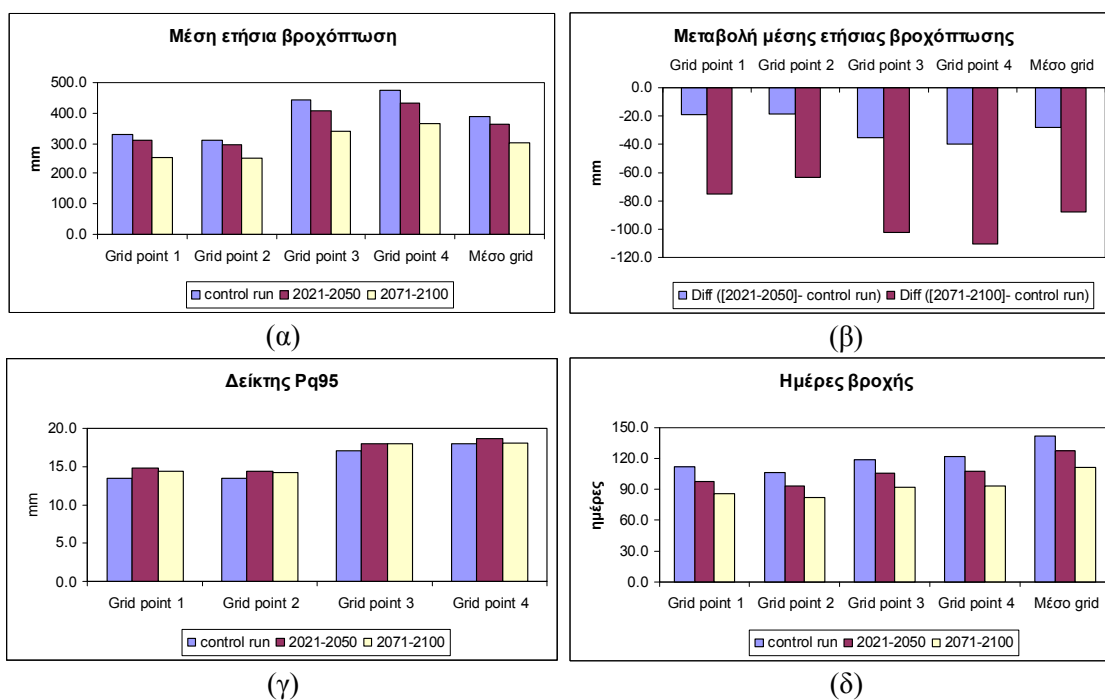
Όσον αφορά στις βροχοπτώσεις, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το μοντέλο εκτιμά ότι η μέση ετήσια βροχόπτωση θα μειωθεί κατά τη διάρκεια του 21^{ου} αιώνα. Η μείωση είναι μεγαλύτερη κατά την τελευταία τριακονταετία του 21^{ου} αιώνα. Τη μεγαλύτερη μείωση εμφανίζει το τέταρτο σημείο πλέγματος, όπου τα ύψη βροχής αναμένεται ότι θα μειωθούν ως και 110 mm. Σύμφωνα λοιπόν με τις μελλοντικές προβολές του μοντέλου χρησιμοποιώντας το A1B σενάριο εκπομπών, τα ετήσια ποσά βροχής αναμένεται να παρουσιάσουν μείωση στην περιοχή μελέτης όπως χαρακτηριστικά φαίνεται και στα Σχήματα 4.α και 4.β.

Όσον αφορά στις ακραίες βροχοπτώσεις, μελετώνται οι δείκτες των ακραίων βροχοπτώσεων Rq95, δηλαδή το 95^ο ποσοστημόριο της βροχόπτωσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.γ. Για τα τέσσερα σημεία πλέγματος ο πρώτος αυτός δείκτης των ακραίων βροχοπτώσεων φαίνεται ότι θα παρουσιάσει μια μικρή αύξηση κατά τις μελλοντικές περιόδους. Χαρακτηριστικό μάλιστα είναι ότι τη μεγαλύτερη αύξηση την παρουσιάζει

την πρώτη μελλοντική 30ετία (2021-2050) και όχι τη δεύτερη. Μοναδική εξαίρεση παρουσιάζει το τέταρτο σημείο πλέγματος. Η παρατήρηση αυτή σε συνδυασμό με την μείωση των ημερών βροχής (Σχήμα 4.δ) οδηγεί στην επιβεβαίωση του αναμενόμενου ότι δηλαδή η σημαντικότερη αλλαγή που ενδέχεται να προκύψει δεν είναι τόσο η συνολική μείωση των βροχοπτώσεων όσο η ένταση των ακραίων φαινομένων με ότι αυτό συνεπάγεται.



Σχήμα 3. Μηνιαία κατανομή μέσων θερμοκρασιών για το μεσοποιημένο (διάγραμμα α) και το πλησιέστερο (διάγραμμα β) σημείο πλέγματος για τις περιόδους 2021-2050 και 2071-2100 σε σύγκριση με πραγματικές τιμές παρατηρήσεων.



Σχήμα 4. Μηνιαία κατανομή μέσων θερμοκρασιών για το μεσοποιημένο σημείο πλέγματος και μέση ετήσια βροχόπτωση όλων των σημείων πλέγματος για τις περιόδους 2021-2050 και 2071-2100 σε σύγκριση με πραγματικές τιμές παρατηρήσεων.

2.4. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ

Οι υπολογισμοί του υδατικού ισοζυγίου (Λατινόπουλος, 2003) μπορούν γενικά να εκφραστούν από την παρακάτω εξίσωση:

$$V = P - Et - G + DS - Ax \quad (2.1)$$

στην οποία χρησιμοποιούνται τα ετήσια ισοδύναμα ύψη απορροής (V), κατακρημνίσεων (P), εξατμισοδιαπνοής (Et), διήθησης στο έδαφος (G), μεταβολής του αποθηκευμένου ύδατος στον υδροφορέα (DS) και υδροληψίας (Ax). Για τους υπολογισμούς αυτούς χρησιμοποιούνται οι μέσες τιμές θερμοκρασίας και βροχοπτώσεων ανά εντεκαετία (Χατζηπαραδείση, 2008), όπως υπολογίζονται από τα μοντέλα, καθώς και η κατανάλωση του νερού σε $m^3/έτος$, όπως εκτιμάται για κάθε χρήση (Λατινόπουλος, 2003), χωρίς όμως μεταβολή των παραμέτρων που επηρεάζουν την εξατμισοδιαπνοή λόγω κλιματικών αλλαγών, ώστε να δοθεί έμφαση στην επιρροή του προφίλ των βροχοπτώσεων στο υδατικό ισοζύγιο. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για τους υπολογισμούς ήταν η μέθοδος Thornthwaite.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ

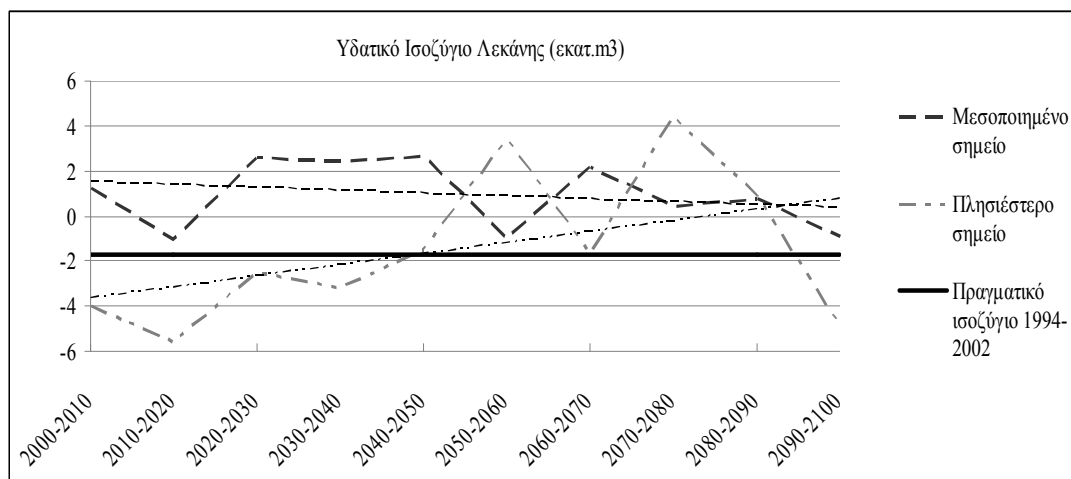
Το υδατικό ισοζύγιο της λεκάνης των Μουδανιών για την περίοδο 1994-2002 υπολογίστηκε $-1,72 \text{ εκατ.}m^3$ (Λατινόπουλος, 2003) με βάση την εξίσωση που αναλύθηκε προηγουμένως. Οι υδατικές ανάγκες υπερέβαιναν δηλαδή τη φυσική προσφορά των ανανεώσιμων αποθεμάτων του νερού. Στο Σχήμα 5 παρουσιάζονται τα υδατικά ισοζύγια της λεκάνης για την περίοδο 2000-2100, με βάση τις εκτιμήσεις του μοντέλου για τις μηνιαίες τιμές μέσης θερμοκρασίας και ύψους βροχής στο μεσοποιημένο και το πλησιέστερο σημείο πλέγματος αντίστοιχα (Χατζηπαραδείση, 2008; Χατζηπαραδείση και Θεοδοσίου, 2009).

Οι τάσεις είναι εμφανείς στο Σχήμα 5, όπου φαίνεται ξεκάθαρα ότι για το μεσοποιημένο σημείο πλέγματος το υδατικό ισοζύγιο εμφανίζει τάση μείωσης έως και το 2100, ενώ το πλησιέστερο σημείο πλέγματος δίνει τάση αύξησης του ισοζυγίου. Τα αποτελέσματα για το μεσοποιημένο σημείο πλέγματος είναι περισσότερο αναμενόμενα, με βάση τις εκτιμήσεις που δείχνουν μείωση των μέσων βροχοπτώσεων στη λεκάνη, αν και όλες οι τιμές των ισοζυγίων είναι μεγαλύτερες σε σχέση με την πραγματική τιμή της περιόδου 1994-2002. Επιτυγχάνεται όμως καλύτερη σύγκλιση με το πραγματικό ισοζύγιο, ενώ για το πλησιέστερο σημείο πλέγματος έχουμε μεγαλύτερη διασπορά γύρω από την πραγματική τιμή του ισοζυγίου.

Δεδομένου όμως ότι η εξέταση των μελλοντικών προβλέψεων για τον ακραίο Rq95 φανερώνει αύξηση των ακραίων βροχοπτώσεων, θεωρείται ότι αυτό θα προκαλέσει αντίστοιχη αύξηση των επιφανειακών απορροών (χαρακτηριστικό των ακραίων βροχοπτώσεων) και ως εκ τούτου μείωση του ποσοστού κατείσδυσης με συνέπεια την μείωση και του υδατικού ισοζυγίου. Έτσι λαμβάνοντας υπόψιν την παραπάνω παρατήρηση η εκτίμηση του υδατικού ισοζυγίου αναμένεται να είναι δυσμενέστερη αυτής που απεικονίζεται στο Σχήμα 5 χωρίς όμως να μπορεί να προσδιοριστεί με ασφάλεια το μέγεθος της μείωσης αυτής αφού αυτή συναρτάται με την αντίστοιχη μείωση του ποσοστού κατείσδυσης.

Γενικά, το μοντέλο KNMI δίνει κυρίως θετικά ισοζύγια για το μεσοποιημένο σημείο πλέγματος και κυρίως αρνητικά ισοζύγια για το πλησιέστερο σημείο πλέγματος, με τιμές όμως πολύ αισιόδοξες σε σχέση με την πραγματική τιμή του ισοζυγίου της περιόδου 1976-2002. Επομένως συμπεραίνεται ότι δείχνει μια θετική επίδραση των μελλοντικών κλιματικών αλλαγών στα υδατικά αποθέματα, σε σύγκριση πάντα με το πραγματικό ισοζύγιο της περιόδου 1976-2002. Η επίδραση αυτή οφείλεται προφανώς περισσότερο στην εκτιμώμενη αύξηση των ακραίων βροχοπτώσεων, γιατί οι θερμοκρασίες παρουσιάζουν σαφή αύξηση σε όλα τα μοντέλα. Όσον αφορά στο πλησιέστερο σημείο, σε σύγκριση με το μεσοποιημένο για κάθε μοντέλο, έχουμε ακόμη μικρότερες τιμές του ισοζυγίου για όλες τις δεκαετίες ως το 2050. Αυτό μπορεί να δικαιολογηθεί εξαιτίας των μεγαλύτερων θερμοκρασιών και μικρότερων υψών βροχής που εκτιμώνται για το πλησιέστερο σημείο, τα οποία έχουν ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη εξάτμιση,

μικρότερες απορροές και κατεισδύσεις.



Σχήμα 5. Υπολογισμός του υδατικού ισοζυγίου της λεκάνης ανά δεκαετία για τα δύο σημεία πλέγματος (πλησιέστερο και μεσοποιημένο) σε σχέση με το πραγματικό ισοζύγιο.

Αντίστοιχη εκτίμηση του υδατικού ισοζυγίου επιχειρήθηκε και για τη θεώρηση των σεναρίων μεταβολής μόνο των θερμοκρασιών, θεωρώντας τις βροχοπτώσεις ίσες με τις πραγματικές τιμές των παρατηρήσεων. Οι τιμές του ισοζυγίου υπολογίστηκαν στο σύνολό τους αρνητικές με μικρές μεταβολές ανά δεκαετία για όλα τα μοντέλα, κάτι που φανερώνει ότι οι μεταβολές στη θερμοκρασία δεν προκαλούν μεγάλες μεταβολές στο υδατικό ισοζύγιο. Αντίθετα, οι αλλαγές στις βροχοπτώσεις έχουν μεγάλη επίδραση στα υδατικά αποθέματα και είναι ο συνδυασμός μηνιαίας θερμοκρασίας και βροχόπτωσης που οδηγεί στην τελική διαμόρφωση του ισοζυγίου. Γι' αυτό και ενώ οι θερμοκρασίες αυξάνονται σταθερά ως το 2100, το υδατικό ισοζύγιο δεν ακολουθεί μια παράλληλη σταθερή πορεία μείωσης.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το βασικό συμπέρασμα που προκύπτει από την ανάλυση του υδατικού ισοζυγίου της περιοχής της λεκάνης απορροής των Μουδανιών Χαλκιδικής είναι η κατασπατάληση των ανανεώσιμων υδατικών αποθεμάτων. Αυτό ισχύει είτε λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση των κλιματικών αλλαγών είτε όχι.

Όσον αφορά στην επίδραση των κλιματικών αλλαγών στην λειτουργία των υδατικών συστημάτων της περιοχής παρατηρείται ότι η μέση θερμοκρασία κατά τη διάρκεια του 21ου αιώνα αναμένεται να αυξηθεί, οι μέσες βροχοπτώσεις να μειωθούν, ενώ οι ακραίες βροχοπτώσεις εκτιμάται ότι θα αυξηθούν. Λαμβάνοντας δε υπόψη το γεγονός ότι οι ακραίες βροχοπτώσεις δεν ευνοούν την κατείσδυση του νερού και τον εμπλουτισμό του υπόγειου υδροφορέα εξαιτίας της έντασής τους, αναμένεται να επέλθει μια ακόμα δυσμενέστερη κατάσταση του υδατικού ισοζυγίου. Το συμπέρασμα αυτό υποστηρίζεται και από το γεγονός ότι όλες οι χρήσεις νερού της περιοχής καλύπτονται από αντλήσεις από τον υπόγειο υδροφορέα. Δεν θα πρέπει να αγνοηθεί φυσικά και το γεγονός ότι τα υπόγεια υδατικά συστήματα αποκρίνονται γενικά πιο αργά στην κλιματική αλλαγή από ό,τι τα αντίστοιχα επιφανειακά (IPCC, 2007b). Βέβαια, οι εδαφικές στρώσεις είναι σχετικά διαπερατές ευνοώντας την κατείσδυση, αλλά οι υπόγειοι πόροι βρίσκονται σε μεγάλο βάθος (Λατινόπουλος, 2003) και έτσι επηρεάζονται πιο αργά.

Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι όλες οι εκτιμήσεις που έγιναν από το μοντέλο ενέχουν ένα ποσοστό αβεβαιότητας, που οφείλεται σε συστηματικά σφάλματα από το «γονέα» μοντέλο μεγαλύτερης κλίμακας, είτε εξαιτίας της τραχείας του ανάλυσης είτε

λόγω των παραμετροποιήσεων των φυσικών διαδικασιών, καθώς και στη μη παραμετροποίηση τοπικών χαρακτηριστικών. Ο προσδιορισμός της αβεβαιότητας των εκτιμήσεων ως προς τις πραγματικές τιμές της περιόδου ελέγχου εξετάστηκε αναλυτικότερα (Χατζηπαραδείση Κ., 2008; Χατζηπαραδείση, Κ. και Ν. Θεοδοσίου, 2009) και η σύγκριση με τα πραγματικά δεδομένα κρίθηκε ικανοποιητική. Πάντως η μεταφορά των επιπτώσεων των κλιματικών αλλαγών σε μικρής κλίμακας λεκάνες απορροής θα πρέπει να αντιμετωπίζεται με προσοχή και επιφύλαξη λόγω της ανεπαρκούς, ακόμα, κάλυψης που προσφέρει η διαδικασία υποβιβασμού της κλίμακας αλλά και λόγω της αστάθειας που παρουσιάζουν τα κλιματικά μοντέλα σε ορισμένες παραμέτρους, όπως για παράδειγμα οι βροχοπτώσεις.

Ευχαριστίες

Η παρούσα εργασία χρησιμοποίησε στοιχεία που προέκυψαν από το ευρωπαϊκό ερευνητικό πρόγραμμα European Commission ENSEMBLES project (Contract number GOCE-CT-2003-505539 με επιστημονικώς υπεύθυνο τον κ. Παναγιώτη Μαχαίρα, Καθηγητής Κλιματολογίας Α.Π.Θ.).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- IPCC, 2000. *Special Report on Emissions Scenarios*. Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Nebojsa Nakicenovic and Rob Swart (Editors), IPCC Secretariat, Cambridge University Press, UK. 570 pp.
- IPCC, 2007a. *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Pachauri, R.K and Reisinger, A. (Editors), Geneva, Switzerland, 104 pp.
- IPCC, 2007b. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson (Editors), Cambridge University Press, Cambridge, UK, 976pp.
- Λατινόπουλος, Π., 2003. *Εκπόνηση σχεδίου διαχείρισης υδάτινου δυναμικού για ύδρευση-άρδευση*. Ερευνητικό Έργο, Φορέας Ανάθεσης Δήμος Μουδανίων, Θεσσαλονίκη.
- Τολικά, Κ., Κοστοπούλου, Ε., Τεγούλιας, Ι., Αναγνωστοπούλου, Χ., Μαχαίρας, Π., 2008. *Μελλοντικές εκτιμήσεις ακραίων βροχοπτώσεων και θερμοκρασιών στη Μεσόγειο: Σενάρια τριών σύγχρονων δυναμικών μοντέλων*, 9ο Πανελλήνιο Συν. Μετεωρολογίας - Κλιματολογίας και Φυσικής της Ατμόσφαιρας, Θεσσαλονίκη, σελ. 505-512.
- Tolika, K., Anagnostopoulou, C., Maheras, P., Vafiadis, M., 2008. *Simulation of future changes in extreme rainfall and temperature conditions over the Greek area: A comparison of two statistical downscaling approaches*. Global and Planetary Change, 63 (2): 132-151.
- Tolika, K., Maheras, P., Vafiadis, M., Flokas, H.A., Arseni-Papadimitriou, A., 2007. *Simulation of seasonal precipitation and raindays over Greece: a statistical downscaling technique based on artificial neural networks (ANNs)*. International Journal of Climatology, 27: 861-881.
- Χατζηπαραδείση Κ., 2008. *Διαχείριση υδατικών πόρων υπό συνθήκες κλιματικών αλλαγών*. Διπλωματική εργασία, Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Ειδίκευσης - Προστασία Περιβάλλοντος και Βιώσιμη Ανάπτυξη, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη.
- Χατζηπαραδείση, Κ. και Θεοδοσίου, Ν., 2009. *Εκτίμηση υδατικού ισοζυγίου υπό συνθήκες κλιματικών αλλαγών: Εφαρμογή στη λεκάνη απορροής των Μουδανίων Χαλκιδικής*, κοινό συνέδριο 11^ο ΕΥΕ και 7^ο ΕΕΔΙΠ, Βόλος, σελ. 19-26.