

8^ο ΕΘΝΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ



ΥΔΑΤΙΚΟΙ ΠΟΡΟΙ

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΒΙΟΣΤΕΡΕΩΝ ΣΕ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟ ΜΕ ΕΛΛΕΙΜΜΑΤΙΚΗ ΑΡΔΕΥΣΗ ΣΕ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΥ ΦΥΤΟΥ

Μαρία Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη¹, Χρήστος Νάκας¹, Δημήτριος Δημάκας¹

¹Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Σχολή Γεωπονικών Επιστημών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Οδός Φυτόκου, Νέα Ιωνία Μαγνησίας, Τ.Κ. 38446
msak@uth.gr, cnakas@uth.gr, dimakas@uth.gr

Στην παρούσα εργασία μελετάται η επίδραση της εφαρμογής βιοστερεών σε καλλιέργεια γλυκού σόργου. Θεωρώντας το γλυκό σόργο ως πιθανή εναλλακτική καλλιέργεια για την παραγωγή βιομάζας και βιοαιθανόλης στην Ελλάδα στο προσεχές μέλλον, η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στην παραγωγή βιομάζας και στο ύψος των φυτών. Η επίδραση των βιοστερεών στην καλλιέργεια του γλυκού σόργου ερευνήθηκε κατά τα έτη 2009 και 2010 στο Αγρόκτημα του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Το πειραματικό σχέδιο ήταν το τυχαίοποιημένο σχέδιο σε ομάδες με 6 μεταχειρίσεις και 3 επαναλήψεις. Οι μεταχειρίσεις περιλάμβαναν εφαρμογή βιοστερεών με δόση άρδευσης ίση με το 80% και 60% της ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής, εφαρμογή ανόργανου λιπάσματος με δόση άρδευσης ίση με το 80% και 60% της ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής και μάρτυρες με δόση άρδευσης ίση με το 80% και 60% της ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής.

Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης έδειξαν ότι η εφαρμογή των βιοστερεών θα μπορούσε να αντικαταστήσει την εφαρμογή των ανόργανων λιπασμάτων με καλύτερα ή τα ίδια αποτελέσματα στην παραγωγή βιομάζας και ότι πολύτιμο αρδευτικό νερό μπορεί να εξοικονομηθεί.

Λέξεις κλειδιά: βιοστερεά, ελλειμματική άρδευση, ενεργειακά φυτά, βιομάζα.

APPLICATION OF BIOSOLIDS COMBINED WITH DEFICIT IRRIGATION TO ENERGY CROP

Maria Sakellariou-Makrantonaki¹, Christos Nakas¹, Dimitrios Dimakas¹

¹Department of Agriculture Crop Production and Rural Environment, School of Agricultural Sciences, University of Thessaly, Fytokou Street, N. Ionia, GR-38446, Greece
msak@uth.gr, cnakas@uth.gr, dimakas@uth.gr

The effects of biosolids application to sweet sorghum crop were examined in a field work in 2009 and 2010 at the farm of the University of Thessaly, in Velesino, Magnesia, Central Greece. Considering sweet sorghum as a possible alternative crop for biomass and bioethanol production in Greece in the near future, the present work focuses on the biomass productivity and the height of the plants of this crop as affected by the application of biosolids accompanied by deficit irrigation. Six treatments with three replications were organized in a randomized complete block design as follows. The treatments involved the application of biosolids with irrigation dose equal to the 80% and 60% of the daily evapotranspiration, application of inorganic fertilizer with irrigation dose equal to the 80% and 60% of the daily evapotranspiration and controls with irrigation dose equal to the 80% and 60% of the daily evapotranspiration.

The results of this study showed that biosolids application could replace the inorganic fertilizers application with better or the same results in biomass production and that valuable irrigation water can be saved under deficit irrigation.

Key words: biosolids, deficit irrigation, energy crop, biomass.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα επεξεργασμένα αστικά απόβλητα ή αλλιώς βιοστερεά είναι ένα από τα τελευταία προϊόντα της επεξεργασίας των αστικών αποβλήτων στους βιολογικούς καθαρισμούς. Συνήθως περιέχουν υψηλά επίπεδα οργανικής ουσίας (40-70%) και είναι πλούσια σε άζωτο (N) και φώσφορο (P), τα οποία είναι στοιχεία απαραίτητα για την ανάπτυξη των φυτών. Οι ευεργετικές ιδιότητες των βιοστερεών σαν εδαφοβελτιωτικά είναι γενικότερα αναγνωρισμένες.

Όταν προστίθενται στο έδαφος, αυξάνουν την οργανική ουσία του εδάφους, μειώνουν το ειδικό του βάρος και αυξάνουν την ικανότητα συγκράτησης του νερού (Ippolito et al., 2012, Khaleel et al., 1981, Powers et al., 1975). Με την εφαρμογή των βιοστερεών αυξάνεται το πορώδες του εδάφους

δηλαδή βελτιώνεται η δομή του, με αποτέλεσμα να εμποδίζεται η δημιουργία επιφανειακής κρούστας, να μειώνονται τα αποτελέσματα της συμπίεσης του εδάφους (Pagliai and Antisari, 1993) και να βελτιώνεται ο αερισμός και η διείσδυση των φυτικών ριζών στο έδαφος (USEPA, 1999). Επίσης, το νερό παραμένει στο ριζόστρωμα λόγω της μείωσης της διήθησης, της εξάτμισης και της απορροής (USEPA, 1999).

Τα βιοστερεά επίσης αποτελούν σημαντική πηγή θρεπτικών στοιχείων για τις καλλιέργειες. Τα μακροθρεπτικά στοιχεία όπως το άζωτο (N) και ο φώσφορος (P) που είναι απαραίτητα για τις καλλιέργειες βρίσκονται σε ικανοποιητικές ποσότητες, ενώ το τρίτο στοιχείο το κάλιο (K) βρίσκεται σε χαμηλές ποσότητες. Τα βιοστερεά

μπορούν να αποτελέσουν επίσης πηγή μικροθρεπτικών στοιχείων όπως ο σίδηρος (Fe), το βόριο (B), ο χαλκός (Cu), το νικέλιο (Ni), καθώς και άλλων στοιχείων που είναι απαραίτητα για την ανάπτυξη των φυτών (Erstein, 2003). Επιπρόσθετα, τα φυτά μπορούν να δεσμεύσουν από το έδαφος πιο εύκολα τα θρεπτικά στοιχεία και το νερό. Σε πολλές περιπτώσεις αυξάνεται η παραγωγή και η ποιότητα των φυτών.

Την τελευταία δεκαετία η επιστημονική κοινότητα έχει αρχίσει να ενδιαφέρεται για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως το βιοντήζελ και η βιοαιθανόλη σε μια προσπάθεια να αντικατασταθούν τα παραδοσιακά καύσιμα και να μειωθούν οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Η πολιτική της Ευρωπαϊκής Ένωσης ορίζει ότι μέχρι το έτος 2020, το μερίδιο της ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές σε όλες τις μορφές μεταφορών πρέπει να έχει ποσοστό τουλάχιστον 10% της τελικής κατανάλωσης ενέργειας στις μεταφορές σε κάθε μέλος κράτος (Οδηγία 2009/28/EK).

Οι καλλιέργειες μπορούν να παράγουν έλαιο για βιοντήζελ, ζυμώσιμους υδρογονάνθρακες για αιθανόλη ή ξηρή ουσία για καύση και πυρόλυση. Ανάμεσα στις μονοετείς ενεργειακές καλλιέργειες που μπορούν να παράγουν σταθερές ποσότητες βιομάζας το σόργο έχει σημαντικό δυναμικό παραγωγής ακόμα και σε καταστάσεις περιορισμένης διαθεσιμότητας νερού (Cosentino, 1996, Foti et al., 1996). Το γλυκό σόργο είναι πιο κατάλληλο για την παραγωγή βιοαιθανόλης καθώς έχει μεγάλη παραγωγή σε ζυμώσιμους υδρογονάνθρακες (Dolciotti et al., 1998, Whitfield et al., 2012).

Θεωρώντας το γλυκό σόργο ως πιθανή εναλλακτική καλλιέργεια για την παραγωγή βιομάζας και βιοαιθανόλης στην Ελλάδα στο προσεχές μέλλον, σκοπός της εργασίας είναι να διερευνηθεί η επίδραση της εφαρμογής των βιοστερεών σε καλλιέργεια γλυκού σόργου σε συνδυασμό με ελλειμματική άρδευση, στην παραγωγή βιομάζας και στο ύψος των φυτών.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Η επίδραση της εφαρμογής των βιοστερεών στην καλλιέργεια γλυκού σόργου μελετήθηκε στο Αγρόκτημα του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στο Βελεστίνο τα έτη 2009 και 2010. Το έδαφος είναι αργιλοπηλώδες και κατατάσσεται σαν *Typic Xerochrept*. Κάθε πειραματικό τεμάχιο είχε επιφάνεια 32 τ.μ. και απόσταση μεταξύ των τεμαχίων 1,5 m. Το πειραματικό σχέδιο ήταν το τυχαιοποιημένο σχέδιο σε ομάδες με 6 μεταχειρίσεις και 3 επαναλήψεις όπως φαίνεται παρακάτω:

α) Εφαρμογή βιοστερεών με δόση άρδευσης ίση με το 80% της ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής (B80).

β) Εφαρμογή ανόργανου λιπάσματος με δόση άρδευσης ίση με το 80% της ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής (F80).

γ) Μάρτυρας με δόση άρδευσης ίση με το 80% της ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής (C80).

δ) Εφαρμογή βιοστερεών με δόση άρδευσης ίση με το 60% της ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής (B60).

ε) Εφαρμογή ανόργανου λιπάσματος με δόση άρδευσης ίση με το 60% της ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής (F60).

στ) Μάρτυρας με δόση άρδευσης ίση με το 60% της ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής (C60).

Τα βιοστερεά παρήχθησαν στην μονάδα Βιολογικού Καθαρισμού του Δήμου Βόλου. Μετά από την αερόβια και αναερόβια επεξεργασία των αστικών αποβλήτων, την πάχυνσή τους και το πέρασμά τους από την ταινιοφίλτροπρέσα, η ιλύς υπέστη αποξήρανση και αποστείρωση με τη μέθοδο της υπέρυθρης ακτινοθερμικής επεξεργασίας σε ειδικό επεξεργαστή. Η υπέρυθρη ακτινοθερμική επεξεργασία (IRP) είναι μια μέθοδος που επιτυγχάνει άμεση θερμική διείσδυση και έχει την ικανότητα να μεταφέρει μεγάλη θερμική ενέργεια. Η ακτινοβολία αυτή αφαιρεί την υγρασία και καταστρέφει τα παθογόνα που έχει η ιλύς.

Μετά την παραπάνω επεξεργασία τα βιοστερεά είχαν λιγότερο από 10% υγρασία και μη ανιχνεύσιμους παθογόνους μικροοργανισμούς. Στη συνέχεια τα βιοστερεά μεταφέρθηκαν στον πειραματικό αγρό και ενσωματώθηκαν στο έδαφος μια εβδομάδα πριν τη σπορά σε αναλογία 500 kg ανά στρέμμα. Τα βιοστερεά εφαρμόστηκαν στον αγρό μια φορά το έτος 2009 και μια φορά το έτος 2010. Οι τιμές συγκέντρωσης των βαρέων μετάλλων στα βιοστερεά και στο έδαφος ήταν χαμηλή και εντός των ορίων που ορίζει η σχετική ΚΥΑ 80568/4225/61 (ΦΕΚ 641/Β/7-08-1991).

Το ανόργανο λίπασμα που προστέθηκε στις άλλες μεταχειρίσεις είχε την ίδια περιεκτικότητα με τα βιοστερεά σε ολικό άζωτο, φώσφορο και κάλιο (21kg N/στρ., 8kg P/στρ., 0,8 kg K/στρ.).

Ολόκληρη η ποσότητα του φωσφόρου και του καλίου, μαζί με το 25% του αζώτου εφαρμόστηκε σαν βασική λίπανση μια εβδομάδα πριν τη σπορά. Το υπόλοιπο άζωτο εφαρμόστηκε με υδρολίπανση 20-30 ημέρες μετά τη σπορά.

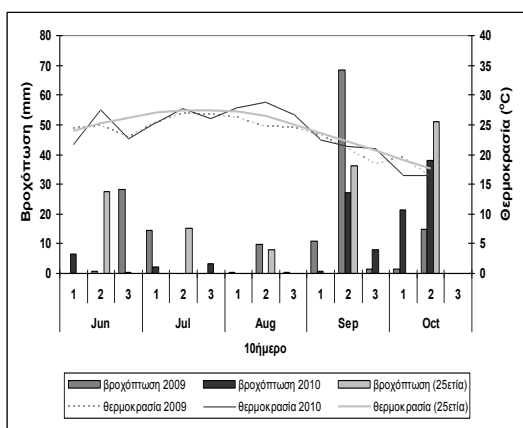
Η σπορά της καλλιέργειας έγινε στις αρχές Ιουνίου με υβρίδιο γλυκού σόργου (*Sorghum bicolor* (L.) Moench x *Sorghum bicolor* (L.) Moench 'Sugargraze'), με αναλογία 12000 φυτά ανά στρέμμα. Κάθε πειραματικό τεμάχιο είχε 6 σειρές με απόσταση μεταξύ των σειρών 0,78 m. Μετά το φύτευμα εφαρμόστηκαν οι ίδιες καλλιεργητικές εργασίες σε όλες τις μεταχειρίσεις. Σε αυτές περιλαμβάνονταν τρία χειρονακτικά σκαλίσματα για τον έλεγχο των ζιζανίων.

Στην καλλιέργεια εφαρμόστηκε επιφανειακή στάγδην άρδευση. Οι αγωγοί εφαρμογής που χρησιμοποιήθηκαν ήταν φτιαγμένοι από πολυαιθυλένιο με 20 mm ονομαστική διάμετρο. Οι σταλακτήρες ήταν αυτορυθμιζόμενοι και αυτοκαθαριζόμενοι (Netafim™) με απόσταση ανάμεσά τους 0,80 m και παροχή 2,3 L h⁻¹. Η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας υπολογίστηκε βάσει του φυτικού συντελεστή (Allen et al., 1998) και της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς με τη μέθοδο Penman-Monteith (Allen et al., 1998). Τα

μετεωρολογικά δεδομένα καταγράφονταν από αυτόματο μετεωρολογικό σταθμό (MetosCompact, της εταιρείας Pessl Instruments GmbH) ο οποίος ήταν εγκατεστημένος σε καλλιέργεια αναφοράς, ενώ ο σταθμός είχε απόσταση περίπου 50 m από την καλλιέργεια. Συγκεκριμένα, ανά 12 min, καταγράφονταν η θερμοκρασία αέρος (°C), η σχετική υγρασία αέρος (%), η βροχόπτωση (mm), η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 2 m από την επιφάνεια του εδάφους ($m\ s^{-1}$) και τέλος η ηλιακή ακτινοβολία ($W\ m^{-2}$). Το νερό που εφαρμόστηκε στην καλλιέργεια ήταν 426 mm για τις μεταχειρίσεις B80, F80, C80 και 359 mm για τις μεταχειρίσεις B60, F60 και C60.

Η παραγωγή προσδιορίστηκε χρησιμοποιώντας μέσους όρους της βιομάζας (υπέργεια). Η βιομάζα μετρήθηκε με καταστροφική δειγματοληψία του συνόλου των φυτών των μεσαίων σειρών των μεταχειρίσεων και τη ζύγισή τους σε ζυγό ακριβείας. Σε αυτά τα φυτά μετρήθηκε επίσης το ύψος και υπολογίστηκε ο μέσος όρος των τιμών.

Το τυπικό κλίμα της περιοχής ακολουθεί το Μεσογειακό μοτίβο με ξηρά-θερμά καλοκαίρια και υγρούς-ψυχρούς χειμώνες. Οι ημερήσιες τιμές της θερμοκρασίας και της βροχόπτωσης (Σχήμα 1) καταγράφονταν σε αυτόματο μετεωρολογικό σταθμό ο οποίος βρίσκεται στον πειραματικό αγρό. Η βροχόπτωση κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου του έτους 2009 ήταν 138 mm, το έτος 2010 ήταν 40 mm ενώ η μέση βροχόπτωση των 25 τελευταίων χρόνων ήταν ίση με 87 mm. Η θερμοκρασία των ετών 2009-2010 δεν παρουσίασε διακύμανση σε σχέση με την μέση θερμοκρασία των 25 τελευταίων χρόνων.



Σχήμα 1. Μέσες τιμές θερμοκρασίας και βροχόπτωσης για τα έτη 2009-2010 και των τελευταίων 25 ετών (δεκαήμερα)

Η στατιστική ανάλυση έγινε με τη χρήση του στατιστικού προγράμματος Minitab Statistical Software ($\alpha=0,05$). Η στατιστική ανάλυση έγινε με τη χρήση του Γενικού Γραμμικού μοντέλου (General Linear Model) και αφού έγινε ανάλυση της παραλλακτικότητας, για τις συγκρίσεις χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Tukey (Montgomery, 2004).

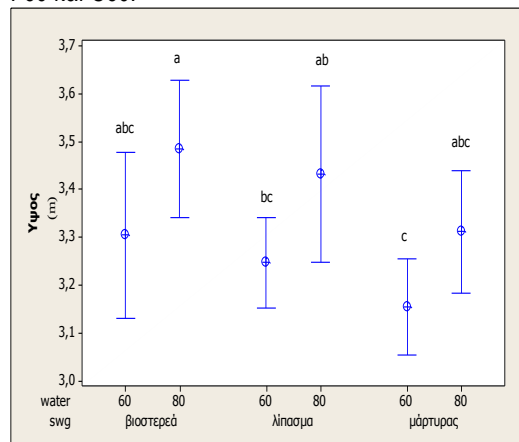
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1. Ύψος φυτών

Στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται το διάγραμμα των διαστημάτων εμπιστοσύνης στις διάφορες μεταχειρίσεις, για το ύψος των φυτών του γλυκού σόργου, στο δεύτερο μισό του Σεπτεμβρίου (106η μέρα από τη σπορά), για τα έτη 2009-2010.

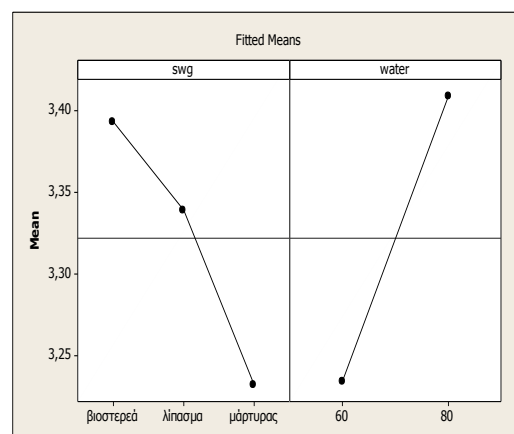
Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2, ο μέσος όρος του μέγιστου ύψους, για τα 2 έτη, των μεταχειρίσεων B80, B60, F80, F60, C80 και C60 ήταν 3,48 m, 3,30 m, 3,43 m, 3,27 m, 3,31 m και 3,15 m, αντίστοιχα.

Ως προς το ύψος, οι μεταχειρίσεις B80, F80, C80, και B60 δεν έχουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ τους, όπως επίσης και οι μεταχειρίσεις F80, C80, B60 και F60. Η μεταχείριση C60 δεν έχει στατιστικά σημαντικές διαφορές με την C80, B60 και F60. Τέλος η μεταχείριση B80 έχει στατιστικά σημαντικές διαφορές με τις μεταχειρίσεις F60 και C60.



Σχήμα 2. Διάγραμμα των διαστημάτων εμπιστοσύνης για το ύψος των φυτών, στις διάφορες μεταχειρίσεις (οι μέσοι όροι που δεν μοιράζονται το ίδιο γράμμα έχουν στατιστικά σημαντικές διαφορές)

Στο Σχήμα 3 παρουσιάζεται η κύρια επίδραση που είχε κάθε παράγοντας στο ύψος των φυτών.



Σχήμα 3. Διάγραμμα των κύριων επιδράσεων για το ύψος των φυτών

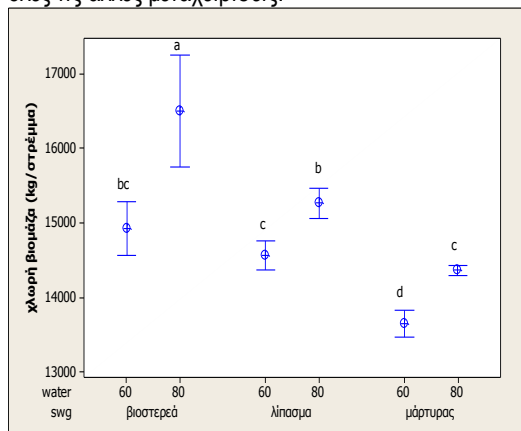
Παρατηρούμε ότι τα βιοστερεά είχαν πιο μεγάλη επίδραση στο ύψος των φυτών από ότι το λίπασμα και ότι η αύξηση της ποσότητας του νερού άρδευσης επέφερε αύξηση του ύψους των φυτών.

3.2. Παραγωγή χλωρής βιομάζας

Στο Σχήμα 4 παρουσιάζεται το διάγραμμα των διαστημάτων εμπιστοσύνης στις διάφορες μεταχειρίσεις, για τη μέγιστη χλωρή βιομάζα των φυτών του γλυκού σόργου, για τα έτη 2009-2010.

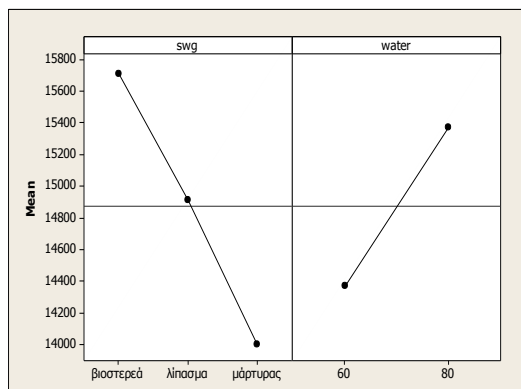
Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4, ο μέσος όρος της μέγιστης χλωρής βιομάζας, για τα 2 έτη, του των μεταχειρίσεων B80, B60, F80, F60, C80 και C60 ήταν 16500 kg/στρ., 14920 kg/στρ., 15265 kg/στρ., 14560 kg/στρ., 14363 kg/στρ. και 13643 kg/στρ., αντίστοιχα.

Στο Σχήμα 4 παρατηρούμε ότι, ως προς τη χλωρή βιομάζα, οι μεταχειρίσεις B60, F80 δεν έχουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ τους όπως επίσης και οι μεταχειρίσεις B60, C60 και C80. Οι μεταχειρίσεις B80 και C60 έχουν στατιστικά σημαντικές διαφορές τόσο μεταξύ τους όσο και με όλες τις άλλες μεταχειρίσεις.



Σχήμα 4. Διάγραμμα των διαστημάτων εμπιστοσύνης για τη χλωρή βιομάζα των φυτών, στις διάφορες μεταχειρίσεις (οι μέσοι όροι που δεν μοιράζονται το ίδιο γράμμα έχουν στατιστικά σημαντικές διαφορές)

Στο Σχήμα 5 παρουσιάζεται η κύρια επίδραση που είχε κάθε παράγοντας στην παραγωγή της χλωρής βιομάζας των φυτών.



Σχήμα 5. Διάγραμμα των κύριων επιδράσεων για τη χλωρή βιομάζα των φυτών

Παρατηρούμε ότι τα βιοστερεά είχαν πιο μεγάλη επίδραση στην παραγωγή χλωρής βιομάζας από ότι το λίπασμα και ότι όσο πιο μεγάλη ήταν η ποσότητα του νερού που δεχόταν η καλλιέργεια τόσο

μεγαλύτερη ήταν η επίδραση στην παραγωγή χλωρής βιομάζας των φυτών.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με βάση τα παραπάνω μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η εφαρμογή βιοστερεών σε συνδυασμό με ελλειμματική άρδευση, στην καλλιέργεια γλυκού σόργου, έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή περισσότερης ή ίδιας χλωρής βιομάζας με την εφαρμογή ανόργανου λιπάσματος. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η εφαρμογή βιοστερεών μπορεί να αντικαταστήσει την εφαρμογή ανόργανων λιπασμάτων με ικανοποιητικά αποτελέσματα. Ως γνωστόν η παραγωγή ανόργανων λιπασμάτων καταναλώνει σημαντικά ποσά ενέργειας τα οποία μπορούν να εξοικονομηθούν με την χρήση βιοστερεών.

Άρδευση ίση με το 60% της ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής σε συνδυασμό με την εφαρμογή βιοστερεών παρήγαγε την ίδια βιομάζα με αυτή που παράχθηκε κάτω από άρδευση ίση με το 80% της ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής σε συνδυασμό με την εφαρμογή ανόργανου λιπάσματος. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι ένα μεγάλο ποσοστό αρδευτικού νερού μπορεί να εξοικονομηθεί (20%) και άρα να εξοικονομηθεί ενέργεια.

Η εφαρμογή βιοστερεών είχε μεγαλύτερη επίδραση στο ύψος των φυτών από ότι η εφαρμογή λιπάσματος ενώ η αύξηση της ποσότητας του νερού άρδευσης επέφερε αύξηση του ύψους των φυτών.

Το γλυκό σόργο φαίνεται να είναι μια πολλά υποσχόμενη εναλλακτική καλλιέργεια για την παραγωγή βιοαιθανόλης στην Ελλάδα στο προσεχές μέλλον. Η εφαρμογή βιοστερεών σε συνδυασμό με την ελλειμματική άρδευση μπορεί να μειώσει την εφαρμογή λιπασμάτων και ταυτόχρονα να εξοικονομήσει πολύτιμο αρδευτικό νερό, οπότε επιτυγχάνεται εξοικονόμηση ενέργειας στη γεωργία.

6. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα έρευνα έχει συγχρηματοδοτηθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο - ΕΚΤ) και από εθνικούς πόρους μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» του Εθνικού Στρατηγικού Πλαισίου Αναφοράς (ΕΣΠΑ) – Ερευνητικό Χρηματοδοτούμενο Έργο: Ηράκλειτος II. Επένδυση στην κοινωνία της γνώσης μέσω του Ευρωπαϊκού Κοινωνικού Ταμείου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements (Irrigation and drainage paper 56). Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Cosentino, S.L., 1996. Crop physiology of sweet sorghum. Proc. of 1st European Seminar on Sorghum for energy and industry, April 1-3 1996, Tulose, pp. 30-41.

- Dolciotti, I., Mambelli, S., Grandi, S., Venturi, G., 1998. Comparison of two Sorghum genotypes for sugar and fiber production. *Industrial Crops and Products*, 7:265-272.
- Epstein, E., 2003. *Land Application of Sewage Sludge and Biosolids*. CRC Press LLC, Boca Raton, Florida.
- Foti, S., Cosentino, S.L., Copani, V., Patane, C. and Guarnaccia, P., 1996. Growth and yield of C4 species for biomass production in Mediterranean environment. *Proceedings of 9th European Bioenergy Conference: Biomass for energy and environment*, June 1996, Copenhagen, Denmark, pp. 616–621.
- Ippolito, J.A., Barbarick, K.A., Paschke, M.W., Brobst, R.B. 2010. Infrequent composted biosolids applications affect semi-arid grassland soils and vegetation. *Journal of Environmental Management*, 91(5):1123-1130.
- Khaleel, R., Reddy K.R. and Overcash, M.R., 1981. Changes in Soil Physical Properties Due to Organic Waste Applications: A Review. *J. Environ. Qual.*, 10:133-141.
- Montgomery, D.C., 2004. *Design and analysis of experiments*, New York, John Wiley.
- Pagliai, M., Antisari, L.V., 1993. Influence of waste organic matter on soil micro- and macrostructure. *Bioresource Technology*, 43(3): 205-213.
- Powers, W.L., Wallingford, G.W., Murphy, L.S., 1975. Research status on effects of land application of animal wastes. USEPA, Washington, D.C.
- USEPA, 1999. *Biosolids Generation, Use, and Disposal in the United States*. United States Environmental Protection Agency, Washington, D.C.
- Whitfield, M.B., Chinn, M.S., Veal, M.W., 2012. Processing of materials derived from sweet sorghum for biobased products. *Industrial Crops and Products*, 37(1) :362-375.

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΛΑΜΠΟΚΙΟΥ ΑΡΔΕΥΟΜΕΝΟΥ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΜΕΡΙΚΗΣ ΥΓΡΑΝΣΗΣ ΡΙΖΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ

Βασίλειος Αντωνόπουλος¹, Πανταζής Γεωργίου², Εμμανουήλ Λεκάκης³

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

¹vasanton@agro.auth.gr, ²pantaz@agro.auth.gr, ³elekakis@agro.auth.gr

Η μέθοδος της μερικής ύγρυνσης του ριζοστρώματος (Partial Root-zone Drying, PRD), αποτελεί μια τροποποιημένη μέθοδο στάγδην άρδευσης και αφορά στην ύγρυνση του ριζοστρώματος μόνο κατά το ήμισυ σε κάθε άρδευση. Στην εργασία διερευνάται η επίδραση της μόνιμης μερικής ύγρυνσης του ριζοστρώματος στην κατανομή της εδαφικής υγρασίας και υπολογίζεται η εδαφική υγρασία με τη βοήθεια ενός απλού μοντέλου υδατικού ισοζυγίου και τη χρήση του διπλού φυτικού συντελεστή. Τα πειραματικά δεδομένα συγκεντρώθηκαν σε δύο πειραματικά αγροτεμάχια στο Αγρόκτημα του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης την καλλιεργητική περίοδο του 2009. Τα δύο πειραματικά αγροτεμάχια είχαν διαφορετικές φυσικές και υδραυλικές ιδιότητες. Στο αρδευτικό σύστημα η παροχή των σταλακτήρων ήταν 4 l/h και η ισαποχή μεταξύ τους 50 cm, ενώ η συνολική ποσότητα του νερού που χορηγήθηκε ήταν διαφορετική. Η μέτρηση της εδαφικής υγρασίας γινόταν με αισθητήρες Diviner 2000 τόσο στη γραμμή των φυτών όσο και στη γραμμή άρδευσης. Όπως προέκυψε από τα στατιστικά κριτήρια, οι υπολογισμένες τιμές εδαφικής υγρασίας από την εφαρμογή του μοντέλου ήταν πολύ κοντά στις μετρημένες τιμές που υπολογίζονταν από το ημίαθροισμα των τιμών στις δύο θέσεις.

Λέξεις κλειδιά: Μερική ύγρυνση ριζοστρώματος, εδαφική υγρασία, διπλός φυτικός συντελεστής

SOIL WATER SIMULATION IN A FIELD OF MAIZE UNDER PARTIAL ROOT-ZONE DRYING DRIP IRRIGATION

Vassilis Antonopoulos¹, Pantazis Georgiou², Emanuel Lekakis³

Department of Hydraulics, Soil Science and Agricultural Engineering,
Faculty of Agriculture, Aristotle University, Thessaloniki 54124, Greece

¹vasanton@agro.auth.gr, ²pantaz@agro.auth.gr, ³elekakis@agro.auth.gr

Partial Root zone Drying (PRD) is an innovative irrigation technique which is based on irrigating half of the root zone in row crops. In this study the effects of PRD on soil water distribution of drip-irrigated maize in Northern Greece and the daily soil water balance were estimated. A simple soil water balance model using the equation of water balance component on a daily basis was used. The crop evapotranspiration was estimated using the double crop coefficient. Results were compared with available measurements of soil moisture in the soil profile at the irrigation and plant row using Diviner 2000 sensors during the growing season. The statistical criteria of model results evaluation showed that there was good agreement between the simulated and the measured values of soil water content.

Key words: Fixed partial root-zone drying, soil moisture, dual crop coefficient

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η σύγχρονη αρδευόμενη γεωργία κινείται προς την κατεύθυνση της αποτελεσματικής και αειφορικής χρήσης του νερού που μπορεί να επιτευχθεί με τον προγραμματισμό των αρδεύσεων και τη χρήση καινοτόμων πρακτικών στις μεθόδους άρδευσης.

Η μέθοδος της μερικής ύγρυνσης του ριζοστρώματος (Partial Root-zone Drying, PRD), αποτελεί μια τροποποιημένη μέθοδο στάγδην άρδευσης και αφορά στην ύγρυνση του ριζοστρώματος μόνο κατά το ήμισυ σε κάθε άρδευση. Η μέθοδος αυτή έχει τη δυνατότητα μειωμένης εφαρμογής αρδευτικού νερού, διατήρησης της σπαργής αλλά και των αποδόσεων τους σε σύγκριση με τις συνήθεις μεθόδους άρδευσης (Kang and Zhang, 2004). Η μέθοδος έχει ερευνηθεί ευρέως σε καλλιέργειες αμπελιού (Dry et al., 2001; Du et al., 2008), δενδρώδεις καλλιέργειες (Kang et al., 2002; Abrisqueta et al., 2008), καλλιέργειες λαχανικών (Zegbe et al., 2004) και φυτών μεγάλης καλλιέργειας

(Kang et al., 1998; Kirda et al., 2007; Georgiou et al., 2010; Λεκάκης κ. άλ., 2010; Lekakis et al., 2011). Στις περισσότερες από τις μελέτες αυτές, η στάγδην άρδευση με μερική ύγρυνση του ριζοστρώματος βελτίωσε την αποδοτικότητα χρήσης του αρδευτικού νερού σε σχέση με συμβατικές μεθόδους άρδευσης.

Η κατανομή της υγρασίας κατά τη στάγδην άρδευση αποτελεί θέμα μείζονος ενδιαφέροντος καθώς ως μέθοδος άρδευσης μπορεί να δεχτεί πολλούς αυτοματισμούς και να εφαρμοστεί σε διάφορες διατάξεις με ένα εύρος παροχών πάντα προς την κατεύθυνση της εξοικονόμησης του νερού αλλά και των υλικών, σύμφωνα με το συμφέρον του σύγχρονου παραγωγού. Η εφαρμογή της στάγδην άρδευσης σε μεγάλο εύρος καλλιεργειών, εδαφών και περιοχών την έχει κατατάξει ως την πιο υποσχόμενη μέθοδο για χρήση σε συνδυασμό με συνθήκες έλλειψης νερού και μάλιστα με υψηλή συγκέντρωση αλάτων (Ντιούδης κ.

άλ., 2003; Badr and Taalab, 2007; Kalfountzos et al., 2007; Sakellariou-Makrantonaki et al., 2007).

Στην εργασία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος στάγδην άρδευσης με μόνιμη ύγρανση της μιας πλευράς του ριζοστρώματος (Fixed PRD, FPRD), σε καλλιέργεια καλαμποκιού σε δύο εδάφη του Αγροκτήματος του Α.Π.Θ., κατά τη διάρκεια μιας βλαστικής περιόδου και μελετήθηκαν οι μεταβολές της εδαφικής υγρασίας με μέτρησή της με αισθητήρες τόσο επί της γραμμής των φυτών όσο και επί της γραμμής του αγωγού εφαρμογής της άρδευσης.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1. Περιγραφή περιοχής μελέτης και μετρήσεων

Τα απαραίτητα πειραματικά δεδομένα για την εργασία συγκεντρώθηκαν από πειραματικό αγρό του Αγροκτήματος του Α.Π.Θ. (Γ.Π. 40° 31', Γ.Μ. 22° 58', ΥΨ. 19 m), κατά την καλλιεργητική περίοδο 2009 σε δύο διαφορετικά εδάφη (έδαφος 1 και έδαφος 2). Η μέθοδος άρδευσης που επιλέχθηκε ήταν η επιφανειακή στάγδην άρδευση με παροχή των σταλακτιών 4 l/hr και ισάποχή 0.5 m. Οι αγωγοί εφαρμογής τοποθετήθηκαν μεταξύ των γραμμών των φυτών και εναλλάξ για να εφαρμοστεί η τεχνική της μερικής διαβροχής. Οι αποστάσεις των αγωγών εφαρμογής ήταν 1.6 m. Στον Πίνακα 1 δίνονται ο χρόνος και το ύψος νερού (mm) κάθε άρδευσης στα δύο εδάφη. Η σπορά του καλαμποκιού έγινε στις 28/4, ενώ η συγκομιδή πραγματοποιήθηκε στο έδαφος 1 στις 11/9 και στο έδαφος 2 στις 23/9.

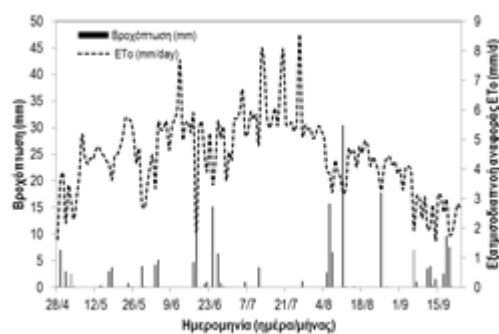
Πίνακας 1. Χρόνος εφαρμογής και ύψος νερού άρδευσης (mm) στα εδάφη 1 και 2.

Ημερομηνία	Έδαφος 1	Έδαφος 2
9/6/2009	26.04	18.75
17/6/2009	40.63	30.21
26/6/2009	20.00	15.00
3/7/2009	40.00	30.14
9/7/2009	50.07	37.85
17/7/2009	65.14	45.00
24/7/2009	55.00	45.00
31/7/2009	40.00	30.00
7/8/2009	6.88	6.90
ΣΥΝΟΛΟ	343.76	258.54

Τα μετεωρολογικά δεδομένα ελήφθησαν από τον αυτόματο σταθμό του Εργαστηρίου Γενικής και Γεωργικής Υδραυλικής και Βελτιώσεων της Γεωπονικής Σχολής του Α.Π.Θ. σε μικρή απόσταση από τις μεταχειρίσεις. Η βροχόπτωση για το διάστημα από τη σπορά έως τη συγκομιδή ανήλθε σε 192 mm και η εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας υπολογίστηκε ίση προς 620 mm στο έδαφος 1 και 646 mm στο έδαφος 2. Η ημερήσια εξατμισοδιαπνοή υπολογίστηκε από τη συνδυασμένη μέθοδο Penman-Monteith κατά FAO (Allen et al, 1998). Η διακύμανση της εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας αναφοράς και η κατανομή των βροχοπτώσεων για όλη τη βλαστική περίοδο δίνεται στο Σχήμα 1.

Η περιεχόμενη υγρασία στα δύο εδάφη καταγραφόταν καθημερινά κατά τη διάρκεια της βλαστικής περιόδου από αισθητήρες Diviner 2000

(Sentek Pty Ltd, Australia), ανά 0.1 m μέχρι το βάθος του 1 m στο έδαφος 1 και των 70 cm στο έδαφος 2. Οι αισθητήρες ήταν εγκατεστημένοι σε δύο συγκεκριμένες θέσεις σε κάθε έδαφος: στην γραμμή του αγωγού εφαρμογής και πάνω στη γραμμή των φυτών. Οι μετρήσεις βαθμονομήθηκαν με εξισώσεις από τη βιβλιογραφία (Georgiou et al., 2010; Lekakis et al., 2011; Paraskevas et al., 2012).



Σχήμα 1. Κατανομή της βροχόπτωσης και της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς κατά τη διάρκεια της βλαστικής περιόδου 2009.

Ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας (LAI) προσδιορίστηκε με την καταστροφική μέθοδο, ανά δεκαπενθήμερο. Οι ημερήσιες τιμές του LAI ανόδου, μέχρι την πλήρη ανάπτυξη, εκτιμήθηκαν με προσαρμογή της λογιστικής συνάρτησης στις μετρημένες τιμές (Antonopoulos, 2001) και του LAI καθόδου σε πολυωνμική εξίσωση 2^{ου} βαθμού, μέχρι το τέλος της βλαστικής περιόδου.

Το βάθος του ριζικού συστήματος μετρήθηκε από παρατηρήσεις σε μπάλα εδάφους, ανά δεκαπενθήμερο. Εκτιμήθηκε ότι το βάθος του ριζοστρώματος και στα δύο εδάφη έφτασε το μέγιστο βάθος των 60 cm, 119 ημέρες μετά τη βλάστηση.

Για τον υπολογισμό της υγρασίας στην υδατοϊκανότητα (θ_{FC}) και στο σημείο μόνιμης μάρανσης (θ_{PWP}) χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση του van Genuchten (1980) για τη χαρακτηριστική καμπύλη. Οι παράμετροι της εξίσωσης της χαρακτηριστικής καμπύλης εκτιμώνται είτε με άμεσες μετρήσεις είτε με έμμεσο τρόπο από πεδοσυναρτήσεις. Από τις διαθέσιμες στη βιβλιογραφία ομάδες πεδοσυναρτήσεων, θεωρήθηκε ότι οι πεδοσυναρτήσεις των Vereecken et al. (1989) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση των παραμέτρων της εξίσωσης του van Genuchten (1980) για το έδαφος των μεταχειρίσεων. Η μορφή των συναρτήσεων αυτών είναι η εξής:

$$\theta_s = 0.838 - 0.238 \cdot \rho_b + 0.0013 \cdot Cl \quad (1)$$

$$\theta_r = 0.015 + 0.005 \cdot Cl + 0.0014 \cdot C \quad (2)$$

$$\ln(\alpha) = -2.486 + 0.025 \cdot Sa - 0.351 \cdot C - 2.617 \cdot \rho_b - 0.023 \cdot Cl \quad (3)$$

$$\ln(n) = 0.053 - 0.009Sa - 0.013Cl + 0.00015Sa^2 \quad (4)$$

όπου ρ_b (gcm⁻³) είναι η φαινόμενη πυκνότητα του εδάφους, C είναι το ποσοστό του περιεχόμενου οργανικού άνθρακα, Cl και Sa είναι τα ποσοστά της περιεχόμενης αργίλου και άμμου αντίστοιχα. Οι

παραπάνω πεδосυναρτήσεις προσδιορίστηκαν για τιμή της παραμέτρου $m = 1$.

Στους Πίνακες 2 και 3 δίνονται οι φυσικές ιδιότητες και οι τιμές των παραμέτρων των υδραυλικών

συναρτήσεων των δύο εδαφών του πειραματικού αγρού, μέχρι το βάθος του ριζοστρώματος.

Πίνακας 2. Φυσικές ιδιότητες του εδάφους μέχρι το βάθος του ριζοστρώματος

Βάθος (cm)	Άμμος(%)	Ιλύς (%)	Αργίλος (%)	Κοκκ. Σύσταση	ρ_b (gcm ⁻³)	OC (%)
Έδαφος 1						
0-20	55.2	22	22.8	Sandy clay loam	1.350	0.395
20-40	49.2	22	28.8	Sandy clay loam	1.333	0.324
40-60	55.2	20	24.8	Sandy clay loam	1.287	0.354
Έδαφος 2						
0-20	49.2	32	18.8	Loam	1.639	0.505
20-40	53.2	34	12.8	Sandy loam	1.531	0.419
40-60	51.2	36	12.8	Loam	1.403	0.233

Πίνακας 3. Υδραυλικές ιδιότητες του εδάφους μέχρι το βάθος του ριζοστρώματος

Βάθος (cm)	θ_s (cm ³ cm ⁻³)	θ_r (cm ³ cm ⁻³)	α (cm ⁻¹)	n	θ_{Fc} (cm ³ cm ⁻³)	θ_{PWP} (cm ³ cm ⁻³)
Έδαφος 1						
0-20	0.486	0.135	0.00498	0.753	0.274	0.148
20-40	0.498	0.164	0.00400	0.669	0.312	0.184
40-60	0.506	0.144	0.00569	0.734	0.280	0.157
Έδαφος 2						
0-20	0.399	0.116	0.00212	0.763	0.332	0.135
20-40	0.421	0.085	0.00368	0.846	0.320	0.096
40-60	0.458	0.082	0.00523	0.834	0.319	0.092

2.2. Μοντέλο προσομοίωσης εδαφικής υγρασίας και εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας

Η εδαφική υγρασία υπολογίστηκε σε ημερήσιο χρονικό βήμα με βάση το μοντέλο υδατικού ισοζυγίου (Sabu et al., 2000; Αντωνόπουλος κ. άλ., 2007; Georgiou and Papamichail, 2008; Georgiou et al., 2010):

$$SM_{j+1} = SM_j + P_j - RO_j + IR_j + CR_j - (ET_a)_j - DP_j$$

(5) όπου SM_j είναι η υγρασία την ημέρα j , P_j είναι η αποτελεσματική βροχόπτωση, RO_j είναι η απορροή από την επιφάνεια του εδάφους, IR_j είναι η άρδευση, CR_j είναι η συμβολή του νερού από την ανύψωση της υπόγειας στάθμης, $(ET_a)_j$ είναι η πραγματική εξατμισοδιαπνοή και DP_j είναι η βαθειά διήθηση (όλες οι μονάδες σε mm). Οι παράμετροι RO και CR θεωρήθηκαν μηδενικές στον υπολογισμό της υγρασίας. Η εδαφική υγρασία (SM) υπολογίζεται μεταξύ του μηδενός και της υδατοϊκανότητας (FC).

Μετά από έντονη βροχόπτωση ή άρδευση, η περιεχόμενη υγρασία μπορεί να ξεπεράσει την υγρασία στην υδατοϊκανότητα και η βαθειά διήθηση υπολογίζεται από τη σχέση:

$$DP_j = SM_j + P_j + IR_j - (ET_a)_j - FC$$

(6)

όπου FC είναι η υγρασία στην υδατοϊκανότητα (mm). Αν η περιεχόμενη εδαφική υγρασία είναι χαμηλότερη από την υγρασία στην υδατοϊκανότητα το έδαφος δεν στραγγίζει και η βαθειά διήθηση λαμβάνει την τιμή μηδέν.

Για τον προσδιορισμό της εξατμισοδιαπνοής χρησιμοποιήθηκε η προσέγγιση του διπλού φυτικού συντελεστή (Allen et al., 1998). Η επίδραση των χαρακτηριστικών της εξάτμισης από το έδαφος και της διαπνοής της καλλιέργειας ενσωματώνονται στον

συντελεστή εξάτμισης (K_e) και τον βασικό φυτικό συντελεστή (K_{cb}), αντίστοιχα. Όταν η υγρασία στο ριζόστρωμα είναι υψηλή και η επιφάνεια του εδάφους υγρή, η διαπνοή και η εξάτμιση πραγματοποιούνται με υψηλούς ρυθμούς και η ET_p δίνεται από τη σχέση:

$$ET_p = (K_{cb} + K_e)ET_o = K_{cb}ET_o + K_eET_o = T_p + E_p$$

(7)

όπου ET_p είναι η δυναμική εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας, ET_o είναι η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς, E_p είναι η δυναμική εξάτμιση από την επιφάνεια του εδάφους και T_p είναι η δυναμική διαπνοή της καλλιέργειας (όλες οι μονάδες σε mmd⁻¹).

Τρεις τιμές απαιτούνται για την καμπύλη προσδιορισμού του συντελεστή K_{cb} , οι $K_{cb\ ini}$, $K_{cb\ mid}$ και $K_{cb\ end}$ οι οποίες λαμβάνονται από πίνακες του FAO-56 (Allen et al., 1998). Για κλίματα όπου η μέση RH_{min} είναι διαφορετική από 45% ή όπου η ταχύτητα του ανέμου στα 2 m (u_2) είναι διαφορετική από 2 ms⁻¹, οι $K_{cb\ mid}$ και $K_{cb\ end}$ τιμές μεγαλύτερες από 0,45, πρέπει να προσαρμοστούν με την εξής σχέση (Allen et al., 1998):

$$K_{cb} = K_{cb(table)} +$$

$$[0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{min} - 45)](h/3)^{0.3}$$

(8)

όπου $K_{cb(table)}$ είναι η τιμή του $K_{cb\ mid}$ και $K_{cb\ end}$ από τους πίνακες του FAO-56, u_2 είναι η μέση ημερήσια ταχύτητα ανέμου στα 2 m ύψους κατά τη διάρκεια του μέσου ή τελευταίου σταδίου όταν 1 ms⁻¹ ≤ u_2 ≤ 6 ms⁻¹, RH_{min} (%) είναι η μέση ελάχιστη ημερήσια σχετική υγρασία κατά τη διάρκεια του μέσου ή τελευταίου σταδίου όταν 20% ≤ RH_{min} ≤ 80% και h

(m) είναι το μέσο ύψος των φυτών κατά τη διάρκεια του μέσου ή τελευταίου σταδίου.

Ο συντελεστής εξάτμισης από το έδαφος K_e αποτελεί τη συνιστώσα εξάτμισης της ET_p . Όταν η επιφάνεια του εδάφους είναι υγρή, μετά από βροχή ή άρδευση, ο K_e είναι μέγιστος. Ο υπολογισμός του K_e περιγράφεται από το FAO-56. Η εξάτμιση από το έδαφος και η διαπνοή των φυτών μειώνονται κάτω από το μέγιστο ρυθμό, όταν δεν υπάρχει επαρκές νερό στο έδαφος για την ικανοποίηση των αναγκών της ατμόσφαιρας. Το παραπάνω προσομοιώνεται με το γινόμενο του βασικού συντελεστή διαπνοής των φυτών με τον συντελεστή υδατικής καταπόνησης (K_s) και του συντελεστή εξάτμισης με ένα συντελεστή μείωσης (K_r) ως εξής:

$$ET_a = (K_s K_{cb} + K_r K_e) ET_o = T_a + E_a$$

(9)

όπου ET_a είναι η πραγματική εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας (mm d^{-1}), K_s είναι ο συντελεστής υδατικής καταπόνησης και K_r είναι ένας αδιάστατος συντελεστής μείωσης της εξάτμισης που εξαρτάται από το αθροιστικό βάθος νερού που εξατμίζεται από την επιφάνεια του εδάφους. Ο συντελεστής υδατικής καταπόνησης υπολογίζεται από τις σχέσεις:

$$K_s = 1, SM \geq SM_{min}$$

(10a)

$$K_s = \frac{SM}{SM_{min}} = \frac{SM}{FC - p(FC - PWP)}, SM < SM_{min}$$

(10β)

όπου SM είναι το ύψος νερού που υπολογίζεται από τη σχέση (5), FC είναι το ύψος νερού που αντιστοιχεί στην υδατοϊκανότητα (mm), PWP είναι το ύψος νερού που αντιστοιχεί στο σημείο μόνιμης μάρανσης (mm), SM_{min} είναι η ελάχιστη επιτρεπόμενη ποσότητα νερού και p ($0 \leq p \leq 1$) είναι το κλάσμα του ολικού διαθέσιμου νερού (TAW) που μπορεί να προσλάβει η καλλιέργεια χωρίς προβλήματα υδατικής καταπόνησης. Το TAW εκτιμάται ως η διαφορά μεταξύ του νερού που αντιστοιχεί στην υδατοϊκανότητα και του σημείου μόνιμης μάρανσης. Η τιμή του p κυμαίνεται ανάμεσα σε 0.4 για φυτά με ρηχό ριζικό σύστημα και 0.6 για φυτά με βαθύ ριζικό σύστημα (Allen et al., 1998).

Το αποθηκευμένο νερό στο έδαφος για την αντιπροσωπευτική περιοχή, A_i , που εκτείνεται από τη γραμμή άρδευσης μέχρι το μέσο της μη αρδευόμενης ζώνης, υπολογίστηκε από το ζυγισμένο άθροισμα του αποθηκευμένου νερού στο έδαφος από τις δύο θέσεις μέτρησης [αρδευόμενη γραμμή (θ_i) και γραμμή των φυτών (θ_p)] ως εξής:

$$\theta = \frac{\theta_i + \theta_p}{2} \quad \text{και} \quad \theta = \sum_{k=1}^K \theta_k \Delta z$$

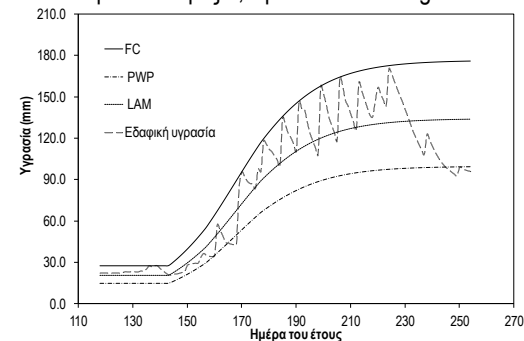
(11)

όπου θ είναι το ζυγισμένο αποθηκευμένο νερό στην περιοχή A_i , θ_k είναι η μετρημένη υγρασία από τους αισθητήρες για κάθε 0.1 m βάθος εδάφους, Δz το βάθος του ριζοστρώματος και K ο συνολικός αριθμός των μετρήσεων που λαμβάνονται υπόψη μέχρι το βάθος Δz .

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

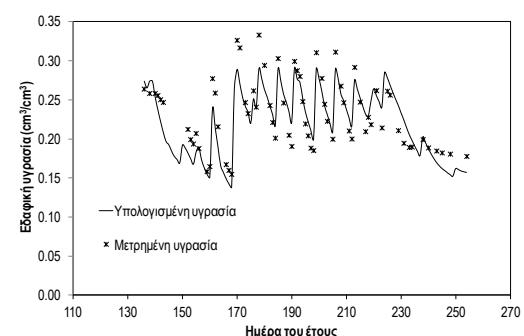
Το μοντέλο του ισοζυγίου της εδαφικής υγρασίας που παρουσιάστηκε προηγουμένα εφαρμόστηκε στα δύο εδάφη, για όλη τη διάρκεια της βλαστικής περιόδου, λαμβάνοντας υπόψη τη μεταβολή του ριζικού συστήματος.

Στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται γραφικά η διακύμανση της εδαφικής υγρασίας για το έδαφος 1 στη ζώνη του ριζοστρώματος, όπως υπολογίστηκε από το μοντέλο. Όπως προκύπτει από το Σχήμα 2, η υγρασία στο μεγαλύτερο διάστημα της βλαστικής περιόδου βρισκόταν εντός της ωφέλιμης υγρασίας [μεταξύ ελάχιστης επιτρεπόμενης υγρασίας (LAM) και υδατοϊκανότητας (FC)] με διαφοροποίηση στην αρχή και στο τέλος όπου η υγρασία σύμφωνα με τους υπολογισμούς έφτασε μέχρι το σημείο μόνιμης μάρανσης. Επιπλέον, οι αρδεύσεις εφαρμόζονταν στον κατάλληλο χρόνο (όταν η περιεχόμενη υγρασία έφτανε στη LAM) και με την απαραίτητη ποσότητα (μέχρι η υγρασία να φτάσει στην FC). Όλα τα παραπάνω συνηγορούν σε αυξημένη απόδοση του καλαμποκιού. Πράγματι, η μέση στρεμματική απόδοση στο έδαφος 1, έφτασε τα 1500 kg.



Σχήμα 2. Διακύμανση της εδαφικής υγρασίας στη ζώνη του ριζοστρώματος στο έδαφος 1.

Οι υπολογισμένες με το μοντέλο τιμές υγρασίας, συγκρίθηκαν και με τις βαθμονομημένες τιμές υγρασίας που μετρήθηκαν με το Diviner 2000 και υπολογίστηκαν σύμφωνα με τη σχέση (11). Οι τιμές της υγρασίας για το έδαφος 1, παρουσιάζονται γραφικά στο Σχήμα 3.

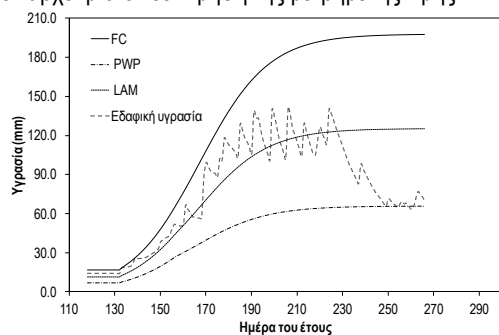


Σχήμα 3. Σύγκριση μετρημένων και υπολογισμένων τιμών εδαφικής υγρασίας στο έδαφος 1.

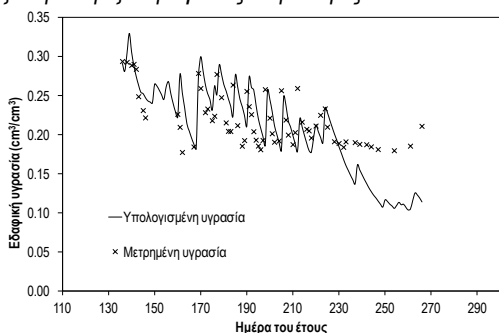
Όπως προκύπτει από το Σχήμα 3, το μοντέλο περιγράφει ικανοποιητικά τη διακύμανση της εδαφικής υγρασίας με μικρές αποκλίσεις στις μέγιστες και στις ελάχιστες τιμές.

Στο Σχήμα 4 παρουσιάζεται γραφικά η διακύμανση της εδαφικής υγρασίας για το έδαφος 2 στη ζώνη του ριζοστρώματος, όπως υπολογίστηκε από το μοντέλο. Όπως προκύπτει από το Σχήμα 4 για σημαντικό χρονικό διάστημα της βλαστικής περιόδου, η υγρασία ήταν μικρότερη από την ελάχιστη επιτρεπόμενη (LAM) και δεν προσέγγισε το επίπεδο της υδατοϊκανότητας, παρά την εφαρμογή των αρδεύσεων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι δόσεις άρδευσης ήταν περιορισμένες (Πίνακας 1). Το παραπάνω είχε ως αποτέλεσμα μειωμένη απόδοση του καλαμποκιού που έφτασε στα 1300 kg/στρ.

Στο Σχήμα 5 παρουσιάζονται γραφικά οι υπολογισμένες με το μοντέλο και οι βαθμονομημένες τιμές υγρασίας που μετρήθηκαν με το Diviner 2000 και υπολογίστηκαν σύμφωνα με τη σχέση (11). Όπως φαίνεται από το Σχήμα 5 η προσομοίωση είναι αρκετά ικανοποιητική με μόνη εξαίρεση την υγρασία του τελευταίου χρονικού διαστήματος όπου υπάρχει μία υποεκτίμηση της μετρημένης τιμής.



Σχήμα 4. Διακύμανση της εδαφικής υγρασίας στη ζώνη του ριζοστρώματος στο έδαφος 2.



Σχήμα 5. Σύγκριση μετρημένων και υπολογισμένων τιμών εδαφικής υγρασίας στο έδαφος 2.

Για τον έλεγχο της ακρίβειας των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, υπολογίστηκαν τα στατιστικά κριτήρια του μέσου σφάλματος, E ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$), του σφάλματος του τετραγώνου των αποκλίσεων, RMSE (%) και του συντελεστή ελλείμματος μάζας, CRM, μεταξύ μετρημένων και υπολογισμένων τιμών εδαφικής υγρασίας (Αντωνόπουλος, 1999). Οι τιμές των στατιστικών κριτηρίων για την περίπτωση της μεταχείρισης στο έδαφος 1 είναι $0.004 \text{ cm}^3\text{cm}^{-3}$, 8.97% και -0.026 ενώ για το έδαφος 2 είναι $-0.001 \text{ cm}^3\text{cm}^{-3}$, 17.96% και -0.186, αντίστοιχα. Όπως προκύπτει από τις παραπάνω τιμές, η προσομοίωση είναι πολύ καλή.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία διερευνήθηκε η διακύμανση της υγρασίας υπό συνθήκες μερικής ύγρανσης του ριζοστρώματος (Partial Root-zone Drying, PRD) που αποτελεί μια τροποποιημένη μέθοδο στάγδην άρδευσης και αφορά την ύγρανση του ριζοστρώματος μόνο κατά το ήμισυ σε κάθε άρδευση. Υπολογίστηκε η εδαφική υγρασία με τη βοήθεια ενός απλού μοντέλου εδαφικού ισοζυγίου και τη χρήση του διπλού φυτικού συντελεστή. Τα πειραματικά δεδομένα συγκεντρώθηκαν από δύο πειραματικά αγροτεμάχια στο Αγρόκτημα του Α.Π.Θ. την καλλιεργητική περίοδο του 2009. Η μέτρηση της εδαφικής υγρασίας γινόταν με αισθητήρες Diviner 2000 τόσο στη γραμμή των φυτών όσο και στη γραμμή άρδευσης. Οι υπολογισμένες τιμές εδαφικής υγρασίας από την εφαρμογή του μοντέλου ήταν πολύ κοντά στις μετρημένες τιμές που υπολογίζονταν από το ημιάθροισμα των τιμών στις δύο θέσεις. Προτείνεται, για τον προγραμματισμό των αρδεύσεων με τη χρήση αισθητήρων μέτρησης της εδαφικής υγρασίας και της συγκεκριμένης μεθόδου άρδευσης, η υγρασία να μετράται τουλάχιστον σε δύο σημεία (επί της γραμμής των φυτών και της γραμμής άρδευσης) και να λαμβάνεται το ημιάθροισμά τους.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Abrisqueta, J.M., Mounzer, O., Alvarez, S., Conejero, W., Garcia-Orellana, Y., Tapia, L.M., Vera, J., Abrisqueta, I., Ruiz-Sanchez, M.C., 2008. Root dynamics of peach trees submitted to partial rootzone drying and continuous deficit irrigation. *Agric. Water Manage.*, 95:959–967.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage, Paper 56, Rome, Italy.
- Αντωνόπουλος, Β.Ζ., 1999. Υδρολογία της ακόρεστης ζώνης του εδάφους. Έκδοση υπηρεσίας δημοσιευμάτων του Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, 274 σελ.
- Antonopoulos, V.Z., 2001. Simulation of water and nitrogen balances of irrigated and fertilized corn-crop soil. *J. Irrig. Drain. Eng.*, ASCE, 127(2): 77-83.
- Αντωνόπουλος, Β.Ζ., Λεκάκης, Ε.Η., Γεωργίου, Π.Ε., 2007. Προγραμματισμός των αρδεύσεων με ολοκληρωμένα μοντέλα και τη μέθοδο ισοζυγίου του εδαφικού νερού. *Υδροτεχνικά*, 17:63-76.
- Badr, M.A., Taalab, A.S., 2007. Effect of drip irrigation and discharge rate on water and solute dynamics in sandy soil and tomato yield. *Austr. J. Bas. Appl. Sci.*, 1(4): 545-552.
- Dry, P.R., Loveys, B.R., McCarthy, M.G., Stoll, M., 2001. Strategic irrigation management in Australian vineyards. *J. Int. des Sci. de La Vigne et du Vin* 35:129–139.
- Du, T., Kang, S., Zhang, J., Li, F., Yan, B., 2008. Water use efficiency and fruit quality of table grape under alternate partial root-zone drip irrigation. *Agric. Water Manage.* 95:659–668.

- Georgiou, P.E., Antonopoulos, V.Z., Lekakis, E.H., 2010. Soil water balance and distribution in a field of maize under partial root-zone drying drip irrigation. e-Proceedings of the International Conference PRE10 "Protection and Restoration of the Environment X", Corfu, Greece, 8 p.
- Georgiou, P.E., Papamichail, D.M., 2008. Optimization model of an irrigation reservoir for water allocation and crop planning under various weather conditions. *Irrig. Sci.*, 26(6): 487-504.
- Kalfountzos, D., Alexiou, I., Kotsopoulos, S., Zarakos, G., Vyrilas, P., 2007. Effect of subsurface drip irrigation on cotton plantations. *Water Resour. Manage.*, 21:1341-1351.
- Kang S., Zhang, J., 2004. Controlled alternate partial root-zone irrigation: its physiological consequences and impact on water use efficiency, *J. Exp. Bot.*, 55:2437-2446.
- Kang S., Hu, X., Goodwin, I., Jerie, P., 2002. Soil water distribution, water use, and yield response to partial root-zone drying under a shallow groundwater table condition in a pear orchard. *Sci. Hortic.* 92:277-291.
- Kang, S., Liang, Z., Hu, W., Zhang, J., 1998. Water use efficiency of controlled alternate irrigation on root-divided maize plant. *Agric. Water Manage.*, 38(1): 69-76.
- Kirda, C., Topcu, S., Cetin, M., Dasgan, H.Y., Kaman, H., Topaloglu, F., Derici, M.R., Ekici, B., 2007. Prospects of partial root-zone irrigation for increasing irrigation water use efficiency of major crops in the Mediterranean region. *Ann. Appl. Biol.*, 150:281-291.
- Λεκάκης, Ε., Γεωργίου, Π., Παυλάτου – Βε, Α., Αντωνόπουλος, Β., 2010. Διακύμανση της υγρασίας και της αλατότητας σε ασβεστούχα εδάφη και καλλιέργεια καλαμποκιού υπό άρδευση με τη μέθοδο της μερικής ύγρανσης του ριζοστρώματος. Πρακτικά 13ου Πανελληνίου Εδαφολογικού Συνεδρίου, σελ.: 59-69, Λάρισα.
- Lekakis, E.H., Georgiou, P.E., Pavlatou-Ve, A., Antonopoulos, V.Z., 2011. Effects of fixed partial root-zone drying irrigation and soil texture on water and solute dynamics in calcareous soils and corn yield. *Agric. Water Manage.*, 101:71-80.
- Ντιούδης, Π., Φιλίντας, Α., Λέλλης, Θ., Σακελλαρίου - Μακραντωνάκη, Μ., 2003. Παραγωγικότητα καλλιέργειας αραβοσίτου συναρτήσει του εύρους άρδευσης με σύστημα στάγδην. Πρακτικά 3ου Πανελληνίου Συνεδρίου Γεωργικής Μηχανικής, σελ.: 69-76, Θεσσαλονίκη.
- Paraskevas, C., Georgiou, P., Ilias, A., Panoras, A., Babajimopoulos, C., 2012. Calibration equations for two capacitance water content probes in a lysimeter field. *Inter. Agroph.*, 26:285-293.
- Sabu, P., Sudhindra, P.N., Kumar, N.D., 2000. Optimal irrigation allocation: A multilevel approach. *J. Irrig. Drain. Eng.*, ASCE, 126(3): 149-156.
- Sakellariou-Makrantonaki, M., Papalexis, D., Nakos, N., Kalavrouziotis, I.K., 2007. Effect of modern irrigation methods on growth and energy production of sweet sorghum (var. Keller) on a dry year in Central Greece. *Agri. Water Manage.*, 90:181-189.
- 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.
- Vereecken, H., Maes, J., Feyen, J., Darius, P., 1989. Estimating the soil moisture retention characteristics from texture, bulk density and carbon content. *Soil Sci.*, 148: 389-403.
- Zegbe, J.A., Behboudian, M.H., Clotier, B.E., 2004. Partial root drying zone is a feasible option for irrigating processing tomatoes. *Agric. Water Manage.*, 68:195-206.

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΕΙΚΤΩΝ ΞΗΡΑΣΙΑΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

Π. Γεωργίου¹, Δ. Παπαμιχαήλ² και Δ. Παπάρας³

Τομέας Εγγείων Βελτιώσεων, Εδαφολογίας και Γεωργικής Μηχανικής,

Γεωπονική Σχολή Α.Π.Θ., 54124 Θεσσαλονίκη

E-mail: ¹pantaz@agro.auth.gr, ²papamich@agro.auth.gr, ³paparas_dim@yahoo.gr

Η ξηρασία είναι ένα παγκόσμιο φαινόμενο που προκαλεί σημαντικές ζημιές τόσο στο φυσικό περιβάλλον όσο και στη ζωή των ανθρώπων. Οι δείκτες ξηρασίας είναι απαραίτητα εργαλεία για τη συνεχή παρακολούθηση και καταγραφή της έντασης και της διάρκειας των επεισοδίων ξηρασίας. Η πρόβλεψη της ξηρασίας είναι απαραίτητη στη διαχείρισή της αλλά και στο σχεδιασμό και τη διαχείριση συστημάτων υδατικών πόρων. Στην εργασία αυτή χρησιμοποιούνται τα στοχαστικά μοντέλα SARIMA (Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average) για την προσομοίωση του δείκτη SPI (Standardised Precipitation Index) για χρονικά βήματα 3, 6, 9 και 12 μηνών. Τα κατάλληλα στοχαστικά μοντέλα χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη των δεικτών ξηρασίας για έναν ή περισσότερους μήνες, για τους οποίους υπάρχουν υπολογισμένες τιμές του δείκτη. Από τη σύγκριση μεταξύ υπολογισμένων και προβλεπόμενων τιμών προέκυψε ότι τα στοχαστικά μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν με ικανοποιητική ακρίβεια για την πρόβλεψη του δείκτη ξηρασίας SPI όλων των χρονικών βημάτων. Τέλος, τα στοχαστικά μοντέλα χρησιμοποιήθηκαν και για τη δημιουργία συνθετικών σειρών του δείκτη SPI για τα διάφορα χρονικά βήματα. Συνθετικές σειρές του δείκτη SPI προέκυψαν επίσης με τη βοήθεια συνθετικών σειρών βροχόπτωσης. Η συνθετική παραγωγή της βροχόπτωσης γίνεται σε δύο βήματα. Στο πρώτο βήμα προσομοιώνεται η επισύμβαση της βροχόπτωσης με τη χρήση αλυσίδων Markov ενώ στο δεύτερο βήμα προσομοιώνεται το ύψος της βροχόπτωσης με τη χρήση της γάμμα κατανομής. Οι συνθετικές σειρές του δείκτη SPI χρησιμοποιούνται για να ληφθούν κατανομές πιθανότητας ξηρασίας που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην ανάλυση κινδύνων ξηρασίας.

Λέξεις κλειδιά: Δείκτες ξηρασίας, στοχαστικά μοντέλα, συνθετική παραγωγή βροχόπτωσης

MODELLING OF DROUGHT INDICES TIME SERIES BY USING STOCHASTIC MODELS

P. Georgiou¹, D. Papamichail² and D. Paparas³

Department of Hydraulics, Soil Science and Agricultural Engineering, Faculty of Agriculture

Aristotle University of Thessaloniki, 54124 Thessaloniki

E-mail: ¹pantaz@agro.auth.gr, ²papamich@agro.auth.gr, ³paparas_dim@yahoo.gr

Drought is a global phenomenon causing significant damage both in natural environment and in human lives. Drought indices are important and useful tools for monitoring and assessment of drought intensity and duration. Drought forecasting is necessary to drought management and in the planning and management of water resources systems. In this paper stochastic models known as ARIMA and SARIMA (Seasonal Auto Regressive Integrated Moving Average) models are used to simulate the discrete time series of Standardized Precipitation Index (SPI) for time scales of 3, 6, 9 and 12 months. The selected best models were used to forecast drought indices of one or more months ahead and generate synthetic series of SPI for different time scales. The predicted results were compared with the observed data. Synthetic series of SPI were also generated with the help of synthetic series of rainfall. Rainfall generation is a two stage process whereby rainfall occurrence (i.e. wet or dry day) is based upon a first order two state Markov chain and rainfall amount is sampled from the gamma distribution. Synthetic series of SPI were used to obtain probability distributions of drought occurrence that enhance the drought risk analysis.

Key words: Drought indices, stochastic models, rainfall generation

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ξηρασία είναι ένα ακραίο μετεωρολογικό φαινόμενο το οποίο τα τελευταία χρόνια παρουσιάζει σημαντική αύξηση στη συχνότητα εμφάνισής του σε πολλές περιοχές του κόσμου. Η ξηρασία σχετίζεται με την τρωτότητα των συστημάτων υδροδότησης, των αγροτικών και των κοινωνικών συστημάτων. Ειδικότερα, η τρωτότητα των αγροτικών συστημάτων αναφέρεται στις αυξημένες ανάγκες σε νερό των καλλιεργειών και στην περιορισμένη διαθεσιμότητα των επιφανειακών και υπόγειων υδατικών πόρων (Iglesias et al., 2005).

Οι δείκτες ξηρασίας είναι απαραίτητα στοιχεία για τη συνεχή παρακολούθηση και καταγραφή της

έντασης και της έκτασης των επεισοδίων ξηρασίας ενώ δίνουν τη δυνατότητα αξιολόγησης της ξηρασίας όχι μόνο σε τοπικό επίπεδο αλλά και σε μία ευρύτερη περιοχή. Στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν παρουσιαστεί διάφοροι δείκτες οι κυριότεροι των οποίων είναι: SPI (Standardized Precipitation Index), PDSI (Palmer Drought Severity Index), CMI (Crop Moisture Index), SWSI (Surface Water Supply Index), VCI (Vegetation Condition Index), RDI (Reconnaissance Drought Index) (Dalezios et al., 1991; Tsakiris et al., 2006; Mishra and Singh, 2010). Οι δείκτες αυτοί χρησιμοποιούν για τον υπολογισμό τους διάφορες μεταβλητές, όπως το ύψος βροχής, την εξατμισοδιαπνοή, τα αποθέματα νερού, την

υπόγεια στάθμη κ.λπ.. Οι McKee et al. (1993) ανέπτυξαν το δείκτη ξηρασίας SPI (Standardized Precipitation Index), ο οποίος χρησιμοποιεί ως αποκλειστική παράμετρο τη βροχόπτωση και σκοπός τους ήταν να ποσοτικοποιήσουν το έλλειμμα βροχόπτωσης σε διάφορες χρονικές κλίμακες. Με τον υπολογισμό του δείκτη σε διάφορα χρονικά βήματα αντιμετωπίζονται οι διάφοροι τύποι ξηρασίας, δηλαδή για μικρά χρονικά βήματα αντιμετωπίζεται η γεωργική και μετεωρολογική ξηρασία, ενώ για μεγάλα χρονικά βήματα αντιμετωπίζεται η υδρολογική ξηρασία (Sonmez et al., 2005).

Η πρόβλεψη της ξηρασίας είναι απαραίτητη στην ανάλυση κινδύνων, στην ετοιμότητα και στα μέτρα που πρέπει να ληφθούν για το μετριασμό της, όπως επίσης και στο σχεδιασμό και τη διαχείριση συστημάτων υδατικών πόρων. Για το σκοπό αυτό έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορες τεχνικές όπως μοντέλα συσχέτισης (regression models), μοντέλα ανάλυσης χρονικών σειρών (time series models), πιθανολογικά μοντέλα (probability models), νευρωνικά δίκτυα (neural networks) και υβριδικά μοντέλα (hybrid models) (Mishra and Desai, 2005; Mishra et al., 2009; Durdu, 2010; Mishra and Singh, 2011).

Στην εργασία αυτή χρησιμοποιούνται τα στοχαστικά μοντέλα SARIMA (Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average) (Box et al., 1994) για την προσομοίωση του δείκτη SPI για χρονικά βήματα 3, 6, 9 και 12 μηνών στο σταθμό του Αγίου Μάμα Χαλκιδικής. Τα κατάλληλα μοντέλα χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη του δείκτη SPI για έναν ή περισσότερους μήνες αλλά και για την παραγωγή συνθετικών σειρών του δείκτη για τα διάφορα χρονικά βήματα. Συνθετικές σειρές του δείκτη SPI προέκυψαν επίσης με τη βοήθεια συνθετικών σειρών βροχόπτωσης. Η συνθετική παραγωγή της βροχόπτωσης γίνεται σε δύο βήματα. Στο πρώτο βήμα προσομοιώνεται η επισύμβαση της βροχόπτωσης με τη χρήση αλυσίδων Markov, ενώ στο δεύτερο βήμα προσομοιώνεται το ύψος της βροχόπτωσης με τη χρήση της γάμμα κατανομής. Η καταλληλότητα των μοντέλων επιβεβαιώθηκε τόσο με την πρόβλεψη του δείκτη για κάποιους μήνες, όσο και με τη συχνότητα εμφάνισης των επεισοδίων ξηρασίας στις διάφορες κατηγορίες χαρακτηρισμού της με βάση τις συνθετικές σειρές όπως προέκυψαν από τα μοντέλα και από τις συνθετικές σειρές βροχόπτωσης.

2. ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΡΕΥΝΑΣ

2.1. Δείκτης ξηρασίας SPI

Ο τυποποιημένος Δείκτης Κατακρήμνισης (Standardised Precipitation Index) (SPI) αποτελεί έναν μετεωρολογικό δείκτη, ο οποίος χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση και πρόβλεψη της ξηρασίας (McKee et al., 1993; Iglesias et al., 2007; Κωτσοβίνος και Αγγελίδης, 2009). Ο συγκεκριμένος δείκτης παρουσιάζει τα εξής πλεονεκτήματα (Hayes, 1999): α) Ευκολία υπολογι-

σμού του, καθώς απαιτείται μόνο χρονοσειρά βροχόπτωσης, β) Δεν εξαρτάται από την εδαφική υγρασία και μπορεί να χρησιμοποιηθεί με επιτυχία τόσο για τους εαρινούς μήνες όσο και τους χειμερινούς, γ) Δεν επηρεάζεται από την τοπογραφία της περιοχής, δ) Δυνατότητα υπολογισμού του σε διάφορες χρονικές κλίμακες, γεγονός που επιτρέπει την εκτίμηση συνθηκών ξηρασίας σε μεγάλη ποικιλία μετεωρολογικών, αγροτικών και υδρολογικών εφαρμογών και ε) Η τυποποίησή του, εξασφαλίζει ότι η συχνότητα των ακραίων γεγονότων ξηρασίας σε οποιαδήποτε θέση και χρονική κλίμακα είναι συνεπής.

Ο δείκτης SPI υπολογίζεται με την προσαρμογή μιας συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας στην εμπειρική κατανομή συχνότητας μιας χρονοσειράς, που προκύπτει από εφαρμογή κυλιόμενου αθροίσματος επιθυμητής χρονικής κλίμακας, πάνω στην εξεταζόμενη χρονοσειρά βροχόπτωσης. Στη συνέχεια, η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας μετασχηματίζεται σε μια τυπική κανονική κατανομή. Έτσι, ο δείκτης «κανονικοποιείται» χωρικά καθώς στον υπολογισμό του υπεισέρχεται τόσο η κατανομή της συχνότητας εμφάνισης της βροχόπτωσης στο συγκεκριμένο τόπο, όσο και η διακύμανση της βροχόπτωσης στην περιοχή. Επιπλέον, ο δείκτης SPI «κανονικοποιείται» και χρονικά, γιατί ο υπολογισμός του μπορεί να γίνει για οποιαδήποτε χρονική κλίμακα (3, 6, 9, 12, 24, κ.λπ. μηνών) ανάλογα με το σκοπό της εκάστοτε ανάλυσης (Κωτσοβίνος και Αγγελίδης, 2009).

Οι χρονοσειρές μηνιαίας βροχόπτωσης ακολουθούν διάφορες θεωρητικές κατανομές με συνηθέστερη την κατανομή γάμμα. Η συνάρτηση πυκνότητας – πιθανότητας της κατανομής γάμμα δίνεται από τη σχέση (Γεωργίου, 2004):

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} \quad \text{για } x > 0 \quad (1)$$

όπου: α είναι η παράμετρος σχήματος (α>0), β είναι η παράμετρος κλίμακας (β>0), x είναι η ποσότητα της βροχόπτωσης και Γ(α) είναι η συνάρτηση γάμμα.

Για την προσαρμογή της κατανομής απαιτείται ο προσδιορισμός των παραμέτρων α και β οι οποίες υπολογίζονται από σχέσεις που δίνονται από τον Thom (1958). Ολοκληρώνοντας τη συνάρτηση πυκνότητας – πιθανότητας g(x), προκύπτει η αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας G(x).

Επειδή η γάμμα συνάρτηση δεν ορίζεται για x=0 και επειδή η κατανομή της βροχόπτωσης ενδέχεται να περιέχει και μηδενικά στοιχεία, η αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας ορίζεται από τη σχέση (Mishra and Desai, 2005):

$$H(x) = u + (1-u)G(x) \quad (2)$$

όπου: u= η πιθανότητα των μηδενικών βροχοπτώσεων.

Η αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας H(x), μετασχηματίζεται σε τυπική κανονική κατανομή Z, με μέσο όρο μηδέν και τυπική απόκλιση μονάδα, όπου η τιμή αυτή αποτελεί το δείκτη SPI. Με βάση τον προσεγγιστικό μετασχηματισμό που προτάθηκε από

τους Abramowitz and Stegun (1965), ο μετασχηματισμός που απαιτείται πραγματοποιείται με βάση τις παρακάτω σχέσεις:

$$Z = \text{SPI} = - \left(k - \frac{c_0 + c_1 k + c_2 k^2}{1 + d_1 k + d_2 k^2 + d_3 k^3} \right) \quad (3)$$

για $0 < H(x) \leq 0.5$.

$$Z = \text{SPI} = + \left(k - \frac{c_0 + c_1 k + c_2 k^2}{1 + d_1 k + d_2 k^2 + d_3 k^3} \right) \quad (4)$$

για $0.5 < H(x) < 1.0$.

όπου:

$$k = \sqrt{\ln \left[1 / (H(x))^2 \right]} \quad \text{για } 0 < H(x) \leq 0.5 \quad (5)$$

$$k = \sqrt{\ln \left[1 / (1 - H(x))^2 \right]} \quad \text{για } 0.5 < H(x) < 1.0 \quad (6)$$

και $c_0=2.515517$, $c_1=0.802853$, $c_2=0.010328$, $d_1=1.432788$, $d_2=0.189269$, $d_3=0.001308$.

Οι κατηγορίες χαρακτηρισμού των επεισοδίων ξηρασίας μιας περιόδου με βάση τον δείκτη SPI, σύμφωνα με τους McKee et al. (1993) δίνονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Ταξινόμηση της ξηρασίας σύμφωνα με τον δείκτη SPI

Τιμές SPI	Χαρακτηρισμός περιόδου
≥ 2.00	Εξαιρετικά υγρή
1.50 μέχρι 1.99	Πολύ υγρή
1.00 μέχρι 1.49	Μέτρια υγρή
-0.99 μέχρι 0.99	Κανονική
-1.00 μέχρι -1.49	Μέτρια ξηρή
-1.50 μέχρι -1.99	Πολύ ξηρή
≤ -2.00	Εξαιρετικά ξηρή

2.2. Στοχαστική προσομοίωση βροχόπτωσης

Στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν παρουσιαστεί αρκετά μοντέλα για τη στοχαστική προσομοίωση, όχι μόνο της βροχόπτωσης, αλλά και άλλων μετεωρολογικών μεταβλητών, κυριότερα από τα οποία είναι το PARCHED-THIRST, το ClimGen, το CLIGEN και άλλα (Γεωργίου, 2004, Γεωργίου και Παπαμιχαήλ, 2006α).

Η προσομοίωση και η δημιουργία συνθετικών σειρών ημερήσιων βροχοπτώσεων γίνεται σε δύο βήματα. Κατά το πρώτο βήμα γίνεται η προσομοίωση της επισύμβασης της βροχής δηλαδή αν η ημέρα είναι υγρή ή ξηρή και κατά το δεύτερο βήμα, στην περίπτωση που η ημέρα είναι υγρή, γίνεται η προσομοίωση του ύψους της βροχής (Γεωργίου και Παπαμιχαήλ, 2005; 2006β).

Η επισύμβαση της βροχόπτωσης προσομοιώνεται με μία πρώτης τάξης, δύο καταστάσεων αλυσίδα Markov και υπολογίζονται οι πιθανότητες μετάβασης για κάθε ημέρα του έτους (Srikanthan and McMahon 1983; Γεωργίου 2004). Για μια πρώτης τάξης αλυσίδα Markov, ο πίνακας των πιθανοτήτων μετάβασης στην περίπτωση της επισύμβασης ή όχι της βροχής, όπου υπάρχουν δύο καταστάσεις (υγρή και ξηρή) είναι ο εξής:

$$P(t) = \begin{bmatrix} p_{dd} & p_{dw} \\ p_{wd} & p_{ww} \end{bmatrix} \quad (7)$$

όπου: p_{dd} = πιθανότητα υπό συνθήκη (conditional probability) ότι μια ξηρή ημέρα (dry day) ακολουθείται από μια ξηρή, p_{dw} = πιθανότητα υπό συνθήκη ότι μια υγρή ημέρα (wet day) ακολουθείται από μια ξηρή, p_{wd} = πιθανότητα υπό συνθήκη ότι μια ξηρή ημέρα ακολουθείται από μια υγρή και τέλος p_{ww} = πιθανότητα υπό συνθήκη ότι μια υγρή ημέρα ακολουθείται από μια υγρή.

Για την παραγωγή συνθετικών σειρών υγρών και ξηρών ημερών χρησιμοποιούνται τυχαίοι αριθμοί, οι οποίοι παράγονται από την ομοιόμορφη κατανομή στο διάστημα $[0,1]$.

Στη συνέχεια για τις υγρές ημέρες, η συνθετική παραγωγή του ύψους βροχής γίνεται με την υιοθέτηση της γάμμα κατανομής [σχέση (1)] και την παραγωγή τυχαίων αριθμών. Αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας εκτίμησης τυχαίων αριθμών μπορεί κανείς να βρει στους Γεωργίου (2004) και Γεωργίου και Παπαμιχαήλ (2006β).

2.3. Στοχαστικά μοντέλα SARIMA

Στοχαστικές διαδικασίες για την προσομοίωση χρονοσειρών δόθηκαν συστηματικά από τους Box and Jenkins, οι οποίοι περιγράφουν μια οικογένεια γραμμικών στοχαστικών μοντέλων που είναι γνωστά ως Box-Jenkins ή SARIMA (Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average) μοντέλα (Box and Jenkins, 1976; Box et al., 1994). Τέτοια στοχαστικά μοντέλα εφαρμόστηκαν στην ανάλυση οικονομικών προβλημάτων, στην προσομοίωση υδρολογικών χρονικών σειρών όπως παροχών ή εισροών, ποιοτικών παραμέτρων, υπόγειας στάθμης υδροφορέων κ. άλ.. Η γενική μορφή των μοντέλων SARIMA, η δημιουργία στασιμότητας, ο αρχικός προσδιορισμός του μοντέλου, η εκτίμηση των παραμέτρων του μοντέλου, ο έλεγχος της καταλληλότητάς του και η επαλήθευσή του περιγράφονται αναλυτικά από τους: Box and Jenkins, 1976; Box et al., 1994; Γεωργίου και Παπαμιχαήλ, 1999; Papamichail et al., 2000; Papamichail and Georgiou, 2001; Manakos et al., 2011.

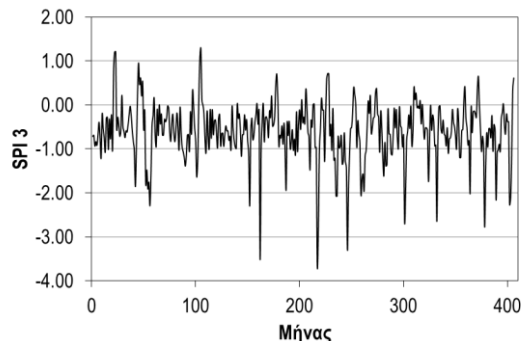
Το κατάλληλο μοντέλο SARIMA μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη του δείκτη SPI για μικρό χρονικό διάστημα (short term prediction) και για τη δημιουργία συνθετικών σειρών απεριόριστης διάρκειας (long term generation).

3. ΕΦΑΡΜΟΓΗ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

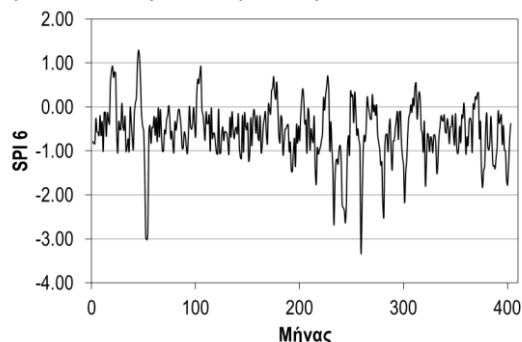
Η εφαρμογή αφορά τον υπολογισμό του δείκτη SPI της χρονικής περιόδου 1965-1998, για χρονικά βήματα 3, 6, 9 και 12 μηνών, στο σταθμό του Αγίου Μάμα Χαλκιδικής ($40^\circ 15'$, $23^\circ 20'$).

Αρχικά υπολογίστηκαν για κάθε χρονικό βήμα οι τιμές των παραμέτρων σχήματος (α) και κλίμακας (β) της κατανομής γάμμα [σχέση (1)]. Στη συνέχεια με τη βοήθεια των σχέσεων (2) μέχρι (6) υπολογίστηκε η τιμή του δείκτη SPI που φαίνεται στα Σχήματα 1, 2, 3 και 4 για χρονικό βήμα 3, 6, 9 και 12 μηνών.

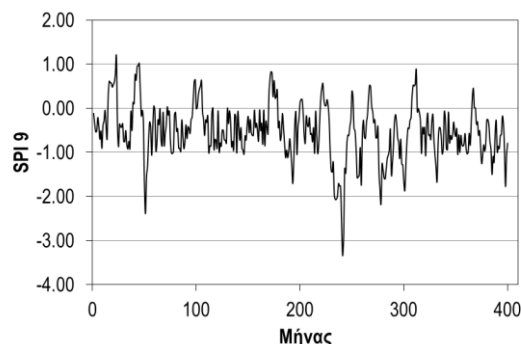
Από τα Σχήματα αυτά προκύπτει πως στο μεγαλύτερο χρονικό διάστημα υπάρχουν «κανονικές» συνθήκες μιας και η τιμή του δείκτη κυμαίνεται από -0.99 μέχρι 0.99. Συνθήκες «πολύ υγρές» και «εξαιρετικά υγρές» δεν υπάρχουν σε καμία περίπτωση. Αντίθετα «μέτρια ξηρές», «πολύ ξηρές» και «εξαιρετικά ξηρές», εμφανίζονται σε όλες τις περιπτώσεις.



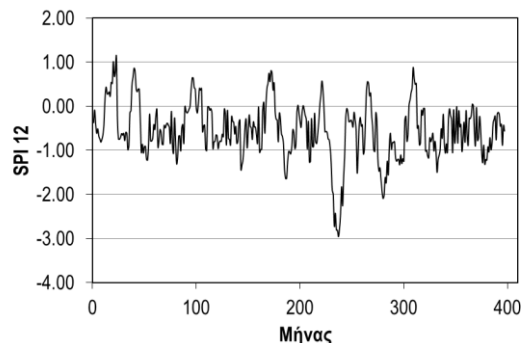
Σχήμα 1. Μηνιαία μεταβολή του δείκτη SPI, για τη χρονική περίοδο 1965-1998, για χρονικό βήμα 3 μηνών στο σταθμό του Αγίου Μάμα.



Σχήμα 2. Μηνιαία μεταβολή του δείκτη SPI, για τη χρονική περίοδο 1965-1998, για χρονικό βήμα 6 μηνών στο σταθμό του Αγίου Μάμα.



Σχήμα 3. Μηνιαία μεταβολή του δείκτη SPI, για τη χρονική περίοδο 1965-1998, για χρονικό βήμα 9 μηνών στο σταθμό του Αγίου Μάμα.



Σχήμα 4. Μηνιαία μεταβολή του δείκτη SPI, για τη χρονική περίοδο 1965-1998, για χρονικό βήμα 12 μηνών στο σταθμό του Αγίου Μάμα.

Πίνακας 2. Ποσοστιαία κατανομή της συχνότητας εμφάνισης των συμβάντων κάθε κλάσης του δείκτη SPI, για την ιστορική σειρά βροχοπτώσεων (1965-1998), τη συνθετική σειρά βροχοπτώσεων και τη συνθετική σειρά SPI και χρονικά βήματα 3 και 6 μηνών στο σταθμό του Αγίου Μάμα

Κλάσεις	3-μήνες			6-μήνες		
	Ιστορική (%) βροχόπτωση	Συνθετική (%) βροχόπτωση	Συνθετική SPI (%)	Ιστορική (%) βροχόπτωση	Συνθετική (%) βροχόπτωση	Συνθετική SPI (%)
Εξαιρετικά υγρός	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Πολύ υγρός	0.00	0.17	0.17	0.00	0.17	0.67
Μέτρια υγρός	0.99	0.67	1.51	0.50	1.51	3.01
Κανονικός	78.08	78.93	75.75	78.41	80.17	81.77
Μέτρια ξηρός	13.55	13.21	17.06	15.63	12.10	11.04
Πολύ ξηρός	3.45	3.85	4.68	1.99	4.20	3.18
Εξαιρετικά ξηρός	3.94	3.18	0.84	3.47	1.85	0.33

Πίνακας 3. Ποσοστιαία κατανομή της συχνότητας εμφάνισης των συμβάντων κάθε κλάσης του δείκτη SPI, για την ιστορική σειρά βροχοπτώσεων (1965-1998), τη συνθετική σειρά βροχοπτώσεων και τη συνθετική σειρά SPI και χρονικά βήματα 9 και 12 μηνών στο σταθμό του Αγίου Μάμα

Κλάσεις	9-μήνες			12-μήνες		
	Ιστορική (%) βροχόπτωσ η	Συνθετική (%) βροχόπτωσ η	Συνθετική SPI (%)	Ιστορική (%) βροχόπτωσ η	Συνθετική (%) βροχόπτωσ η	Συνθετικ ή SPI (%)
Εξαιρετικά υγρός	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Πολύ υγρός	0.00	0.17	0.17	0.00	0.00	0.00
Μέτρια υγρός	0.50	1.35	1.51	0.50	1.53	0.67
Κανονικός	80.65	80.41	84.95	78.16	75.55	73.08
Μέτρια ξηρός	11.17	12.33	10.87	14.39	16.81	17.73
Πολύ ξηρός	4.96	3.38	1.84	2.73	4.75	6.35
Εξαιρετικά ξηρός	1.99	2.36	0.67	2.73	1.36	2.17

Στον Πίνακα 2 δίνεται η ποσοστιαία κατανομή της συχνότητας εμφάνισης των συμβάντων κάθε κλάσης για τη χρονική περίοδο 1965-1998 για τις περιπτώσεις χρονικών βημάτων 3 και 6 μηνών και στον Πίνακα 3 για τις περιπτώσεις 9 και 12 μηνών. Όπως προκύπτει από τα Σχήματα 1-4 και τους Πίνακες 2 και 3, το μεγαλύτερο ποσοστό, για τις μέτρια ξηρές συνθήκες εμφανίζεται στην περίπτωση του χρονικού βήματος των 6 μηνών (15.63%), για τις πολύ ξηρές στην περίπτωση των 9 μηνών (4.96%) και για τις εξαιρετικά ξηρές στην περίπτωση των 3 μηνών (3.94%). Το τελευταίο είναι αρκετά σημαντικό μιας και το χρονικό βήμα των 3 μηνών ταυτίζεται με την αρδευτική περίοδο, η οποία συνήθως είναι τρεις μήνες (Ιούνιος-Αύγουστος), όπου και εντοπίζονται αυτές οι περιόδους. Παρόλα αυτά το περιορισμένο ποσοστό (3.94%) σε μία περίοδο 34 ετών δεν είναι ιδιαίτερα ανησυχητικό.

Η εφαρμογή των εποχιακών στοχαστικών μοντέλων SARIMA έγινε στα δεδομένα των μηνιαίων τιμών του δείκτη SPI για τα χρονικά βήματα 3, 6, 9 και 12 μηνών. Η σειρά διαιρέθηκε σε δύο σειρές. Στην πρώτη που καλύπτει τα έτη 1965-1997 και τη δεύτερη που καλύπτει το έτος 1998. Η πρώτη σειρά χρησιμοποιήθηκε για την εύρεση του κατάλληλου στοχαστικού μοντέλου. Δεν χρησιμοποιήθηκε μετασχηματισμός δημιουργίας στασιμότητας μιας και οι σειρές είναι στάσιμες. Δοκιμάστηκαν διάφορα SARIMA μοντέλα και βρέθηκε ότι τα κατάλληλα είναι: Χρονικό βήμα 3-μηνών: (1,1,1) (3,0,1)₃
Χρονικό βήμα 6-μηνών: (1,1,1) (1,0,0)₆
Χρονικό βήμα 9-μηνών: (1,1,1) (0,0,1)₉
Χρονικό βήμα 12-μηνών: (3,1,2) (0,0,1)₁₂

Για τα παραπάνω μοντέλα οι τιμές των παραμέτρων, το τυπικό σφάλμα εκτίμησης, η T-τιμή και η P-τιμή δίνονται στον Πίνακα 4.

Πίνακας 4. Τιμές των παραμέτρων, τυπικό σφάλμα εκτίμησης, T-τιμή και P-τιμή για τα κατάλληλα μοντέλα της χρονικής σειράς του δείκτη SPI, των χρονικών βημάτων 3, 6, 9 και 12 μηνών, της χρονικής περιόδου 1965-1997 στο σταθμό του Αγίου Μάμα

Σειρά SPI	Παράμετρος	Τιμή	Τυπικό σφάλμα	T-τιμή	P-τιμή
SPI 3 (1,1,1) (3,0,1) ₃	φ_1	0.5035220	0.04570630	11.01650	0.000000
	Φ_1	-0.9980190	0.06809310	-14.65670	0.000000
	Φ_2	-0.1855370	0.07220400	-2.56962	0.010555
	Φ_3	-0.1604870	0.05342450	-3.00400	0.002838
	θ_1	0.9956360	0.00083541	1191.79000	0.000000
	Θ_1	-0.9256340	0.04824980	-19.18420	0.000000
SPI 6 (1,1,1) (1,0,0) ₆	φ_1	0.6882480	0.03733260	18.43560	0.000000
	Φ_1	-0.1300970	0.05112920	-2.544480	0.011332
	θ_1	0.9923290	0.00204559	485.107000	0.000000
SPI 9 (1,1,1) (0,0,1) ₉	φ_1	0.7560000	0.03447370	21.929800	0.000000
	θ_1	0.9836040	0.00397699	247.324000	0.000000
	Θ_1	0.2501550	0.05030680	4.972580	0.000001
SPI 12 (3,1,2) (0,0,1) ₁₂	φ_1	0.0406478	0.05613190	0.724147	0.469423
	φ_2	0.5131940	0.04785430	10.724100	0.000000
	φ_3	0.1589550	0.05118530	3.105480	0.002043
	θ_1	0.3431100	0.02218540	15.465600	0.000000
	θ_2	0.6763580	0.02345660	28.834500	0.000000
	Θ_1	0.1550250	0.05299520	2.925270	0.003649

Για τον έλεγχο της καταλληλότητας των μοντέλων χρησιμοποιείται ο έλεγχος των υπολοίπων. Ο έλεγχος αυτός γίνεται με το αθροιστικό περιοδόγραμμα, τη συνάρτηση αυτοσυσχέτισης και τη συνάρτηση μερικής αυτοσυσχέτισης της χρονικής σειράς των υπολοίπων τα οποία βρίσκονται εντός των ορίων εμπιστοσύνης γεγονός που δείχνει ότι τα υπόλοιπα είναι λευκού θορύβου δηλαδή ασυσχέτιστα.

Στη συνέχεια τα μοντέλα αυτά χρησιμοποιήθηκαν για την πρόβλεψη του μηνιαίου δείκτη SPI του έτους 1998. Στα Σχήματα 5, 6, 7 και 8 φαίνονται οι μηνιαίες τιμές του δείκτη SPI όπως υπολογίστηκαν από τη μετρημένη βροχόπτωση και όπως εκτιμήθηκαν με τη χρήση των μοντέλων του Πίνακα 4, για χρονικά βήματα 3, 6, 9 και 12 μηνών.

Όπως φαίνεται από τα Σχήματα 5 μέχρι 8, τα εποχιακά στοχαστικά μοντέλα του Πίνακα 4, μπορούν να προβλέψουν τη μηνιαία τιμή του SPI για

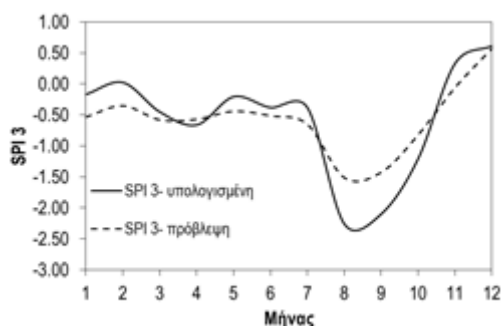
μικρό χρονικό διάστημα με ικανοποιητική ακρίβεια, για όλα τα χρονικά βήματα. Οι συνθήκες αυτές πρόβλεψης της ξηρασίας είναι απαραίτητες για την εκτίμηση των μέτρων λόγω επερχόμενης ξηρασίας στο μέλλον και η ανάπτυξη σχεδίων μετριασμού από τις επιπτώσεις της.

Στη συνέχεια τα παραπάνω μοντέλα χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή συνθετικών σειρών SPI. Έτσι σε κάθε χρονικό βήμα παρήχθησαν 100 συνθετικές σειρές, διάρκειας 50 ετών η κάθε μία, από τις οποίες προέκυψε μία μέση συνθετική σειρά.

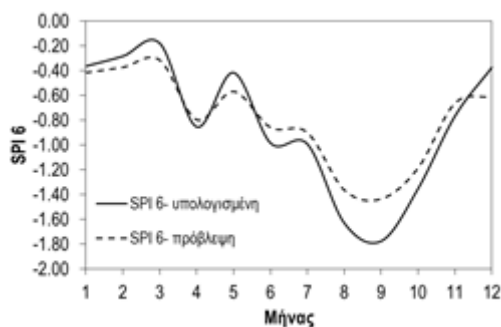
Για κάθε μία σειρά υπολογίστηκε η ποσοστιαία κατανομή της συχνότητας εμφάνισης των συμβάντων κάθε κλάσης του δείκτη SPI και δίνεται στον Πίνακα 2 για χρονικά βήματα 3 και 6 μηνών και στον Πίνακα 3 για χρονικά βήματα 9 και 12 μηνών. Από τη σύγκριση φαίνεται ότι οι συνθετικές σειρές

διατηρούν τα χαρακτηριστικά της ιστορικής και τα ποσοστά είναι παρόμοια.

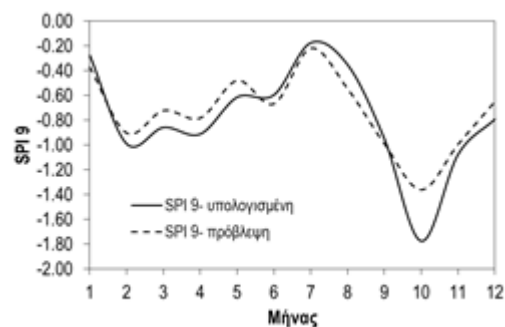
Εκτός όμως από τη στοχαστική παραγωγή του δείκτη SPI με τα στοχαστικά μοντέλα, έγινε προσομοίωση και συνθετική παραγωγή ημερήσιων βροχοπτώσεων για το σταθμό του Αγίου Μάμα Χαλκιδικής. Με τη βοήθεια των ημερήσιων δεδομένων βροχόπτωσης των ετών 1965 μέχρι 1998 χαρακτηρίστηκε κάθε ημέρα, αν είναι υγρή ή ξηρή, χρησιμοποιώντας ως όριο υγρής ημέρας τα 0.1 mm. Στη συνέχεια, υπολογίστηκαν οι τιμές των πιθανοτήτων υπό συνθήκη ότι μια ξηρή ημέρα ακολουθείται από μια υγρή ημέρα (p_{wd}) και μια υγρή ημέρα ακολουθείται από μια υγρή (p_{ww}), για κάθε ημέρα. Για την παραγωγή συνθετικών σειρών υγρών και ξηρών ημερών στο σταθμό του Αγίου Μάμα χρησιμοποιήθηκαν τυχαίοι αριθμοί ομοιόμορφης κατανομής. Με τον τρόπο αυτό παρήχθησαν 100 συνθετικές σειρές, 50 ετών η καθεμία από τις οποίες προέκυψε μια μέση συνθετική σειρά. Μετά τον καθορισμό ότι μια ημέρα είναι υγρή, απαιτείται ο υπολογισμός του ύψους της βροχόπτωσης, το οποίο έγινε με τη βοήθεια της γάμμα κατανομής. Η εκτίμηση των παραμέτρων της γάμμα κατανομής σε ημερήσια βάση για τη βροχόπτωση του σταθμού του Αγίου Μάμα, έγινε με την εφαρμογή της κατανομής στα ημερήσια ύψη βροχής κάθε μήνα και στη συνέχεια, η απόκτηση των ημερήσιων τιμών των παραμέτρων σχήματος και κλίμακας της γάμμα κατανομής έγινε με την εφαρμογή των σειρών Fourier (Γεωργίου, 2004).



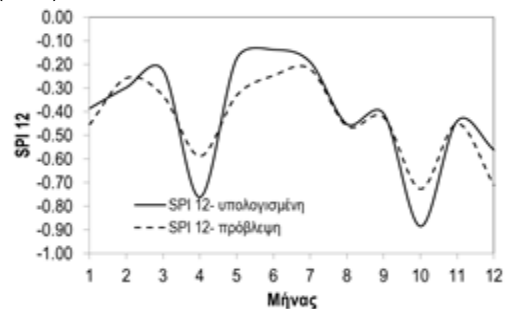
Σχήμα 5. Σύγκριση μηνιαίων τιμών του δείκτη SPI του έτους 1998, για χρονικό βήμα 3 μηνών και των αντίστοιχων τιμών πρόβλεψης του μοντέλου (1,1,1)_(3,0,1)₃.



Σχήμα 6. Σύγκριση μηνιαίων τιμών του δείκτη SPI του έτους 1998, για χρονικό βήμα 6 μηνών και των αντίστοιχων τιμών πρόβλεψης του μοντέλου (1,1,1)_(1,0,0)₆.



Σχήμα 7. Σύγκριση μηνιαίων τιμών του δείκτη SPI του έτους 1998, για χρονικό βήμα 9 μηνών και των αντίστοιχων τιμών πρόβλεψης του μοντέλου (1,1,1)_(0,0,1)₉.



Σχήμα 8. Σύγκριση μηνιαίων τιμών του δείκτη SPI του έτους 1998, για χρονικό βήμα 12 μηνών και των αντίστοιχων τιμών πρόβλεψης του μοντέλου (3,1,2)_(0,0,1)₁₂.

Με βάση τις ημερήσιες τιμές των παραμέτρων α και β της γάμμα κατανομής, παρήχθησαν τυχαίοι αριθμοί. Για καθεμία από τις 100 συνθετικές σειρές επισύμβασης της βροχόπτωσης, διάρκειας 50 ετών η καθεμία, που παρήχθησαν προηγουμένα, παράγονται και τα αντίστοιχα ύψη βροχής για κάθε υγρή ημέρα. Στη συνέχεια, από τις 100 συνθετικές σειρές υπολογίστηκε μια μέση συνθετική σειρά ημερήσιων υψών βροχής για το σταθμό του Αγίου Μάμα. Με βάση τη μέση συνθετική σειρά των βροχοπτώσεων διάρκειας 50 ετών υπολογίστηκε ο δείκτης SPI, για χρονικά βήματα 3, 6, 9 και 12 μηνών και στη συνέχεια η ποσοστιαία κατανομή της συχνότητας εμφάνισης των συμβάντων κάθε κλάσης του δείκτη SPI και δίνεται στον Πίνακα 2 για χρονικά βήματα 3 και 6 μηνών και στον Πίνακα 3 για χρονικά βήματα 9 και 12 μηνών. Από τη σύγκριση φαίνεται ότι οι συνθετικές σειρές διατηρούν τα χαρακτηριστικά της ιστορικής και τα ποσοστά είναι παρόμοια. Επομένως, οι συνθετικές σειρές SPI είτε υπολογισμένες με ένα στοχαστικό μοντέλο είτε με τη βοήθεια στοχαστικών σειρών βροχοπτώσεων, διατηρούν τα στατιστικά χαρακτηριστικά της ιστορικής σειράς και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της έντασης και της διάρκειας των επεισοδίων ξηρασίας με σκοπό τη διαχείρισή της αλλά και για το σχεδιασμό και τη διαχείριση συστημάτων υδατικών πόρων.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή υπολογίζεται ο δείκτης SPI για χρονικά βήματα 3, 6, 9 και 12 μηνών και στη συνέχεια εφαρμόζονται τα στοχαστικά μοντέλα

SARIMA για την πρόβλεψη των δεικτών ξηρασίας για έναν ή περισσότερους μήνες, για τους οποίους υπάρχουν μετρημένες τιμές του δείκτη. Από τη σύγκριση μεταξύ μετρημένων και εκτιμημένων τιμών προέκυψε ότι τα στοχαστικά μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν με μεγάλη ακρίβεια για την πρόβλεψη του δείκτη ξηρασίας SPI όλων των χρονικών βημάτων. Επίσης, τα στοχαστικά μοντέλα χρησιμοποιήθηκαν και για τη δημιουργία συνθετικών σειρών του δείκτη SPI για τα διάφορα χρονικά βήματα. Συνθετικές σειρές του δείκτη SPI προέκυψαν επίσης με τη βοήθεια συνθετικών σειρών βροχόπτωσης. Από τις δύο διαδικασίες προέκυψε ότι οι συνθετικές σειρές διατηρούν τα χαρακτηριστικά της ιστορικής σειράς και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ληφθούν κατανομές πιθανότητας ξηρασίας για την ανάλυση κινδύνων ξηρασίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Abramowitz, M., Stegun, A. (editors), 1965. Handbook of mathematical formulas, graphs, and mathematical tables. Dover Publication Inc. New York.
- Box, G.E.P., Jenkins, G.M., 1976. Time series analysis: forecasting and control. Holden Day, Inc., San Francisco, Calif., 532 p.
- Box, G.E.P., Jenkins, G.M., Reinsel, G.C., 1994. Time series analysis: forecasting and control. Prentice – Hall International, Inc., 598 p.
- Dalezios, N.R., Papazafiriou, Z.G., Papamichail, D.M., Karakostas, T.S., 1991. Drought assessment for the potential of precipitation enhancement in northern Greece. Theor. Appl. Climatol., 44: 75-88.
- Durdu, O.F., 2010. Application of linear stochastic models for drought forecasting in the Buyuk Menderes river basin, western Turkey. Stoch. Environ. Res. Risk Assess., 24: 1145-1162.
- Hayes, M., 1999. Drought indices. National drought Mitigation Center, 7p.
- Iglesias, A., Cancelliere, A., Gabiña, D., López-Francos, A., Moneo, A., Rossi, G. (Editors), 2005. Drought Management Guidelines. Euro-Mediterranean Regional Programme for Local Water Management (MEDA Water) Mediterranean Drought Preparedness and Mitigation Planning (MEDROPLAN).
- Iglesias, A., Moneo, M., Lopez-Francos, A., 2007. Drought management guidelines technical annex. Series B : Etudes et Recherches, No. 58, Options Méditerranéennes, 496 p.
- Manakos, A., Georgiou, P.E., Mouratidis, I., 2011. Application of stochastic models to rational management of water resources at the Damasi Titanos karstic aquifer in Thessaly Greece. Advances in the Research of Aquatic Environment, 1, 435-442.
- Mckee, T.B., Doesken, N.J., Kleist, J., 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scale. 8th Conference on Applied Climatology, Anaheim, CA, 179-184.
- Mishra, A.K., Desai, V.R., 2005. Drought forecasting using stochastic models. Stoch. Environ. Res. Risk Assess., 19: 326-339.
- Mishra, A.K., Singh, V.P., 2010. A review of drought concepts. J. of Hydrology, 391: 202-216.
- Mishra, A.K., Singh, V.P., 2011. Drought modeling – A review. J. of Hydrology, 403: 157-175.
- Mishra, A.K., Singh, V.P., Desai, V.R., 2009. Drought characterization: a probabilistic approach. Stoch. Environ. Res. Risk Assess., 23: 41-55.
- Papamichail, D.M., Antonopoulos, V.Z., Georgiou, P.E., 2000. Stochastic models for Strymon river flow and water quality parameters. Proceedings of the International Conference "Protection and Restoration of the Environment V", Thassos, Greece, Vol. I, 219-226.
- Papamichail, D.M., Georgiou, P.E., 2001. Seasonal ARIMA inflow models for reservoir sizing. Journal of the American Water Resources Association, 37(4): 877-885.
- Sonmez, F.K., Komuscu, A.U., Erkan, A., Turgu, E., 2005. An analysis of spatial and temporal dimension of drought vulnerability in Turkey using the Standardized Precipitation Index. Nat. Haz., 35:243-264.
- Srikanthan, R., McMahon, T.A., 1983. Stochastic simulation of daily rainfall for Australian stations. Trans. of the ASAE, 754-766.
- Thom, H.C.S., 1958. A note on the gamma distribution. Mon. Weath. Rev., 86: 117-122.
- Tsakiris, G., Pangalou, D., Vangelis, H., 2006. Regional drought assessment based on the reconnaissance drought index (RDI). Water Res. Manag., 21:813-821.
- Γεωργίου, Π.Ε., 2004. Βελτιστοποίηση λειτουργίας ταμιευτήρων για αρδευτικούς σκοπούς. Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Γεωπονίας Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη.
- Γεωργίου, Π.Ε., Παπαμιχαήλ, Δ.Μ., 1999. Σχεδιασμός και λειτουργία ταμιευτήρων με τη βοήθεια εποχιακών στοχαστικών ομοιωμάτων. Πρακτικά 12^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου Στατιστικής, Σπέτσες, 60-69.
- Γεωργίου, Π.Ε., Παπαμιχαήλ, Δ.Μ., 2005. Συνθετική παραγωγή επισύμβασης ημερήσιων βροχοπτώσεων με τη βοήθεια αλυσίδων Markov. Πρακτικά 4^{ου} Εθνικού Συνεδρίου Γεωργικής Μηχανικής, Αθήνα, 782-791.
- Γεωργίου, Π.Ε., Παπαμιχαήλ, Δ.Μ., 2006α. Στοχαστική παραγωγή ημερήσιων κλιματικών παραμέτρων και καμπύλες συχνότητας εξατμισοδιαπνοής αναφοράς. Υδροτεχνικά, 16:5-20.
- Γεωργίου, Π.Ε., Παπαμιχαήλ, Δ.Μ., 2006β. Συνθετική παραγωγή ημερήσιων βροχοπτώσεων. Πρακτικά 8^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου Μετεωρολογίας - Κλιματολογίας - Φυσικής της Ατμόσφαιρας, Αθήνα, τόμος Α, 96-103.
- Κωτσοβίνος, Ν., Αγγελίδης, Π., 2009. Η Περιβαλλοντική σημασία του δείκτη ξηρασίας SPI: Προτάσεις εναλλακτικού στατιστικού υπολογισμού του. Υδρογαία, Τιμητικός Τόμος στον καθηγητή κ. Χ. Τζιμόπουλο, Επ. Έκδοσης: Σ. Γιαννόπουλος, Θεσσαλονίκη.

ΛΟΓΟΙ ΕΣΦΑΛΜΕΝΗΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΣΤΟΝ ΕΛΛΑΔΙΚΟ ΧΩΡΟ

Σ. Αλεξανδρής¹, Ν. Προύτσος¹, Χ. Καραβίτης¹, Ι. Τσίρος² και Δ. Σταματάκος¹

¹ Εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής, Τμήμα Αξιοποίησης φυσικών πόρων & Γεωργικής Μηχανικής.

² Εργαστήριο Γεωργικής Μετεωρολογίας, Γενικό Τμήμα.

Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Ιερά Οδός 75, 118 55 Αθήνα

Ο υπολογισμός της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς (ET_0) και τα πρωτόκολλα εκτίμησής της απαιτούν οι σχετικές μετεωρολογικές παράμετροι να μετρώνται πάνω από πρότυπες επιφάνειες αναφοράς (γρασίδι ή μηδική). Στην Ελλάδα και σε αρκετές Μεσογειακές χώρες τέτοια υπόβαθρα θέσεων αναφοράς και αντίστοιχα πρότυπα αγρομετεωρολογικά δίκτυα είναι από σπανιότατα έως ανύπαρκτα. Μια τέτοια πρακτική οδηγεί στη χρήση μη αξιόπιστων δεδομένων για τον υπολογισμό της ET_0 από μη πλήρως τυποποιημένες, σύμφωνα με τα πρωτόκολλα, τοποθεσίες, οπότε οι εκτιμήσεις της ET_0 να οδηγούνται σε σημαντικά και συστηματικά σφάλματα υπολογισμού των αναγκών των καλλιεργειών σε νερό. Οι συνέπειες είναι ιδιαίτερα σημαντικές για την άρδευση, που χρησιμοποιεί κατά μέσο όρο πάνω από το 85% της συνολικής κατανάλωσης νερού στην χώρα μας. Επιπλέον, οι υφιστάμενοι μη αξιόπιστοι μετεωρολογικοί σταθμοί δεν κατανέμονται ομοιόμορφα, αλλά πολλές φορές συγκεντρώνονται σε μη αγροτικές περιοχές και κυρίως πλησίον οικισμών. Οι ελλείψεις αυτές των κατάλληλων δεδομένων οδηγούν σε ανορθόδοξες και πολλές φορές λανθασμένες, εκτιμήσεις της ET_0 στις αγροτικές περιοχές. Η παρούσα εργασία συγκρίνει μετεωρολογικά δεδομένα και εκτιμήσεις ET_0 μιας επαρκώς αρδευόμενης χαμηλής καλλιέργειας σε σχέση με τις αντίστοιχες εκτιμήσεις πάνω από ξηρό και γυμνό έδαφος, κάτω από τις ίδιες τοπικές συνθήκες. Επίσης διερευνά διεξοδικά την επίδραση της επιφάνειας του υποβάθρου επί των μετεωρολογικών παραμέτρων που συμμετέχουν στον υπολογισμό του ρυθμού ET_0 με χρήση του μοντέλου Penman-Monteith (FAO56-PM), καθώς επίσης και με την χρήση της εμπειρικής μεθόδου Hargreaves. Τα αποτελέσματα αυτής της σύγκρισης έδειξαν ότι η υπερεκτίμηση της ET_0 μπορεί να κυμανθεί από 27% έως και 47% κατά την διάρκεια των θερμών περιόδων, όπου σημειώνονται και οι μέγιστες απαιτήσεις άρδευσης και να οδηγήσει σε αντίστοιχη υπερκατανάλωση νερού.

Λέξεις κλειδιά: Εξατμισοδιαπνοή αναφοράς ET_0 , Καλλιέργειας ET_c , Μέθοδος Penman-Monteith FAO56-PM, Μέθοδος Hargreaves, Θερμοκρασία αέρα, Σχετική Υγρασία, Ταχύτητα ανέμου, Καθαρή ακτινοβολία.

REASONS FOR NON-RATIONAL ESTIMATES OF REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION IN GREECE

S. Alexandris¹, N. Proutsos¹, Ch. Karavitis¹, I. Tsiros² and D. Stamatakos¹.

¹ Lab of Agricultural Hydraulics, Department of Natural Resources & Agricultural Engineering

² Lab of Agricultural Meteorology, Department of Science

Agricultural University of Athens, Iera Odos 75, 118 55 Athens, GREECE

The calculation of reference Evapotranspiration (ET_0) and the measurement protocols require meteorological parameters to be taken over standardized vegetation surfaces (grass or alfalfa reference). Unfortunately, in Greece and in many Mediterranean areas such vegetation-reference sites and standardized agro-meteorological networks are rare or non-existent. Such a practice leads to the use of inappropriate data for ET_0 estimations from non ideal sites (*non-conforming to standardization*) and consequently, to significant and systematic cumulative errors in determining crop water requirements and irrigation scheduling. Furthermore, the existing inappropriate meteorological stations are not uniformly distributed and rather concentrated in non-rural areas and mostly in agglomerations. Consequently, there is a lack of suitable data leading to non-compatible ET_0 estimations in many agricultural regions. Present work compares meteorological attributes and reference evapotranspiration calculations (FAO56 Penman-Monteith, Hargreaves equations) of a well-watered short crop with those over a dry bare soil, under the same local environment. The results show that the overestimation of the ET_0 and therefore the over-consumption of irrigation water can oscillate from 27% up to 47% during the warm season, with maximum irrigation requirements.

Keywords: Reference Evapotranspiration ET_0 , Crop ET_c , Penman-Montheith method, Hargreaves method, Air temperature, Air relative Humidity, Wind speed, Net Radiation.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η τυποποίηση των επιφανειών επί των οποίων είναι εγκατεστημένοι αγρομετεωρολογικοί σταθμοί είναι επιβεβλημένη λόγω της χωρικής και χρονικής μεταβλητότητας ουσιαστικών παραγόντων που επηρεάζουν την Εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (ET_0). Η μεταβλητότητα αυτή δημιουργεί δυσκολίες στην χρήση και στην ακριβή απόδοση των σχετικών προτεινόμενων εξισώσεων για την εκτίμηση της ET_0 . Οι παράγοντες που επηρεάζουν την ET_0

περιλαμβάνουν την ηλιακή ακτινοβολία, τη θερμοκρασία του αέρα, τη σχετική υγρασία, και την ταχύτητα του ανέμου. Αυτές οι παράμετροι είναι άκρως αλληλένδετες με τη φύση και τις ιδιότητες των επιφανειών επί των οποίων λαμβάνονται οι μετρήσεις τους, καθώς είναι και εκείνες οι παράμετροι που ουσιαστικά στηρίζουν αναμφίβολα όλο το θεωρητικό υπόβαθρο του πιο αξιόπιστου μοντέλου για την εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς: της μεθόδου Penman-Monteith (Allen et

al.,1998). Ένας σταθμός εγκατεστημένος σε ξηρό περιβάλλον θα αποτυπώνει υψηλότερες τιμές θερμοκρασίας και αντίστοιχα χαμηλότερες τιμές σχετικής υγρασίας σε σχέση με ένα σταθμό που βρίσκεται σε μια καλά αρδευόμενη βλάστηση (Allen,1996; Yoder et al., 2000). Οι περισσότερες επιρροές λοιπόν από τις μετεωρολογικές συνθήκες είναι ενσωματωμένες στην εκτίμηση της ET_0 και συνεπώς η ET_0 ουσιαστικά αποτελεί μία κλιματική παράμετρο που εκφράζει την εξατμιστική ισχύ της ατμόσφαιρας σε ένα συγκεκριμένο τόπο και χρόνο έχοντας ως δεδομένο τα χαρακτηριστικά μιας καλλιέργειας αναφοράς που αποτελεί το τυποποιημένο υπόβαθρο των μετρήσεων (Allen et al.,1998).

Το βασικότερο, όμως και ουσιαστικότερο κριτήριο για την απόδοση όλων των σχετικών “κλιματικών” εξισώσεων που αποδίδουν τους ρυθμούς εξατμισοδιαπνοής αναφοράς είναι η επάρκεια νερού στο ριζόστρωμα καλλιέργειας αναφοράς. Κάτω από τέτοιες εδαφικές συνθήκες θα μπορούσε να εκφραστεί η μέγιστη δυνατότητα απώλειας νερού από ένα τυποποιημένο υπόβαθρο καλλιέργειας και έτσι μόνον θα μπορούσαν να αποδοθούν στην πράξη οι πραγματικές εκτιμήσεις της ET_0 και ο ουσιαστικός ρόλος της στην εξοικονόμηση αρδευτικού νερού.

Παγκοσμίως, οι ερευνητές έχουν αποδεχθεί την χρήση γρασιδιού (*cool season grass- bluegrasses, fescues, and ryegrasses*) και της μηδικής (*alfalfa-Medicago sativa*) ως πρότυπες επιφάνειες (Allen et al., 2006), λόγω της προσαρμοστικότητάς τους σε διάφορα κλιματικά καθεστώτα και λόγω της βιοφυσικής τους ομοιότητας με πολλές γεωργικές καλλιέργειες. Οι απαιτήσεις αυτών των τυποποιημένων επιφανειών όχι μόνο δεν αποτελούν «υποθετικές» επιφάνειες αναφοράς αλλά έχουν σχεδιαστεί και προταθεί για να προσομοιώσουν ένα κοινό σημείο αναφοράς μεταξύ των διαφορετικών μικροκλιματικών συνθηκών ανά τον κόσμο και του μέγιστου ρυθμού υδατοκατανάλωσης των διαφόρων καλλιεργειών που αναπτύσσονται κάτω από αυτές τις συνθήκες. Ο γνωστός συντελεστής καλλιέργειας (K_c) αποτελεί τον αναγωγικό μέσο μεταξύ της ET_0 και του δυναμικού ρυθμού εξατμισοδιαπνοής για όλα τα στάδια ανάπτυξης κάθε καλλιέργειας και αντιπροσωπεύει σε ένα τόπο, την σφαιρική επιρροή τεσσάρων βασικών χαρακτηριστικών που τον διαφοροποιούν από την καλλιέργεια αναφοράς. (ύψος καλλιέργειας, ανακλαστικότητα (*albedo*), αντίσταση φυτοκόμης, εξάτμιση από γυμνό έδαφος).

Σήμερα οι ανάγκες σε νερό άρδευσης συνήθως καθορίζονται αποκλειστικά μέσω διαδικασιών εκτίμησης της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς και απαιτούν σταθμούς εγκατεστημένους σε τυποποιημένες επιφάνειες βλάστησης. Οι περισσότερες περιοχές της Μεσογείου δεν διαθέτουν τέτοιες τυποποιημένες επιφάνειες, λόγω του υψηλού κόστους εγκατάστασης και συντήρησης. Αυτό έχει ως συνέπεια να γίνεται συστηματική χρήση ακατάλληλων κλιματικών δεδομένων προκαλώντας συσσωρευμένα σφάλματα όχι μόνο στο

προγραμματισμό των αρδεύσεων αλλά και στην εκτίμηση του ενεργειακού ισοζυγίου μιας περιοχής.

Η εργασία αυτή στοχεύει στο να αναδείξει και να επισημάνει την επίδραση των χαρακτηριστικών μιας επιφάνειας στην εκτίμηση της ET_0 .

2. ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.1. Θέση των μετεωρολογικών σταθμών.

Στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκαν μετεωρολογικά δεδομένα από δύο μετεωρολογικούς σταθμούς εγκατεστημένους στο νομό Αρκαδίας. Ειδικότερα ο πρώτος σταθμός της Εθνικής Μετεωρολογικής υπηρεσίας (ΕΜΥ) με ID: WMO-16710/TRIPOLIS AP, ήταν εγκατεστημένος (Εικ. 1) σε υψόμετρο 650,87m με Γ.Σ. $37^{\circ}32'0''$ Β και $22^{\circ}24'00''$ Α (WMO, 2008).



Εικόνα 1. Μετεωρολογικός σταθμός Ε.Μ.Υ. στο αεροδρόμιο της Τρίπολης με υπόβαθρο επιφάνειας αναφοράς το ξηρό έδαφος.

Ο δεύτερος αυτόματος μικρομετεωρολογικός σταθμός του τομέα Διαχείρισης Υδατικών πόρων του Γ.Π.Α (Εικ.2) ήταν εγκατεστημένος σε πειραματικό αγρό στην περιοχή Ζουπάνους, (2004 έως και το 2006), με Γ.Σ. $37^{\circ}33'11''$ Β και $22^{\circ}25'29''$ Α σε υψόμετρο 641 μέτρων.



Εικόνα 2. Αυτόματος μετεωρολογικός σταθμός Γ.Π.Α. (ΑΥΑ) εγκατεστημένος σε υπόβαθρο με χαμηλή πράσινη βλάστηση και με πλήρη επάρκεια εδαφικής υγρασίας, σε όλη την διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου.

Όπως προκύπτει διανυσματικά από τις γεωγραφικές συντεταγμένες των δύο σταθμών η μεταξύ τους απόσταση υπολογίστηκε σε 3,85

χιλιόμετρα, με τον σταθμό του ΓΠΑ να βρίσκεται ΒΑ του αντίστοιχου σταθμού της EMY (περίπου 43°).

2.2. Ημερήσιες κλιματικές παρατηρήσεις

2.2.1. Μετεωρολογικός σταθμός EMY

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν από το σταθμό τύπου “Stevenson screen” της EMY (Εικ.1) είναι ή μέση ημερήσια θερμοκρασία T_{avg} που εκτιμήθηκε από το μέσο όρο των παρατηρήσεων για την τυπική χειμερινή ώρα (UTC+2) T_{08}, T_{14}, T_{20} : $T_{avg} = (T_{08} + T_{14} + 2T_{20})/4$, η μέγιστη και ελάχιστη ημερήσια θερμοκρασία, T_{max} και T_{min} , η μέση ημερήσια σχετική υγρασία, RH_{avg} , και η μέση ημερήσια ταχύτητα ανέμου στο ύψος των δύο μέτρων, U_2 .

2.2.2. Μετεωρολογικός σταθμός AUA.

Στο κέντρο του αγρού πατατοκαλλιέργειας (Εικ.2) εγκαταστάθηκε αυτόματος μετεωρολογικός σταθμός (Minimet_2, Skyeinstruments) με μονάδα καταγραφής *Datahog_2, SDL_5400*, για τη λήψη μετρήσεων με συχνότητα δειγματοληψίας 10s (8640 αναγνώσεις ανά 24ωρο για κάθε μετρούμενη παράμετρο) και αποθήκευση μέσω τιμών 10λέπτου (Προύτσος κ.ά, 2009). Από τον μετεωρολογικό σταθμό AUA, για την αντίστοιχη χρονική περίοδο εκτιμήθηκαν οι μέσες ημερήσιες τιμές της θερμοκρασίας T_{avg} της σχετικής υγρασίας, RH_{avg} , μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας T_{max} και T_{min} και της ανεμοταχύτητας στο ύψος των δύο μέτρων, U_2 . Επίσης, η μέση ημερήσια πυκνότητα ροής της ολικής εισερχόμενης ακτινοβολίας μικρού μήκους κύματος R_s [W/m^2] μετρήθηκε από πυρανόμετρο τύπου SKS 1110 (350-1100nm). Επισημαίνεται δε ότι η βαθμονόμηση του αισθητήρα αναφέρεται σε ηλιακή ενέργεια στην περιοχή μηκών κύματος 300-3000nm, δηλαδή τη ζώνη αποδοχής των πυρανομέτρων Α' τάξης.

2.3. Μεθοδολογία

Στόχος της εργασίας είναι να μελετηθεί η επίδραση της “επιφάνειας αναφοράς” στα κλιματικά δεδομένα που χρησιμοποιούνται για να εκτιμηθεί η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς ET_o και κατ'επέκταση στον προσδιορισμό των αναγκών σε νερό των καλλιεργειών (εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας ET_c) σε τοπικό περιβάλλον. Η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας ET_c στην συγκεκριμένη εργασία εκτιμήθηκε άμεσα από την σχέση FAO-56 PM (Allen et al., 1998; ASCE-EWRI, 2005):

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

Στη σχέση (1) χρησιμοποιήθηκαν όλα τα γεωμετρικά και φυσικά χαρακτηριστικά της καλλιέργειας (ύψος, δείκτη φυλλικής επιφάνειας, αντίσταση στοματίων, επάρκεια εδαφικής υγρασίας). Ο υπολογισμός της ροής καθαρής ακτινοβολίας R_n έγινε σύμφωνα με την εργασία FAO-56 paper (Allen et al., 1998, equation 40, p.53) από την σχέση:

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad [2]$$

Η ροή θερμότητας στο έδαφος λαμβάνεται μηδενική για ημερήσιο βήμα εκτίμησης της ET_o . Η

εκτίμηση της R_n που προέρχεται από τις τιμές της ολικής ακτινοβολίας R_s για τις επιφάνειες αναφοράς των δύο σταθμών, διαφοροποιείται αρχικά από την ανακλαστικότητα της επιφάνειας (albedo), όπου η τιμή για το γυμνό έδαφος (EMY) και την καλλιέργεια (AUA) εκτιμήθηκε σε 0.17 και 0.23 αντίστοιχα. Η ανακλαστικότητα επηρεάζει αποκλειστικά τον όρο της καθαρής ακτινοβολίας μικρού μήκους κύματος R_{ns} , ενώ η διαφοροποίηση της καθαρής ακτινοβολίας μεγάλου μήκους ροής ακτινοβολίας οφείλεται στην θερμοκρασία και στη σχετική υγρασία που επικρατεί πάνω από τις δύο επιφάνειες και εκφράζεται στον όρο της R_{nl} από την τάση των πραγματικών υδρατμών (e_a) που επικρατούν πάνω από αυτές.

Οι τιμές εκτίμησης της ET_c στον πειραματικό αγρό (AUA) δύναται να θεωρηθούν πολύ παραπλήσιες με εκείνες τις τιμές εξατμισοδιαπνοής αναφοράς ET_o που λαμβάνονται από γρασίδι αναφοράς ύψους 8 cm, καθώς ο συντελεστής καλλιέργειας K_c των φυτών της πατάτας στο μέγιστο στάδιο ανάπτυξης λαμβάνει περίπου την τιμή 1, δηλαδή $ET_c/ET_o \cong 1$ (Kashyap and Panda, 2001). Συνεπώς οι μέγιστες τιμές που λαμβάνονται από την καλλιέργεια στον πειραματικό αγρό δύναται να αποδώσουν επαρκώς τις τιμές εξατμισοδιαπνοής που λαμβάνονται πάνω από μια πρότυπη επιφάνεια γρασιδιού ύψους 8-12 cm κάτω από συνθήκες πλήρους επάρκειας νερού (δυναμικός ρυθμός απώλειας νερού).

Παράλληλα χρησιμοποιήθηκε και εκτιμήθηκε ο ρυθμός εξατμισοδιαπνοής (ET_o) της μεθόδου Hargreaves, (Hargreaves & Samani, 1985) ώστε να διαπιστωθούν οι διαφορές που θα προέκυπταν σε σχέση με την χρήση της μεθόδου FAO-56 PM στην περίπτωση που η έλλειψη δεδομένων καθιστούσε αδύνατη τη χρήση της προτεινόμενης πρότυπης μεθόδου. Η μέθοδος αυτή όπως εναλλακτικά προτείνεται από την ASCE μπορεί να δοθεί από την σχέση [3], συναρτήσει της διαφοράς μέγιστης και ελάχιστης ημερήσιας θερμοκρασίας, της μέσης ημερήσιας θερμοκρασίας και της ακτινοβολίας στο εξωτερικό της ατμόσφαιρας R_a . Απαιτείται μόνο το γεωγραφικό πλάτος για την εκτίμηση των ημερήσιων τιμών της. Η R_a εισάγεται στη σχέση σε mm^1 :

$$ET_o \text{ (mm/d)} = 0.0023 \cdot (T_{avg} + 17.8) (T_{max} - T_{min}) R_a \quad [3]$$

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΣΥΖΗΤΗΣΗ

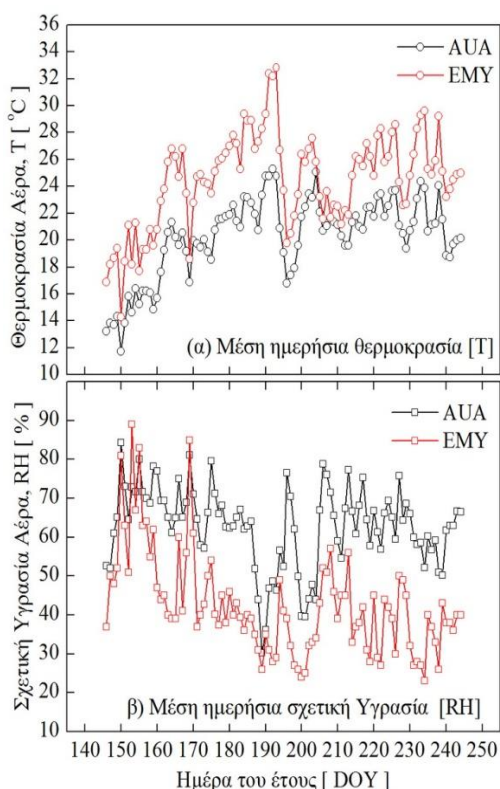
3.1 Συγκριτική ανάλυση των παρατηρήσεων

Στην εργασία αυτή επιχειρείται μια συγκριτική και αναλυτική αξιολόγηση των πρωτογενών δεδομένων που συμμετέχουν στις μεθόδους εκτίμησης ET_o που εκφράζονται από τις εξισώσεις [1] και [2] για τα δύο υπόβαθρα επιφανείας που χαρακτηρίζουν τους δύο μετεωρολογικούς σταθμούς. Επιπλέον γίνεται διερεύνηση κατά πόσο ο αεροδυναμικός (αδιαβατικός) όρος της εξίσωσης

¹ Η έκφραση της ακτινοβολίας R_a σε ισοδύναμο ύψους νερού (mm) αποδίδεται με την εισαγωγή της λανθάνουσας ενέργειας εξάτμισης (λ) μέσω της σχέσης:

$1mm/day = 0.408 MJ/m^2/day$ (at 20°C)

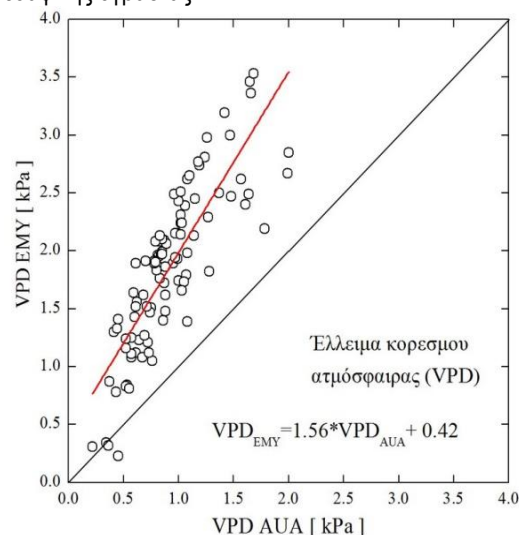
Penman-Monteith, διαφοροποιείται κάτω από την επίδραση των διαφορετικών χαρακτηριστικών των δύο επιφανειών.



Εικόνα 3. Συγκριτική απεικόνιση (EMY vs AUA) της (α) μεταβολής της μέσης ημερήσιας θερμοκρασίας και (β) της μέσης σχετικής υγρασίας από τις 26/05 έως και 01/09 για το έτος 2004.

Στην Εικ. 3α & 3β αποτυπώνεται η επίδραση της εδαφικής υγρασίας και της βλάστησης στις δύο βασικές παραμέτρους που χαρακτηρίζουν το μικροκλίμα μιας περιοχής (Θερμοκρασία και σχετική υγρασία). Τα μεγάλα ποσά λανθάνουσας ενέργειας που δαπανώνται για τη εξάτμιση ή/και διαπνοή μιας επιφάνειας που εξατμίζει με δυναμικό ρυθμό κατά ένα σημαντικό ποσοστό λαμβάνονται από την αισθητή θερμότητα της ατμόσφαιρας (αδιαβατική διαδικασία). Αυτή η φυσική διαδικασία είναι και η αιτία που διαμορφώνει τις συνθήκες που επικρατούν στο υπερκείμενο οριακό στρώμα. Στην αντίθετη περίπτωση η έλλειψη εδαφικής υγρασίας (περίπτωση γυμνού εδάφους, EMY) δημιουργεί ξερικές συνθήκες στην υπερκείμενη οριακή στρώση, με αποτέλεσμα η ενέργεια που δεν δαπανάται για εξάτμιση και διαπνοή να αποδίδεται ως επιπλέον θερμότητα με την εδαφική ροή G, στο υπερκείμενο στρώμα της ατμόσφαιρας. Αυτό διαφοροποιεί έντονα το θερμικό ισοζύγιο του 24ωρου επηρεάζοντας και το επόμενο διαδοχικά 24ωρο. Γίνεται ιδιαίτερα έντονο σε διαστήματα θερμών περιόδων και αποτυπώνεται στο ημερήσιο θερμοκρασιακό εύρος DTR (Diurnal Temperature Range). Η μέση αύξηση της θερμοκρασίας των 4,3 °C και η ελάττωση της μέσης σχετικής υγρασίας κατά 20,2% που παρατηρήθηκε από την 25^η Μαΐου έως και την 1^η Σεπτεμβρίου (99 ημέρες) στον σταθμό της EMY σε σχέση με τον

σταθμό του ΓΠΑ (AUA), οδηγεί σε τεράστια σφάλματα στον υπολογισμό της ET_0 με αποτέλεσμα την υπερεκτίμηση της ET_0 . Στην Εικ.4 διαπιστώνεται με χαρακτηριστικό τρόπο το “εικονικό” έλλειμμα κορεσμού της ατμόσφαιρας (VPD) που διαμορφώνεται πάνω από την επιφάνεια του γυμνού εδάφους συγκριτικά με μια επιφάνεια βλάστησης υπό πλήρη επάρκεια εδαφικής υγρασίας και η οποία διαπνέει με μέγιστο ρυθμό. Η σχέση απεικονίζει μια υποθετική ζήτηση της ατμόσφαιρας σε νερό, που φθάνει σχεδόν στο διπλάσιο σε σχέση με αυτή που απαιτείται από μια χαμηλή βλάστηση με επάρκεια εδαφικής υγρασίας.

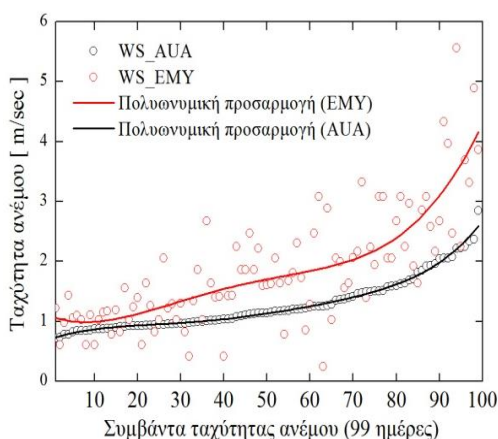


Εικόνα 4. Γραμμική παλινδρόμηση των ημερήσιων τιμών του ελλείμματος κορεσμού της ατμόσφαιρας στο σταθμό AUA σε σχέση με το σταθμό της EMY. ($R^2=0,70$)

Επίσης τα διαφορετικά αεροδυναμικά στοιχεία που συνθέτουν τις δύο επιφάνειες (ύψος τραχύτητας στη μεταφορά της ορμής, το διαφορετικό ύψος μηδενισμού της ταχύτητας), που εκφράζονται με τον όρο της αεροδυναμικής αντίστασης, διαφοροποιούν το μέτρο της ταχύτητας του ανέμου, το οποίο λαμβάνεται τυπικά στα 2m πάνω από την επιφάνεια του εδάφους. Σε αυτή την διαφοροποίηση του μέτρου της ταχύτητας, συμβάλει επίσης και η διαφορετική ζώνη επιρροής (fetch) της κάθε θέσης εγκατάστασης του σταθμού με τα περιβάλλοντα φυσικά και τεχνητά χαρακτηριστικά που την συνθέτουν (εμπόδια, απόσταση δένδρων, κτιρίων, κ.λπ.). Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να επισημανθεί ότι στην εργασία αυτή δεν εξετάζονται τα τυχόν σφάλματα που προέρχονται από τα πρωτόκολλα μετρήσεων και το τύπο των σταθμών και τα οποία θα μπορούσαν να έχουν μια προσθετική επίδραση στις λαμβανόμενες τιμές της ET_0 . Στην Εικ.5, παρουσιάζεται η διαφορά του μέτρου της μέσης ημερήσιας ταχύτητας του ανέμου (m/sec), ταξινομούμενη (αυξανόμενη) ως προς την τιμή της ταχύτητας του σταθμού AUA σε σύγκριση με την αντίστοιχη τιμή του σταθμού EMY. Η συγκριτική αυτή παρουσίαση απεικονίζει τα αντίστοιχα γεγονότα ως μεγέθη για όλες τις ημερήσιες μέσες τιμές, ανεξαρτήτως της ημέρας που παρατηρήθηκαν.

Συνοπτικά στο πίνακα που ακολουθεί αποτυπώνονται οι μέσες παρατηρούμενες τιμές των δύο θέσεων για όλη την θερινή περίοδο (25/05/04 - 01/09/04). Η διαφορά που προκύπτει στην ροή καθαρής ακτινοβολίας R_n οφείλεται στις διαφορετικές τιμές του albedo και της πραγματικής τάσης των υδρατμών που εισάγονται στις εμπειρικές εξισώσεις στην διαδικασία υπολογισμού της R_n από την μικρού μήκους ολικής εισερχόμενης ακτινοβολίας R_s , (Allen et al., 1998):

Παράμετρος	AUA	EMY	Μονάδα
T_{avg}	20.27	24.53	[°C]
RH_{avg}	62.83	42.60	%]
U_2	1.28	1.85	[m/sec]
R_n	14.18	16.99	[MJ/m ² day]
VPD	0.92	1.86	[kPa]

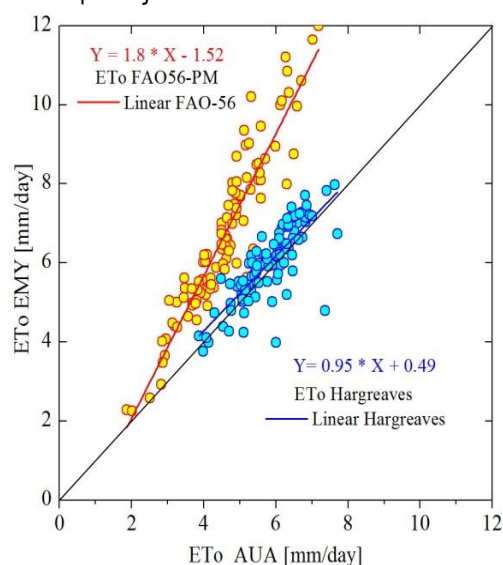


Εικόνα 5. Πολυωνυμική προσαρμογή των ταχυτήτων του ανέμου (ταξινομούμενων) στα δύο υπόβαθρα EMY και AUA.

3.2. Συγκριτική αξιολόγηση των τιμών ET_o

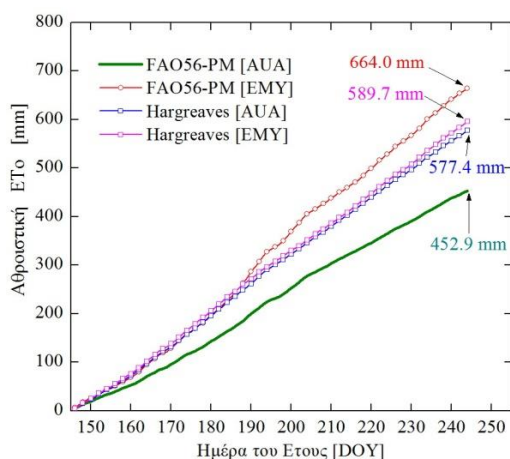
Η γειννίαση της πειραματικής θέσης AUA με ένα κλιματικό σταθμό της EMY που ανήκει στο παγκόσμιο δίκτυο WMO, καθώς οι επαρκείς μετρήσεις του αυτόματου μετεωρολογικού σταθμού AUA πάνω από χαμηλή αρδευόμενη βλάστηση έδωσε την ευκαιρία να διερευνηθεί η επίδραση του υποβάθρου στις εκτιμήσεις της ET_o σε ένα περιορισμένο χωρικά μικροκλιματικό καθεστώς. Με τις εξισώσεις [1] και [2] εκτιμήθηκαν οι ημερήσιες τιμές εξατμισοδιαπνοής αναφοράς ET_o σύμφωνα με τις προϋποθέσεις που ήδη έχουν συζητηθεί παραπάνω. Στην εικόνα 6, αποτυπώνεται καθαρά η υπερεκτίμηση των τιμών ET_o που λαμβάνονται πάνω από ένα ξηρό περιβάλλον χωρίς επάρκεια εδαφικής υγρασίας. Αυτή η αποτύπωση, διαπιστώνεται από την πρώτη γραμμική παλινδρόμηση (κόκκινη γραμμή τάσης) των τιμών ET_o που προέκυψαν από την χρήση της μέθοδου FAO56-PM, όπου παρουσιάζεται μια συστηματική υπερεκτίμηση (κλίση 1,8 με $R^2 = 0,88$) των τιμών που προέρχονται από δεδομένα της ξηρής επιφάνειας σε σχέση με εκείνες που λαμβάνονται από αρδευόμενη χαμηλή βλάστηση. Η τυπική εφαρμογή των συνιστώμενων μεθοδολογιών (Allen et al., 1998) δεν θα έδινε τιμές ρυθμού

εξατμισοδιαπνοής που θα υπερέβαιναν τα 8,5 mm/day σε περιοχές με μέσα μεσογειακά γεωγραφικά πλάτη, ακόμα και κάτω από ακραίες συνθήκες θερμοκρασίας και ακτινοβολίας (Αλεξανδρής, 2003; Alexandris et al., 2006). Σε αντίθεση, η γραμμική συσχέτιση (μπλε γραμμή τάσης) που προκύπτει από τις αντίστοιχες εκτιμήσεις της ET_o με χρήση της μεθόδου Hargreaves, έδωσε μια πολύ καλή προσέγγιση μεταξύ των τιμών AUA και EMY, παρά την σχετικά μεγάλη παρατηρούμενη διασπορά μεταξύ των εκτιμήσεων ($R^2 = 0,65$) από τις δύο επιφάνειες.



Εικόνα 6. Γραμμική συσχέτιση των εκτιμώμενων τιμών ET_o της πειραματικής θέσης AUA σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές της EMY α) με την μέθοδο FAO56-PM ($R^2=0,88$) και β) με την μέθοδο Hargreaves ($R^2=0,65$).

Η κλίση 0,95 της γραμμής συσχέτισης δεικνύει ότι η μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία ως ένας από τους δύο παράγοντες που εισάγονται στη μέθοδο (δηλαδή το ημερήσιο εύρος θερμοκρασιακής διακύμανσης) δεν είναι δυνατόν να αποτυπώσει την διαφορετική φύση των δύο επιφανειών διότι πιθανά ο ρυθμός αλλαγής της αισθητής θερμότητας στην υπερκείμενη ατμόσφαιρα είναι πολύ χαμηλός από ημέρα σε ημέρα. Απότομες όμως αλλαγές στον δεύτερο παράγοντα (μέση ημερήσια θερμοκρασία) προκαλεί πιθανά την παρατηρούμενη διασπορά των εκτιμώμενων τιμών ET_o . Αυτό είναι εμφανές στις 3 ακραίες τιμές διασποράς (Εικ.6) σε σχέση με τις παρατηρούμενες μεγαλύτερες απότομες πτώσεις των ημερήσιων μέσων θερμοκρασιών της εικόνας 3α.



Εικόνα 7. Αθροιστική ET_0 25/05/2004 - 01/09/2004.

Στην εικόνα 7 εμφανίζεται η αθροιστική ET_0 για όλη την περίοδο των 99 ημερών (25/5 -1/9) όπως εκτιμήθηκε από τις δύο μεθόδους FAO56-PM και Hargreaves και για τις δύο επιφάνειες.

Η ευαισθησία της πρώτης μεθόδου η οποία εκφράζει το ενεργειακό ισοζύγιο μιας επιφάνειας σε συνδυασμό με την αεροδυναμική μεθοδολογία δικαιολογεί την συνολική διαφορά των 211 mm ET_0 μεταξύ των δύο επιφανειών για όλη συνολικά την αναφερόμενη περίοδο των 99 ημερών. Η μέθοδος Hargreaves στην ξηρή επιφάνεια (EMY) υπερεκτιμά κατά 139 mm σε σχέση με την FAO56-PM στην θέση AUA, ενώ δεν διαφοροποιείται σημαντικά από τις αντίστοιχες τιμές ET_0 Hargreaves (AUA) που λαμβάνονται στο ίδιο υπόβαθρο (125 mm).

Στο ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται οι υπερεκτιμήσεις σε mm/day και το ποσοστό τους σε σχέση με την πρότυπη μέθοδο FAO56-PM ET_0 (4,6 mm/day) στην θέση AUA για την συνολική περίοδο 21 Μαΐου έως και 1 Σεπτεμβρίου του 2004:

Θέση Μέθοδος	Μέση τιμή mm/day	Υπερεκτίμηση (+) mm	Υπερεκτίμηση (+) %
AUA/FAO56-PM	4.6	-	-
AUA/Hargreaves	5.8	1.3	27.5
EMY/FAO56-PM	6.7	2.1	46.6
EMY/Hargreaves	6.0	1.4	31.5

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αν και η εργασία των Allen et al. (1998) αριθμεί πάνω από 9000 ετεροαναφορές σε διεθνή περιοδικά, ο αριθμός των επιστημόνων που επισημαίνουν τη σπουδαιότητα και τη σημασία της καλλιέργειας αναφοράς με επάρκεια νερού, είναι αρκετά περιορισμένος. Η εργασία αυτή επισημαίνει ως κύριο συμπέρασμα ότι η χρήση εκτιμήσεων της ET_0 από μη τυποποιημένες επιφάνειες αναφοράς επαρκώς εφοδιαζόμενες με νερό μπορεί να οδηγήσει σε υπερεκτίμηση των υδατικών αναγκών που υπερβαίνει τα 2,5 χιλιάδες m^3 νερού ανά εκτάριο για μια καλλιεργητική περίοδο 120 ημερών. Έχει δημιουργηθεί η ψευδής εντύπωση ότι η επάρκεια των παραμέτρων για την χρήση της συνιστώμενης μεθόδου FAO56-PM θα δώσει και ακριβείς

εκτιμήσεις για τον προγραμματισμό άρδευσης. Οι εκτιμήσεις ET_0 με την μέθοδο Hargreaves, ελαχιστοποιούν τα σφάλματα κατά 15%, στην περίπτωση που οι μετρήσεις δεν λαμβάνονται από σταθμό με τυποποιημένη καλλιέργεια αναφοράς. Επίσης θα πρέπει να επισημανθεί ότι υπερεκτιμήσεις της ET_0 οδηγούν σε υπεράντληση αρδευτικού νερού και σπατάλη ηλεκτρικής ενέργειας, με συνέπεια την υποβάθμιση της ποιότητας των υπογείων υδάτων αλλά αντίστοιχα και την αύξηση κόστους παραγωγής.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς ευχαριστούν θερμά την Διοίκηση και το επιστημονικό προσωπικό της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας, που με προθυμία χορήγησαν όλα τα απαραίτητα στοιχεία και υλικό, για την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας.

6.ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Alexandris S., Kerkides P., Liakatas A. (2006). Daily reference evapotranspiration estimates by the "Copais" approach. *Agricultural water Management*, Vol.82, Issue 3, 24 I, pp. 371-386.
- Allen R.G., 1996. Assessing Integrity of Weather Data for Reference Evapotranspiration Estimation. *J. of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 122, No. 2, pp. 97-106, Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. *Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. United Nations Food and Agriculture Organization, Irrigation and Drainage Paper 56. Rome, Italy, 300 pp.
- Allen, G.R., 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, Italy, 78-86.
- Allen, R.G., W.O. Pruitt, J.L. Wright, T.A. Howell, F. Ventura, R. Snyder, D. Itenfisu, P. Steduto, J. Berengena, J.B. Yrisarry, M. Smith, L.S. Pereira, D. Raes, A. Perrier, I. Alves, I. Walter, and R. Elliott. 2006. A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ET_0 by the FAO56 Penman-Monteith method. *Agric. Water Manage.* 81:1–22.
- ASCE-EWRI, 2005. The ASCE Standardized Reference Evapotranspiration Equation. Technical Committee report to the Environmental and Water Resources Institute of the American Society of Civil Engineers from the Task Committee on Standardization of Reference Evapotranspiration. ASCE-EWRI, 1801 Alexander Bell Drive, Reston, VA 20191-4400, 173 pp.
- Hargreaves, G.H., & Samani, Z.A. (1985). Reference crop evapotranspiration from ambient air temperature. Paper No. 85-2517. American society of agricultural engineers. Chicago, IL.
- Kashyap P.S., R.K. Panda, 2001. Evaluation of evapotranspiration estimation methods and development of crop-coefficients for potato crop in a sub-humid region. *Agricultural Water Management*, 50 (1):9-25

- WMO, 2008. WMO Guide To Meteorological Instruments And Methods Of Observation. Part I, Chapter 2. 7th edition.
- Yoder, R.E., T.W. Ley and R.L. Elliott. 2000. Measurement and reporting practices for automatic agricultural weather stations. Proceedings of the 4th National Irrigation Symposium, ASAE, St. Joseph, MI
- Αλεξανδρής Σ., 2003. “Συγκριτική αξιολόγηση μεθόδων εξατμισοδιαπνοής κάτω από Ελληνικές συνθήκες”. Διδακτορική Διατριβή, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών.
- Προύτσος Ν., Α. Λιακατάς, Α. Κοτρώζου και Σ. Αλεξανδρής, 2009. Μικρομετεωρολογικές συνθήκες και υδατοδιαθεσιμότητα για πατατοπαραγωγή στην Αρκαδία. Πρακτικά 6ου Πανελληνίου Συνεδρίου Γεωργικής Μηχανικής, σελ. 115-122. Θεσσαλονίκη, 8-10/9/2009.

ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ ΕΔΑΦΙΚΟΥ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΑΓΡΟΧΗΜΙΚΩΝ ΣΕ ΚΑΛΛΙΕΡΓΗΜΕΝΟ ΕΔΑΦΟΣ ΜΕ ΕΝΑ ΜΟΝΤΕΛΟ ΔΙΠΛΗΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ

Βασίλειος Αντωνόπουλος¹, Δωροθέα Γιαννούλη² και Πανταζής Γεωργίου³

Τομέας Εγγείων Βελτιώσεων, Εδαφολογίας και Γεωργικής Μηχανικής, Γεωπονική Σχολή, Αριστοτέλειο

Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 54124 Θεσσαλονίκη

¹vasanton@agro.auth.gr, ²dorothgd@agro.auth.gr, ³pantaz@agro.auth.gr

Στην εργασία περιγράφεται και αξιολογείται η προσομοίωση της δυναμικής του εδαφικού νερού και ενός ζιζανιοκτόνου, σε αρδευόμενο αγρό της Σίνδου όπου καλλιεργείται καλαμπόκι. Στην προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε το μαθηματικό μοντέλο MACRO, ένα μονοδιάστατο μοντέλο διπλής διαπερατότητας που περιγράφει την κίνηση του νερού, τη θερμοκρασία του εδάφους καθώς και τη μεταφορά και τους μετασχηματισμούς των ουσιών στο έδαφος, λαμβάνοντας υπόψη την επιλεκτική ροή. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τις μετρημένες τιμές της περιεχόμενης εδαφικής υγρασίας σε συγκεκριμένα εδαφικά βάθη και αξιολογούνται με στατιστικά κριτήρια. Γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων από την εφαρμογή του μοντέλου με ή χωρίς ροή από τους μακροπόρους. Η έλλειψη δεδομένων για την ουσία του φυτοφαρμάκου στο έδαφος και η αβεβαιότητα εκτίμησης των παραμέτρων αντιμετωπίζονται με ανάλυση ευαισθησίας. Η οριακή τιμή του ύψους πίεσης και η σταθερά αποικοδόμησης της ουσίας, αποδείχθηκαν πιο σημαντικές.

Λέξεις κλειδιά: MACRO, επιλεκτική ροή, ζιζανιοκτόνο, έκπλυση, τερμπουθλαζίνη

SOIL WATER AND AGROCHEMICAL SIMULATION IN A CULTIVATED AREA USING A DUAL PERMEABILITY MODEL

Vassilis Antonopoulos¹, Dorothea Giannouli² and Pantazis Georgiou³

Department of Hydraulics, Soil Science and Agricultural Engineering, School of Agriculture,

Aristotle University of Thessaloniki, 54124 Thessaloniki

¹vasanton@agro.auth.gr, ²dorothgd@agro.auth.gr, ³pantaz@agro.auth.gr

The present study describes and evaluates the simulation of the dynamics of soil water and dissolved pesticides of an irrigated area near Sindos, planted with corn. The simulation took place with the mathematical model MACRO, a one-dimensional dual permeability model that describes the movement of soil water, temperature, and the transport and transformations of substances in soil, considering preferential flow. The results of the simulation are compared to the measured values of the soil moisture in specific depths, using statistical criteria. Moreover, the results obtained from the application of the model, due to preferential flow, are compared to the ones obtained without taking in mind the flow through macropores. The lack of pesticide measurements and the uncertainty of estimating model parameters are confronted by executing a sensitivity analysis. The pressure head at the boundary of macro- to microporosity and the degradation coefficient were the most sensitive.

Key words: MACRO, preferential flow, herbicide, leaching, terbutylazine

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η γεωργία είναι η σημαντικότερη πηγή υπολειμμάτων φυτοφαρμάκων στο έδαφος και τα υπόγεια νερά. Στα εδάφη με διαμορφωμένη δομή, το νερό κινείται ταχύτερα μέσω των μακροπόρων με αποτέλεσμα να παρακάμπτεται το μεγαλύτερο μέρος της εδαφικής φάσης. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται "επιλεκτική ροή". Συνυφασμένο με το φαινόμενο αυτό είναι το γεγονός ότι το ταχέως κινούμενο προς τα βαθύτερα εδαφικά στρώματα νερό, δεν έχει στη διάθεσή του τον απαιτούμενο χρόνο να αλληλεπιδράσει πλήρως με τις βιολογικά και χημικά ενεργές ανώτερες στρώσεις του εδάφους, με αποτέλεσμα τη μεταφορά ουσιών σε βάθη που δεν είναι αναμενόμενα, με βάση την κλασική θεώρηση της εξίσωσης του Darcy και την ημιπερίοδο ζωής των ουσιών (Simunek et al., 2003).

Η εκτίμηση της επικινδυνότητας ρύπανσης των υπογείων νερών από την έκπλυση αγροχημικών και άλλων φυτοπροστατευτικών ουσιών, γίνεται με τη χρήση μαθηματικών μοντέλων, συστημάτων GIS και άλλων τεχνικών (δείκτες, γεωστατιστική, κτλ). Τα μαθηματικά μοντέλα χρησιμοποιούνται ευρέως λόγω

της ευκολίας στην εκτέλεσή τους, αλλά και της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων τους (Knisel, 1993, Li et al., 1999; Tiktak et al., 2000; Antonopoulos, 2001; Ma et al., 2004). Ένα μοντέλο διπλής διαπερατότητας, πολύ δημοφιλές, είναι το MACRO (Larsbo and Jarvis, 2003). Το MACRO έχει χρησιμοποιηθεί σε πλήθος εργασιών (Gardenas et al., 2006; Van Daele et al., 2007; Antonopoulos et al., 2013) γιατί η δομή του είναι απλή και κατανοητή, έχει τη δυνατότητα να εκτελεί τις προσομοιώσεις τόσο ως μοντέλο απλού όσο και διπλού πορώδους και κυρίως, απαιτεί μόνο λίγες και εύκολα μετρήσιμες παραμέτρους για την εφαρμογή του.

Στην εργασία γίνεται εφαρμογή του MACRO υπό τις συνθήκες της βλαστικής περιόδου του καλαμποκιού του έτους 1996 σε αγρό της περιοχής της Θεσσαλονίκης. Πραγματοποιείται ρύθμιση του μοντέλου με τις μετρημένες τιμές εδαφικής υγρασίας και εφαρμογή του, ώστε να προσομοιωθούν οι διαδικασίες της επιλεκτικής ροής. Ο σκοπός της εργασίας είναι: (α) η επαλήθευση της δυνατότητας του μοντέλου να περιγράφει τη διακύμανση της εδαφικής υγρασίας, (β) η μελέτη της επιλεκτικής ροής και του ισοζυγίου του νερού στο

καλλιεργούμενο έδαφος και (γ) η μελέτη των διακυμάνσεων και των υπολειμμάτων στο έδαφος ενός κοινού ζιζανιοκτόνου για το καλαμπόκι.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1 Περιγραφή του μοντέλου MACRO

Το μαθηματικό μοντέλο MACRO είναι ένα μονοδιάστατο ως προς την κατακόρυφο μοντέλο, που περιγράφει τη ροή του νερού, τη μεταβολή της θερμοκρασίας και τη μεταφορά και το μετασχηματισμό των φυτοπροστατευτικών ουσιών στο έδαφος, συνυπολογίζοντας την επιλεκτική ροή. Το μοντέλο είναι διπλής διαπερατότητας, όπου το πορώδες διακρίνεται σε δύο περιοχές (μικροπόρους και μακροπόρους), καθεμία από τις οποίες χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένο βαθμό κορεσμού, αγωγιμότητας και κίνησης του νερού, αλλά και συγκέντρωσης και ροής της ουσίας στο έδαφος (Larsbo and Jarvis, 2003). Το όριο μεταξύ μακροπορώδους και μικροπορώδους ορίζεται από τις οριακές τιμές του δυναμικού πίεσης ψ_b και της αντίστοιχης υγρασίας θ_b . Στη συνέχεια παρουσιάζεται μια σύντομη περιγραφή των βασικών εξισώσεων κίνησης του νερού στο έδαφος καθώς πλήρη περιγραφή του μοντέλου δίνεται από τους Larsbo and Jarvis (2003).

Η κίνηση του εδαφικού νερού στους μικροπόρους ως προς την κατακόρυφη διεύθυνση περιγράφεται από την εξίσωση του Richards (Αντωνόπουλος, 1999) που έχει τη μορφή:

$$C \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right) - \sum S_i \quad (1)$$

όπου ψ είναι το ύψος πίεσης, $C = \partial \theta / \partial \psi$ η υδραυλική χωρητικότητα του εδάφους (cm^{-1}), t ο χρόνος (sec), z το βάθος (cm), K η ακόρεστη υδραυλική αγωγιμότητα (cm s^{-1}) και $\sum S_i$ το άθροισμα των απωλειών-εισροών του εδαφικού νερού (s^{-1}), ως αποτέλεσμα της ανταλλαγής του με το μακροπορώδες, τη στράγγιση και την πρόσληψη εδαφικού νερού από τις ρίζες. Η κίνηση του νερού στους μακροπόρους περιγράφεται με μία ανάλογη εξίσωση, αγνοώντας τις τριχοειδείς δυνάμεις στους μακροπόρους ώστε η κίνηση του νερού να γίνεται αποκλειστικά από τη βαρύτητα. Η εξίσωση αυτή έχει τη μορφή:

$$\frac{\partial \theta_{ma}}{\partial t} = \frac{\partial K_{ma}}{\partial z} - \sum S_i \quad (2)$$

όπου θ_{ma} ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) και K_{ma} (cm s^{-1}) είναι η περιεχόμενη υγρασία κατ'όγκο και η υδραυλική αγωγιμότητα στους μακροπόρους αντίστοιχα. Αφού το K_{ma} είναι συνάρτηση του θ_{ma} , η προσέγγιση που περιγράφει την κίνηση του νερού στους μακροπόρους ισοδυναμεί με την προσέγγιση του κινηματικού κύματος, όπως περιγράφεται από τις εξισώσεις του Germann (1985). Η ανταλλαγή νερού ανάμεσα στις δύο φάσεις γίνεται με βάση την κλίση της υγρασίας (από μακρο σε μικροπορώδες). Η χαρακτηριστική καμπύλη του εδαφικού νερού στους μικροπόρους δίνεται από την τροποποιημένη εξίσωση του van Genuchten (1980):

$$S = \frac{\theta_{mi} - \theta_r}{\theta_s^* - \theta_r} = (1 + (a_{vg} \psi)^{n_{vg}})^{-m_{vg}} \quad (3)$$

όπου S είναι ο αποτελεσματικός βαθμός κορεσμού της εδαφικής υγρασίας, m_{vg} , n_{vg} και a_{vg} οι παράμετροι της εξίσωσης van Genuchten με $m_{vg} = 1 - 1/n_{vg}$, θ_r είναι η υπολειμματική εδαφική υγρασία ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)

και θ_s^* μια "φαινομενική" κορεσμένη εδαφική υγρασία ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) που αποκτάται με προσαρμογή της εξίσωσης (3) στα δεδομένα της χαρακτηριστικής καμπύλης συγκράτησης για δυναμικά μικρότερα του ψ_b .

Για τον υπολογισμό του υδατικού ισοζυγίου, είναι απαραίτητη η εισαγωγή της βροχόπτωσης και της άρδευσης, των μετεωρολογικών δεδομένων της περιοχής μελέτης, και της δυναμικής εξατμισοδιαπνοής η οποία υπολογίζεται είτε από το χρήστη, είτε από το μοντέλο με τη συνδυασμένη μέθοδο Penman- Monteith. Η πρόληψη νερού από το ριζικό σύστημα των φυτών υπολογίζεται με βάση τη ζήτηση για διαπνοή, την κατανομή των ριζών και τη διαθέσιμη εδαφική υγρασία χρησιμοποιώντας την απλή εμπειρική συνάρτηση απώλειας του Jarvis (1989), ενώ το νερό αποσπάται επιλεκτικά από τους μακροπόρους. Αν η διαφορά της καθαρής βροχόπτωσης R από την εξάτμιση από το έδαφος E_s είναι μικρότερη από την επιφανειακή διηθητικότητα I_{max} , τότε η πάνω οριακή συνθήκη είναι γνωστή ροής (συνθήκη Neumann), διαφορετικά δίνεται από μία γνωστή τιμή (συνθήκη Dirichlet), ενώ η κάτω οριακή συνθήκη επιλέγεται ανάλογα με την περίπτωση.

Η μεταφορά ουσιών στους μικροπόρους περιγράφεται με την εξίσωση μετακίνησης-διασποράς

$$\frac{\partial (c \theta_{mi(m)} + (1-f-f_{ne}) \gamma s)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D \theta_{mi(m)} \frac{\partial c}{\partial z} - qc \right) - \sum U_i \quad (4)$$

όπου c είναι η συγκέντρωση της ουσίας στην υγρή φάση (mg cm^{-3}), s η προσροφημένη συγκέντρωση της ουσίας στα στερεά του εδάφους (mg mg^{-1}), γ είναι η φαινομένη πυκνότητα του εδάφους, f το κλάσμα της μάζας των εδαφικών τεμαχιδίων που βρίσκεται σε επαφή με το νερό στους μακροπόρους, f_{ne} το κλάσμα των εδαφικών τεμαχιδίων που παρέχουν θέσεις για προσρόφηση ουσιών σε κατάσταση αστάθειας, $\theta_{mi(m)}$ το κινούμενο εδαφικό νερό ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), q η παροχή του νερού (cm s^{-1}) και D ο συντελεστής διασποράς ($\text{cm}^2 \text{ s}^{-1}$). Ο όρος $\sum U_i$ περιγράφει το άθροισμα των απωλειών-εισροών του συστήματος ($\text{mg cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$), δηλαδή την ανταλλαγή μάζας μεταξύ μικρο/μακροπορώδους, την κινητική προσρόφηση, την πρόσληψη των ουσιών από τα φυτά, πλευρικές απώλειες έκπλυσης προς τα αυλάκια ή τους υπόγειους υδροφορείς και τη βιοαποικοδόμηση.

Μια εξίσωση αντίστοιχη της (4) περιγράφει τη μεταφορά μάζας στο μακροπορώδες, στην οποία δεν περιλαμβάνονται η διασπορά και η κινητική προσρόφηση επειδή θεωρούνται μηδενικές (D και f_{ne} είναι μηδέν). Η προσρόφηση στην κατάσταση ισορροπίας περιγράφεται από τη μη γραμμική ισόθερμη του Freundlich:

$$S = k_f c^m \quad (5)$$

όπου k_f είναι η σταθερά προσρόφησης και m είναι ο εκθέτης Freundlich.

Ο υπολογισμός των ρυθμών αποικοδόμησης για καθεμία από τις τέσσερις περιπτώσεις (υγρή ή στερεή προσρόφηση σε μικρο/μακροπορώδες) γίνεται με πρώτης τάξης κινητικές αντιδράσεις. Κάθε περίπτωση χαρακτηρίζεται από διαφορετικό ρυθμό αποικοδόμησης μ_{ref} . Οι πραγματικοί ρυθμοί αποικοδόμησης στο πεδίο εκτιμώνται με εργαστηριακά δεδομένα αναφοράς, και

είναι συνάρτηση της υγρασίας (F_w) και θερμοκρασίας (F_t) του αγρού (Boesten and Van der Linden, 1991):

$$\mu = \mu_{ref} F_w F_t \quad (6)$$

Αν προσομοιώνεται στο μοντέλο ο μεταβολίτης ενός φυτοπροστατευτικού, η αποικοδομημένη μάζα του αρχικού φυτοφαρμάκου (ως συνάρτηση του βάθους και του χρόνου) χρησιμοποιείται σαν όρος προσθήκης στην εξίσωση (4), οπότε εφαρμόζεται στη μάζα αυτή ένας ορισμένος από τον χρήστη παράγοντας μετατροπής, ώστε να ληφθούν υπόψη αλλαγές στο μοριακό βάρος ή πρόσθετα παράλληλα με τις διαδικασίες μετασχηματισμού.

2.2 Πειραματικά δεδομένα

Το μαθηματικό μοντέλο MACRO εφαρμόστηκε με τα δεδομένα από ένα πειραματικό αγρό του Ινστιτούτου Εγγείων Βελτιώσεων στην περιοχή της Σίνδου (Antonopoulos, 2001). Σε τμήμα του αγρού έκτασης 0,2 ha καλλιεργήθηκε καλαμπόκι, η σπορά του οποίου έγινε στις 7/5 και η συγκομιδή του στις 9/10 του 1996. Λεπτομέρειες του πειραματικού και της συλλογής δεδομένων δίνονται στο άρθρο Antonopoulos (2001). Οι εδαφικές ιδιότητες, η φαινόμενη πυκνότητα ρ_b , ο % οργανικός άνθρακας OC και οι παράμετροι των υδραυλικών συναρτήσεων δίνονται στους Πίνακες 1 και 2 αντίστοιχα. Το έδαφος αποτελείται από δύο ορίζοντες και στην υφή του χαρακτηρίζεται ως αμμόδης πηλός (0-55 cm) και πηλώδης (55-120 cm). Η μέγιστη τιμή του δείκτη φυλλικής επιφάνειας είναι 4,6 και του ριζοστρώματος 1,05 m. Η βροχόπτωση για το διάστημα Μάιος-Νοέμβριος 1996 μετρήθηκε στα 148,3 mm, ενώ η ημερήσια δυναμική εξατμισοδιαπνοή υπολογίστηκε σύμφωνα με τη μέθοδο Penman (Doorenbos and Pruitt, 1977) και είναι ίση με 739,2mm.

Πίνακας 1. Ιδιότητες του εδάφους

Βάθος cm	Άμμος %	Ιλύς %	Άργιλος %	ρ_b gr/cm ³	OC %
0-30	50,6	30,7	18,7	1,588	1,73
30-55	44,6	28,7	26,7	1,555	0,35
55-80	59,6	25,7	14,7	1,516	0,22
80-120	70,6	19,7	10,7	1,498	0,07

Πίνακας 2. Υδραυλικές παράμετροι του εδάφους

Βάθος cm	θ_s cm ³ /cm ³	θ_r cm ³ /cm ³	α 1/cm	n	K_{sat} mm/hr
0-30	0,4006	0,02	0,0111	1,1290	0,3125
30-55	0,4132	0,05	0,0030	1,1149	1,1792
55-80	0,4281	0,02	0,0066	1,3003	3,3833
80-120	0,4455	0,01	0,1167	1,1621	3,3833

Αρδεύσεις πραγματοποιήθηκαν κατά το διάστημα 13/6 έως 3/9/1996 με συνολικό ύψος νερού 384,4 mm, ενώ στις 13/6 εφαρμόστηκε στον αγρό ζιζανιοκτόνο με δραστική ουσία την τερμπουθαζίνη (terbuthylazine) σε δοσολογία 190 gr/στρέμμα και με ρυθμό εφαρμογής 1 kg/ha. Οι φυσικοχημικές ιδιότητες της ουσίας δίνονται στον Πίνακα 3 (Behrendt and Bruggemann, 1992; Ma et al, 2004).

2.3 Έλεγχος των αποτελεσμάτων

Η προσομοίωση του εδαφικού νερού και της ουσίας έγινε για το χρονικό διάστημα 1/5 έως 27/11/1996. Η

Πίνακας 3. Φυσικοχημικές ιδιότητες Τερμπουθαζίνης

Μοριακή μάζα (g/mol)	229,5
Πίεση κορεσμού ατμών (Pa)	1,5x10 ⁻⁴
Διαλυτότητα στο νερό (mg/L)	8,5
Συντελεστής κατανομής προσρόφησης	2,59
K_f (cm ³ /g)	0,9
Εκθέτης Freundlich m	0,0182
Συντελεστής αποικοδόμησης μ_{ref} (day ⁻¹)	35
DT ₅₀ (days)	

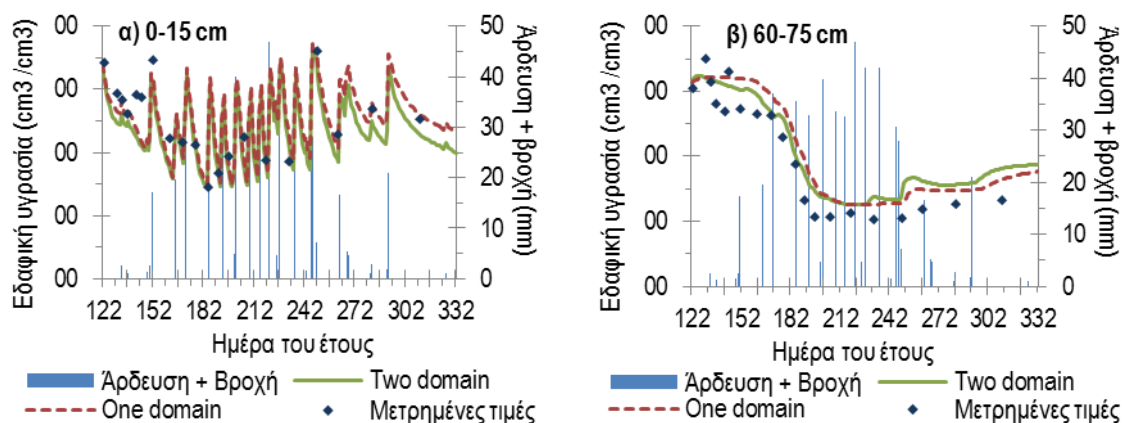
συμφωνία μεταξύ μετρημένων και υπολογισμένων τιμών εδαφικής υγρασίας ελέγχεται με την χρήση τριών στατιστικών κριτηρίων που προτάθηκαν από τους Loague & Green (1991) και τον Antonopoulos (2000, 2006) τα οποία είναι: α) το μέσο σφάλμα E (average error) (cm³ cm⁻³) με βέλτιστη τιμή μηδέν, β) το μέσο ανηγμένο τετραγωνικό σφάλμα RMSE (Root Mean Square Error) (%), το οποίο έχει ελάχιστη και συγχρόνως βέλτιστη τιμή το μηδέν και είναι αρκετά ευαίσθητο σε απομακρυσμένες τιμές και γ) ο συντελεστής ελλείμματος μάζας CRM (Coefficient of Residual Mass) ο οποίος κυμαίνεται από -∞ έως +∞, με βέλτιστη τιμή μηδέν. Όταν η τιμή του συντελεστή είναι θετική, συνεπάγεται ότι το μοντέλο δίνει υποεκτιμήσεις των μετρημένων τιμών, ενώ το αντίθετο ισχύει για τις αρνητικές τιμές του συντελεστή.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

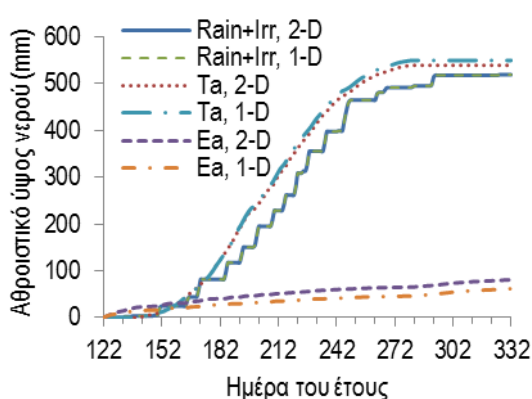
3.1 Αποτελέσματα εδαφικού νερού

Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται η διακύμανση της εδαφικής υγρασίας σε δύο στρώσεις του εδάφους (0-15 cm και 60-75 cm αντίστοιχα), όπως υπολογίστηκαν από το μοντέλο, θεωρώντας στην πρώτη περίπτωση ότι η ροή γίνεται ταυτόχρονα δια μέσου των μακροπόρων και των μικροπόρων (περίπτωση διπλού πορώδους), ενώ στη δεύτερη ότι το έδαφος είναι ομογενές, αγνοώντας τη ροή στους μακροπόρους και θεωρώντας ροή νερού μόνο δια μέσου του μικροπορώδους (περίπτωση απλού πορώδους). Οι παράμετροι άρδευση και βροχόπτωση, πραγματική διαπνοή και πραγματική εξάτμιση του υδατικού ισοζυγίου από την αρχή της προσομοίωσης και για τις δύο περιπτώσεις (διπλού και απλού πορώδους) απεικονίζονται στο Σχήμα 2. Η πραγματική διαπνοή που προκύπτει για το διπλό πορώδες είναι μικρότερη αυτής που προκύπτει για το απλό, ενώ το αντίθετο συμβαίνει για την πραγματική εξάτμιση.

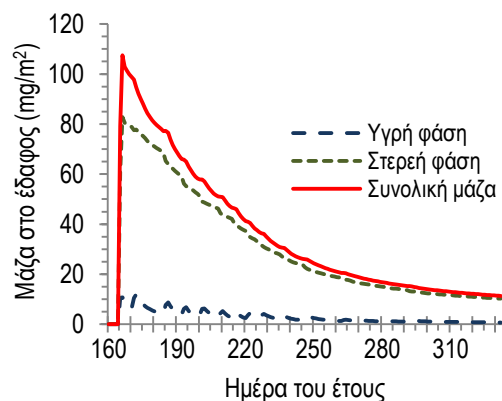
Τα στατιστικά κριτήρια για τις εφαρμογές του μοντέλου στον αγρό δίνονται στον Πίνακα 4. Σύμφωνα με αυτά, στην ανώτερη στρώση των 0-15 cm η περίπτωση του απλού πορώδους δίνει καλύτερες τιμές σε σχέση με αυτές του διπλού, ενώ στα 60-75 cm καλύτερες τιμές δίνει η περίπτωση διπλού πορώδους. Στην πρώτη στρώση υπάρχουν τόσο υποεκτιμήσεις όσο και υπερεκτιμήσεις των τιμών, ενώ στα 60-75 cm και οι δύο περιπτώσεις δίνουν υπερεκτιμημένες τιμές εδαφικής υγρασίας σε σχέση με τις μετρημένες. Κατά μέση τιμή για όλες τις στρώσεις και οι δύο περιπτώσεις δίνουν υπερεκτιμημένες τιμές, ενώ καλύτερες προκύπτουν στην περίπτωση του διπλού πορώδους.



Σχήμα 1. Σύγκριση των υπολογισμένων με τις μετρημένες τιμές εδαφικής υγρασίας των εδαφικών στρώσεων στα α) 0-15 cm και β) 60-75 cm με την παραδοχή του μοντέλου MACRO να περιγράφει ροή σε διπλό και απλό πορώδες



Σχήμα 2: Συνιστώσες του υδατικού ισοζυγίου για την περίοδο 1/5-27/11/1996



Σχήμα 3: Μεταβολή της συγκέντρωσης της ουσίας στους μικροπόρους έως το τέλος της προσομοίωσης

Πίνακας 4. Στατιστικά κριτήρια

Two domain			
Βάθος (cm)	E	RMSE	CRM
7,5	-0,014	22,328	0,056
22,5	0,012	12,796	-0,055
67,5	0,023	15,382	-0,112
97,5	0,014	21,533	-0,063
Average	0,009	18,009	-0,043
One domain			
Βάθος (cm)	E	RMSE	CRM
7,5	0,002	22,620	-0,008
22,5	0,021	15,155	-0,093
67,5	0,028	16,676	-0,135
97,5	0,016	25,268	-0,074
Average	0,017	19,930	-0,078

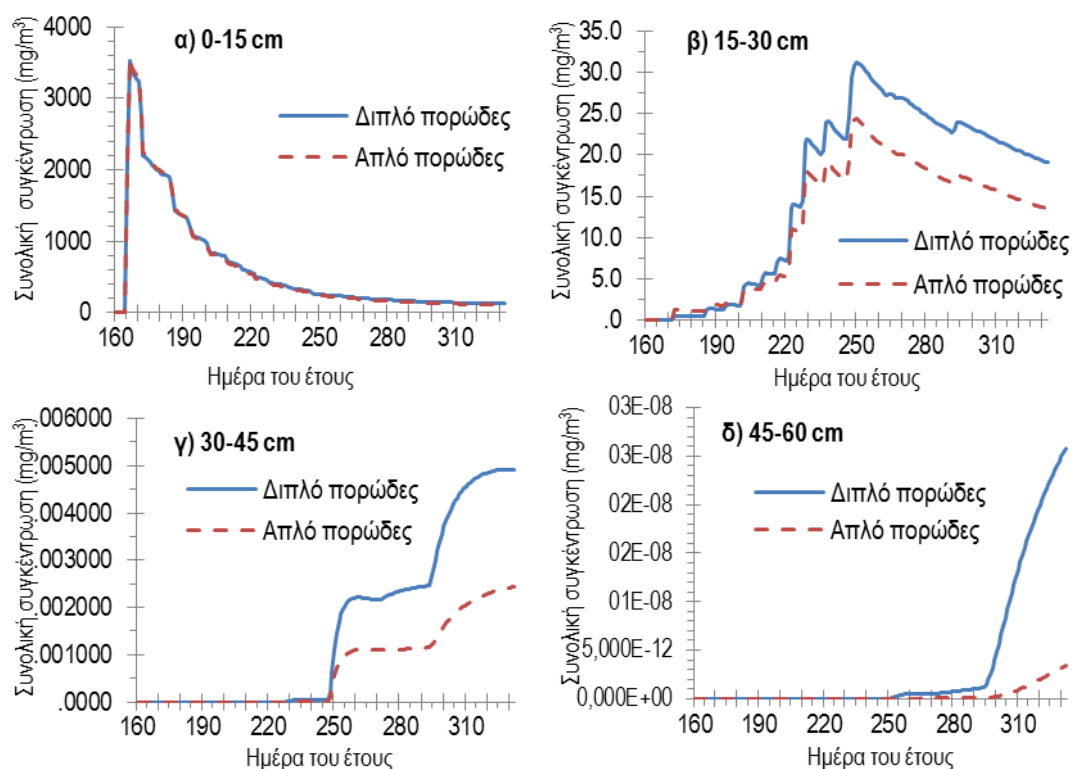
3.2 Αποτελέσματα της τύχης του ζιζανιοκτόνου

Η πρόβλεψη της τύχης μιας ουσίας στο έδαφος και της έκπλυσής της στα υπόγεια νερά χωρίς την ύπαρξη των απαραίτητων δεδομένων και μετρημένων τιμών, αποτελεί μια πρόκληση, ιδίως όταν συμπεριλαμβάνεται η επιλεκτική ροή. Παρά τη «φτωχή» εκτίμηση των τιμών έκπλυσης, το MACRO μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη της επικινδυνότητας ρύπανσης των υπογείων νερών (Simunek, 2003, Moeys et al., 2012).

Η μεταβολή της μάζας στο εδαφικό προφίλ στην υγρή και στερεή φάση των μικροπόρων φαίνεται στο Σχήμα 3. Ο ρυθμός εφαρμογής της ουσίας είναι 1 kg/ha

(100 mg/m²). Η μέγιστη τιμή στη στερεή φάση είναι τα 82 mg/m² και στην υγρή τα 10 mg/m².

Στο Σχήμα 4 δίνεται η μεταβολή της μέσης τιμής της συγκέντρωσης της ουσίας στους μικροπόρους και τους μακροπόρους, στην υγρή και στερεή φάση για τις εδαφικές στρώσεις των 0-15, 15-30, 30-45 και 45-60 cm, για τις περιπτώσεις διπλού και απλού πορώδους. Στην πρώτη εδαφική στρώση η μέση τιμή της συγκέντρωσης στο απλό και το διπλό πορώδες ταυτίζεται. Η ουσία παραμένει στη στρώση για περίπου 3 μήνες, ενώ η συγκέντρωσή της σταθεροποιείται περίπου την 270^η ημέρα. Στη στρώση των 15-30 cm η ουσία εμφανίζεται 25 ημέρες μετά την εφαρμογή της. Η μεταβολή στη συγκέντρωση οφείλεται στη μικρή ημιπερίοδο ζωής της τερμπουθαζίνης, στη δομή του εδάφους αλλά και στην υψηλή θερμοκρασία που επιταχύνει την αποικοδόμηση. Η μέγιστη τιμή της συγκέντρωσης εμφανίζεται την 250^η μέρα, με 31 mg/m³ στην περίπτωση του διπλού πορώδους και 24 mg/m³ για το απλό πορώδες. Απόκλιση ανάμεσα στις δύο περιπτώσεις εμφανίζεται μετά την 230^η μέρα. Στη στρώση των 30-45 cm η ουσία εμφανίζεται την 250^η μέρα ενώ στην τελευταία στρώση των 45-60 cm η ουσία εμφανίζεται 4.5 μήνες μετά την εφαρμογή της, με σημαντική διαφορά τιμών ανάμεσα στις δύο περιπτώσεις. Οι συγκεντρώσεις που καταγράφηκαν είναι σημαντικά μικρότερες από το όριο της ΕΕ των 0.1 μg L⁻¹ (ή 0.1 mg/m³).



Σχήμα 4: Μεταβολή της μέσης τιμής της συνολικής συγκέντρωσης της ουσίας στην εδαφική στρώση των α) 0-15 cm, β) 15-30 cm, γ) 30-45 cm, και δ) 45-60 cm για την περίπτωση διπλού και απλού πορώδους

3.3 Έκπλυση προς τα υπόγεια νερά

Η τερμπουθλαζίνη είναι μια ουσία με χαμηλή διαλυτότητα στο νερό (8.5 mg/L) η οποία αντικατέστησε ζιζανιοκτόνα ευρείας χρήσης (π.χ. ατραζίνη), ενώ παραμένει στο έδαφος για μικρό χρονικό διάστημα μετά την εφαρμογή της (James et al., 1998).

Τα αποτελέσματα του μοντέλου δείχνουν ότι η συγκέντρωση της ουσίας στην τελευταία εδαφική στρώση των 80-120 cm, για το χρονικό διάστημα 1/5-27/11 είναι μηδενική, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει έκπλυσή της προς τα υπόγεια νερά σ' αυτό το διάστημα. Οι Ma et al., (2004) αναφέρουν ότι μικρά ποσά της τερμπουθλαζίνης εκπλύθηκαν κάτω από τα 5 cm και καθόλου κάτω από τα 10 cm, σε αντίστοιχες προσομοιώσεις σε αγρό καλαμποκιού, ενώ οι Fait et al., (2010) παρατήρησαν ότι με εφαρμογή συστήματος της στάγδην άρδευσης εκπλένονται ποσότητες πολύ μικρότερες του ορίου των 0,1 μg/L.

3.4 Ανάλυση ευαισθησίας

Στη διεθνή βιβλιογραφία συναντώνται πολλές εργασίες σχετικά με την ανάλυση ευαισθησίας για το MACRO (Kohne et al., 2009). Οι πιο ευαίσθητες παράμετροι είναι αυτές που σχετίζονται με την οριακή υγρασία ανάμεσα σε μικρό και μακροπορώδες, αλλά και με την προσρόφηση και την αποικοδόμηση (Dubus and Brown, 2002). Η ποσότητα της ουσίας που υφίσταται έκπλυση μεταβάλλεται σημαντικά με κάθε αλλαγή του συντελεστή προσρόφησης ή του ρυθμού μετασχηματισμού (Boesten and Van der Linden, 1991).

Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε μεταβάλλοντας μία παράμετρο τη φορά, ενώ οι υπόλοιπες παραμένουν σταθερές (*ceteris paribus*). Διερευνήθηκε η ευαισθησία στην υγρασία, την πραγματική εξατμισοδιαπνοή ET_a και τη μάζα στο προφίλ τη 270^η μέρα, μεταβάλλοντας το

ύψος πίεσης ψ , το αποτελεσματικό μήκος διάχυσης d , τη σταθερά προσρόφησης K_f , το συντελεστή αποικοδόμησης μ_{ref} και την παράμετρο f . Οι παράμετροι διπλασιάστηκαν και στη συνέχεια υποδιπλασιάστηκαν, εκτός από το f στο οποίο προσθαφαιρέθηκε το μισό. Για την εκτίμηση της επίδρασης στην αλλαγή των παραμέτρων χρησιμοποιήθηκε ο δείκτης ευαισθησίας:

$$\Delta = \left(\frac{P_p - P_s}{P_s} \right) 100\% \quad (7)$$

όπου P_p είναι η τιμή που προκύπτει μεταβάλλοντας την παράμετρο και P_s η τιμή διατηρώντας την παράμετρο σταθερή.

Μεταβολή στην υγρασία παρατηρήθηκε μόνο με διπλασιασμό και υποδιπλασιασμό του ψ ($\Delta = -0,83\%$ και $\Delta = 0,86\%$ αντίστοιχα) όπως επίσης και στην ET_a ($\Delta = \pm 0,40\%$). Η μεταβολή του αποτελεσματικού μήκους διάχυσης δεν επηρέασε το υδρολογικό τμήμα. Σύμφωνα με τους Dubus et al. (2003) η οριακή υγρασία στα όρια μικρο-μακροπόρων είναι η παράμετρος που επηρεάζει περισσότερο τη διήθηση. Οι μεγαλύτερες μεταβολές παρατηρούνται στη συγκέντρωση που είναι αποθηκευμένη στο εδαφικό προφίλ, διπλασιάζοντας και υποδιπλασιάζοντας το μ_{ref} ($\Delta = -81,49\%$ και $\Delta = 132,58\%$ αντίστοιχα) και το κλάσμα f ($\Delta = \pm 43,7\%$), ενώ ακολουθεί το ύψος πίεσης ($\Delta = 4,65\%$ και $\Delta = -2,94\%$ με διπλασιασμό και υποδιπλασιασμό αντίστοιχα). Μικρότερες είναι οι μεταβολές για τις υπόλοιπες παραμέτρους, ενώ η μεταβολή του αποτελεσματικού μήκους διάχυσης δεν επηρεάζει τη μεταβολή της μάζας.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το μοντέλο MACRO είναι ένα μαθηματικό μοντέλο που περιγράφει τη μεταβολή της εδαφικής υγρασίας στις εδαφικές στρώσεις, τη θερμοκρασία του εδάφους,

την τύχη των εφαρμοζόμενων ουσιών στο έδαφος και την έκπλυσή τους προς τα υπόγεια νερά, συνυπολογίζοντας την επιλεκτική ροή. Η διακύμανση της εδαφικής υγρασίας περιγράφηκε σε πολύ ικανοποιητικό βαθμό. Σε όλες τις στρώσεις, κατά μέση τιμή, και οι δύο περιπτώσεις δίνουν υπερεκτιμημένες τιμές, ενώ καλύτερες προκύπτουν στην περίπτωση του διπλού πορώδους. Η τύχη της ουσίας, χαρακτηρίζεται από αβεβαιότητα λόγω μη ύπαρξης μετρημένων τιμών. Στο συγκεκριμένο σενάριο δεν υπάρχει έκπλυση προς τα υπόγεια νερά. Οι πιο ευαίσθητες παράμετροι είναι το ύψος πίεσης στο όριο μικρο- μακροπορώδους και ο συντελεστής αποικοδόμησης μ_{ref} . Η ύπαρξη υψηλής συγκέντρωσης της ουσίας εξαρτάται από τις ιδιότητες της ουσίας, τα χαρακτηριστικά του εδάφους και την περιεκτικότητά του σε οργανική ουσία.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Antonopoulos, V.Z., 2000. Modelling of soil water dynamics in an irrigated corn field using direct and pedotransfer functions for hydraulic properties. *Journal of Irrigation and Drainage Systems*, 14: 325-342.
- Antonopoulos V.Z., 2001. Simulation of Water and Nitrogen Balances of Irrigated and Fertilized Corn-Crop Soil. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, March-April 2001, 77-83.
- Antonopoulos, V. Z., P. Georgiou and C. Kolotouros. 2013. Soil water dynamic in cropped and no cropped field in Northern Greece using a dual permeability model. *Hydrological Sciences Journal*. Accepted for publication.
- Αντωνόπουλος Β., 1999. Υδρολογία της Ακρόεστης Ζώνης του Εδάφους. Έκδοση της υπηρεσίας δημοσιευμάτων του ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη, σελ.250
- Αντωνόπουλος, Β., 2003. Ποιότητα και Ρύπανση Υπόγειων Νερών, Εκδόσεις ΖΗΤΗ, σελ.355.
- Αντωνόπουλος, Β.Ζ., Γ. Φραγκούλης, Ε. Παπαδοπούλου-Μουρκίδου και Ζ. Βρύζας, 2011. Εκτίμηση του κινδύνου έκπλυσης φυτοπροστατευτικών ουσιών σε αγρό αραβοσίτου με το μοντέλο REARL 1.1.1., Πρακτικά 7ου Συνεδρίου Γεωργικής Μηχανικής, 24-27 Νοεμβρίου 2011, Αθήνα.
- Behrendt, H., Bruggemann, R., 1993. Modelling the fate of organic chemicals in the soil plant environment: Model study of root uptake of pesticides. *Chemosphere*, 27(12): 2325-2332
- Boesten, J.J.T.I & van der Linden, A.M.A. 1991. Modeling the influence of sorption and transformation on pesticide leaching and persistence. *Journal of Environmental Quality* 20: 425-435.
- Doorenbos, J., and Pruitt, W.O., 1997. Crop Water Requirements. Irrig. and Drain. Paper No. 24, Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations, Rome.
- Dubus, G.I., Brown, C.D., Beulke, S., 2003. Sensitivity analyses for four pesticide leaching models. *Pest Manag Sci* 59:962-982
- Dubus, I.G., and Brown, C.D., 2002. Sensitivity and First-Step Uncertainty Analyses for the Preferential Flow Model MACRO. *Journal of Environmental Quality* 1:227-24
- Fait, G., Balderacchi, M., Ferrari, F., Ungaro, F., Capri, E., Trevisan, M., 2010. A field study of the impact of different irrigation practices on herbicide leaching. *Europ. J. Agronomy* 32:280-287
- Gardenas, A.I., Simunek, J., Jarvis, N., Van Genuchten, M.Th., 2006. Two-dimensional modelling of preferential water flow and pesticide transport from a tile-drained field. *Journal of Hydrology*, 329: 647- 660
- Germann, P., 1985. Kinematic wave approach to infiltration and drainage into and from soil macropores. *Transactions of the ASAE* 28: 745-749.
- James, T.K., Rahman, A., Holland, P.T., McNaughton, E., Heiermann, M., 1998: Degradation and movement of terbutylazine in soil. *Proc. 51st N.Z. Plant Protection Conf.*, 157-161.
- Jarvis, N.J., 1989. A simple empirical model of root water uptake. *Journal of Hydrology* 107, 57-72.
- Knisel, W.G. (Ed.), 1993. GLEAMS, Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems, Version 2.10. Publication No. 5. Biological and Agricultural Engineering Department, Coastal Plain Experiment Station, University of Georgia, pp 260
- Köhne, J.M., Köhne, S., Šimunek, J., 2009. A review of model applications for structured soils: b) Pesticide transport. *Journal of Contaminant Hydrology* 104: 36-60
- Larsbo, M. and Jarvis, N., 2003. MACRO 5.0. A model of water flow and solute transport in macroporous soil. Technical description. *Emergo* 2003:6, Swedish University of Agricultural Sciences
- Li, J., Prasher, S.O., Clemente, R.S., Reynolds, W.D., Smith, W.N., Gamble, D.S., Topp, E., Langford, C.H., Salehi, F., 1999. Modelling sorption behavior of atrazine on intact soil columns. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 125(4):212-222
- Loague, K.M., Green, R.E., 1991. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application. *Journal of Contaminant Hydrology*. 7: 51-73.
- Ma, Q. L., Rahman, A., James, T. K., Holland, P. T., McNaughton, D. E., Rojas, K. W., Ahuja, L. R., 2004. Modeling the Fate of Acetochlor and Terbutylazine in the Field Using the Root Zone Water Quality Model. *Soil Science Society of America Journal*, 68:1491-1500.
- Moeys, J., Larsbo, M., Bergstrom, L., Brown, C.D., Coquet, Y., Jarvis, N.J., 2012. Functional test of pedotransfer functions to predict water flow and solute transport with the dual-permeability model MACRO. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16: 2069-2083
- Simunek, J., Jarvis, N.J., Van Genuchten, M.Th., Gardenas, A., 2003. Review and comparison of models for describing non-equilibrium and preferential flow and transport in the vadose zone. *Journal of Hydrology*, 272: 14-35
- Tiktak, A., Van den Berg, F., Boesten, J.J.T.I., Van Kraalingen, D., Leistra, M., Van der Linden, A.M.A., 2000. Manual of FOCUS PEARL version 1.1.1. RIVM report 711401 008, Alterra report 28, National Institute Of Public Health And The Environment
- Van den Daele, G.F.A., Barker, J.A., Connell, L.D., Atkinson, T.C., Darling, W.G., Cooper, J.D., 2007. Unsaturated flow and solute transport through the Chalk: Tracer test and dual permeability modeling. *Journal of Hydrology*, 342: 157-172

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΛΕΚΑΝΩΝ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΑΙΑΝΗΣ ΚΟΖΑΝΗΣ

Π. Γεωργίου¹, Α. Αντωνόπουλος² και Ζ. Αντωνόπουλος³

^{1,2}Τομέας Εγγείων Βελτιώσεων, Εδαφολογίας και Γεωργικής Μηχανικής,
Γεωπονική Σχολή Α.Π.Θ. 54124 Θεσσαλονίκη

³Τομέας Υδραυλικής και Τεχνικής Περιβάλλοντος,

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

E-mail: ¹pantaz@agro.auth.gr, ²athaanto@agro.auth.gr, ³zisis_antonopoulos@yahoo.gr

Στον καποδιστριακό Δήμο Αιανής του Νομού Κοζάνης γίνεται πολύ μικρή αξιοποίηση των υδατικών πόρων και οι αρδευόμενες εκτάσεις σε σχέση με τις καλλιεργούμενες είναι αρκετά περιορισμένες. Επομένως υπάρχει δυνατότητα αύξησης των αρδευομένων εκτάσεων με τη μελέτη του υδατικού δυναμικού των λεκανών απορροής και την κατασκευή μικρών έργων (φράγματα, λιμνοδεξαμενές) που αποθηκεύουν νερό για άρδευση και εμπλουτισμό των υπόγειων υδροφορέων. Στην εργασία αυτή εντοπίζονται οι υδρολογικές λεκάνες της περιοχής καθώς επίσης και οι θέσεις κατά μήκος των κυρίων υδατορευμάτων που έχουν ενδιαφέρον για ταμίευση νερού. Προσδιορίζονται όλα τα χαρακτηριστικά των λεκανών ενώ γίνεται ανάλυση των μετεωρολογικών στοιχείων της περιοχής. Το μοντέλο βροχής – απορροής των Thornthwaite and Mather χρησιμοποιείται για την εκτίμηση του υδατικού ισοζυγίου και των απορροών των λεκανών απορροής. Η εκτίμηση των αρδευτικών αναγκών των καλλιεργειών γίνεται με τη βοήθεια της εξατμισοδιαπνοής τους και της ωφέλιμης βροχόπτωσης. Τα παραπάνω αποτελέσματα είναι χρήσιμα για την αξιοποίηση των υδατικών πόρων της περιοχής και το σχεδιασμό των προτεινόμενων έργων.

Λέξεις κλειδιά: Υδατικό ισοζύγιο, λεκάνη απορροής, μοντέλο Thornthwaite and Mather, αρδευτικές ανάγκες

INVESTIGATION AND UTILIZATION OF WATER RESOURCES IN AIANI KOZANI WATERSHEDS

P. Georgiou¹, A. Antonopoulos² and Z. Antonopoulos³

^{1,2}Department of Hydraulics, Soil Science and Agricultural Engineering, Faculty of Agriculture
Aristotle University of Thessaloniki, 54124 Thessaloniki

³Department of Hydraulics and Environmental Engineering, School of Civil Engineering
Aristotle University of Thessaloniki, 54124 Thessaloniki

E-mail: ¹pantaz@agro.auth.gr, ²athaanto@agro.auth.gr, ³zisis_antonopoulos@yahoo.gr

In the municipality of Aiani (Kapodistrias plan), prefecture of Kozani, the utilization of water resources and the irrigated land is very limited. There is potential to increase the irrigated land with the study of water availability in the watersheds and the construction of small projects (dams, reservoirs) for irrigation and recharge of groundwater. In this paper we investigate the watersheds and the positions along the main rivers that are interesting for construction of dams. The watershed characteristics are defined and the meteorological data are analyzed. The rainfall – runoff model of Thornthwaite and Mather is used to study the water balance and runoff evaluation of the watersheds. The irrigation water requirements are estimated by crop evapotranspiration and effective precipitation. The above results are useful for utilization of water resources and design of proposed works.

Key words: Water balance, watershed, Thornthwaite and Mather model, irrigation water requirements

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ανάπτυξη μιας περιοχής και η αύξηση της παραγωγικότητας στη γεωργία, εξαρτώνται από τα εγγειοβελτιωτικά, τα υδρευτικά και τα αποχετευτικά έργα και τα έργα αειφορικής διαχείρισης των υδατικών πόρων. Ο βαθμός ανάπτυξης των έργων αξιοποίησης των επιφανειακών υδατικών πόρων στη χώρα μας είναι αρκετά περιορισμένος και υπάρχουν περιθώρια για περαιτέρω αξιοποίηση. Για το σχεδιασμό έργων αξιοποίησης υδατικών πόρων απαιτούνται παρατηρήσεις απορροής. Η καταγραφή των παροχών των υδατορευμάτων σε διάφορες θέσεις κατά μήκος των υδατορευμάτων είναι μια χρονοβόρα και υψηλού κόστους διαδικασία. Συνήθως γίνονται μετρήσεις σε μεγάλους ποταμούς και σε εύκολα προσβάσιμες θέσεις τους. Από την άλλη πλευρά, οι παρατηρήσεις βροχής είναι πιο αξιόπιστες και καλύπτουν περισσότερα έτη σε σχέση

με τις παρατηρήσεις απορροής. Η ποιοτική και ποσοτική ανεπάρκεια παρατηρήσεων απορροής οδήγησε τους επιστήμονες στην ανάπτυξη και διερεύνηση μοντέλων υπολογισμού της απορροής από τα δεδομένα της βροχής. Ένα από τα ευρέως χρησιμοποιούμενα μοντέλα βροχής-απορροής είναι της Soil Conservation Service (SCS) που εισάγει τον απορροϊκό συντελεστή CN (Curve Number) για την εκτίμηση της απορροϊκής βροχής (SCS, 1972; Τσακίρης, 1995; Παπαμιχαήλ, 2004). Ένα άλλο απλό μοντέλο υπολογισμού της μηνιαίας απορροής από δεδομένα βροχόπτωσης και θερμοκρασίας είναι το μοντέλο των Thornthwaite & Mather (1957). Το μοντέλο αυτό έχει χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της απορροής από πολλούς ερευνητές και μελετητές σε αρκετές υδρολογικές λεκάνες της Ελλάδος (Παπαμιχαήλ κ.ά., 2000; Ασchonίτης κ.ά., 2006;

Ψιλοβίκος και Ζαρκάδας, 2006; Καραμούζης κ.ά., 2008; Karpouzou et al., 2011).

Στον καποδιστριακό Δήμο Αιανής του Ν. Κοζάνης γίνεται πολύ μικρή αξιοποίηση των υδατικών πόρων και οι αρδευόμενες εκτάσεις σε σχέση με τις καλλιεργούμενες είναι αρκετά περιορισμένες. Επομένως υπάρχουν περιθώρια για την αύξηση των αρδευόμενων εκτάσεων μέσω έργων αξιοποίησης του υδατικού δυναμικού της περιοχής. Σκοπός της εργασίας είναι να μελετηθεί το ισοζύγιο νερού στις δύο πιο σημαντικές υδρολογικές λεκάνες του Καποδιστριακού Δήμου Αιανής Κοζάνης. Συγκεκριμένα: α) να εντοπιστούν οι υδρολογικές λεκάνες, β) να προσδιοριστούν τα χαρακτηριστικά τους, γ) να συγκεντρωθούν και επεξεργαστούν τα μετεωρολογικά στοιχεία, δ) να επιλεγεί ένα απλό μαθηματικό μοντέλο υπολογισμού της απορροής, ε) να υπολογιστούν οι απορροές στις υδρολογικές λεκάνες και οι αρδευτικές ανάγκες των καλλιεργειών της περιοχής, στ) να συζητηθούν τα αποτελέσματα και να προταθούν έργα αξιοποίησης των υδατικών πόρων της περιοχής με σκοπό την αύξηση των αρδευόμενων εκτάσεων.

2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η περιοχή μελέτης περιλαμβάνει τις υδρολογικές λεκάνες των κυριότερων ρεμάτων του Καποδιστριακού Δήμου Αιανής, που βρίσκεται στη Δυτική Μακεδονία στο νότιο τμήμα του Νομού Κοζάνης (Σχήμα 1) που συνορεύει δυτικά με το Νομό Γρεβενών. Η συνολική έκταση του Δήμου Αιανής ανέρχεται στα 152.9 km², το μεγαλύτερο μέρος των οποίων είναι μη παραγωγικές εκτάσεις και μόνο τα 33.64 km² καλλιεργούνται. Από αυτά τα 9.17 km² είναι αρδευόμενα (27%) αλλά στη πραγματικότητα αρδεύονται μόνο τα 4.59 km² (13.6%). Κυριότερες καλλιέργειες είναι το σιτάρι, ο καπνός, το κριθάρι, το καλαμπόκι και τα εξαιρετικής ποιότητας αμπέλια.

Η γεωλογία της περιοχής χαρακτηρίζεται από το οφιολιθικό σύμπλεγμα του Βούρινου που βρίσκεται Νότιο/Νοτιοδυτικά της Κοζάνης μέχρι την Ιερά μονή Ζάβουρδας στα Νότια. Η επιφάνεια αυτή καλύπτεται από υπερβασικά πετρώματα. Μόνο σε μικρό τμήμα εμφανίζεται η μαγματική σειρά με δουνίτες, γάββρους κ.ά. (Μανάκος, 1997). Το Βόρειο και Βορειοανατολικό τμήμα του Βούρινου δομείται από ανθρακικούς σχηματισμούς του Τριαδικοιουρασικού της Πελαγονικής. Πρόκειται για ασβεστόλιθους, τέφρους, κρυσταλικούς με καλή στρώση και παρεμβολές δολομιτών και δολομιτικών ασβεστόλιθων. Ο βαθμός ανακρυστάλωσης ποικίλει από θέση σε θέση. Στα ανώτερα μέλη παρεμβάλλεται μια σχιστοκερατολιθική διάπλαση μικρού πάχους.

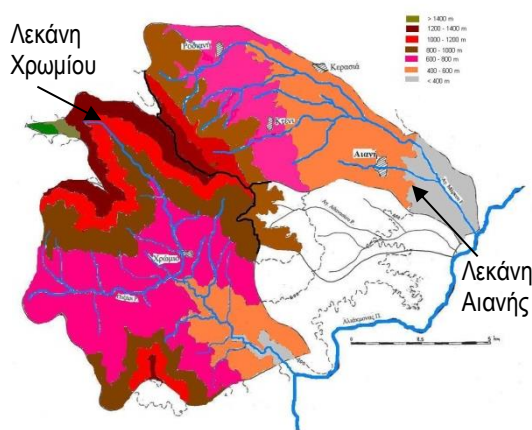
Η περιοχή μελέτης τοποθετείται στην υδρολογική λεκάνη του ποταμού Αλιάκμονα στον οποίο έχουν κατασκευαστεί αρκετοί τεχνητοί ταμιευτήρες με μεγαλύτερο αυτόν της λίμνης του Πολυφύτου (Σχήμα 1).

Στο Δήμο Αιανής υπάρχουν τρεις υδρολογικές λεκάνες από τις οποίες οι δύο παρουσιάζουν ενδιαφέρον για τον υπολογισμό των όγκων

απορροής και την αξιοποίησή τους: α. Η λεκάνη του ρέματος του Χρωμίου (Μπούρινος Ρέμα) και β. Η λεκάνη του ρέματος της Αιανής (ρέμα Αγίου Μάρκου-Καρδόλακος ρέμα), τα οποία εκβάλλουν στον ποταμό Αλιάκμονα. Στο Σχήμα 2 φαίνονται οι υδρολογικές λεκάνες της περιοχής μελέτης ενώ στον Πίνακα 1 δίνονται τα κύρια χαρακτηριστικά των δύο λεκανών.



Σχήμα 1. Χάρτης χωροθέτησης του Δήμου Αιανής στο νομό Κοζάνης και στην Ελλαδική επικράτεια.



Σχήμα 2. Υδρολογικές λεκάνες της περιοχής μελέτης με τις κύριες ισοϋψείς.

Στη λεκάνη του Χρωμίου, ως έξοδος της με τεχνικό και οικονομικό ενδιαφέρον αποτελεί η θέση «Μύλος του μπάμπια Ζήση», στην οποία έχει κατασκευασθεί ένα μικρό φράγμα και ένα αντλιοστάσιο για τη συλλογή και άντληση νερού

προς ένα αρδευτικό δίκτυο. Για τη θέση αυτή η υδρολογική λεκάνη έχει έκταση 51.2 km². Στη λεκάνη της Αιανής η πιο κατάλληλη θέση για την εκτίμηση των όγκων απορροής είναι ανάντη της αγροτικής

οδού που διασχίζει το υδατόρεμα του Αγίου Μάρκου στη θέση «Μεγάλη Ράχη». Για τη θέση αυτή η υδρολογική λεκάνη έχει έκταση 31.7 km².

Πίνακας 1. Κύρια χαρακτηριστικά των υδρολογικών λεκανών

Υδρολογική Λεκάνη	Έκταση, km ²	Μέσο Υψόμετρο, m	Ελάχιστο Υψόμετρο, m	Μέγιστο Υψόμετρο, m	Μέση κλίση, %
Ρέμα Αιανής	46.83	652.58	260	1295	15.19
Ρέμα Χρωμίου	71.50	850.27	310	1868	18.38

3. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

3.1. Μέση βροχόπτωση και μέση θερμοκρασία

Οι πλησιέστεροι μετεωρολογικοί σταθμοί της περιοχής μελέτης είναι ο μετεωρολογικός σταθμός Κοζάνης και οι βροχομετρικοί σταθμοί Αιανής, Σιάτιστας, Σερβίων, Εξάρχου και Δεσκάτης. Από αυτούς, μόνο ο σταθμός της Αιανής βρίσκεται εντός των υπό εξέταση λεκανών απορροής.

Ο βροχομετρικός σταθμός της Αιανής βρίσκεται σε υψόμετρο 460 m και τα διαθέσιμα δεδομένα για την εργασία αφορούσαν την περίοδο 1965-1988. Το μέσο ετήσιο ύψος βροχής για την περίοδο αυτή είναι 565.61 mm με μέγιστη τιμή τα 757.5 mm (1971-72) και ελάχιστη τα 320.4 mm (1984-85). Το μέσο μηνιαίο ύψος βροχής για όλα τα έτη και τους μήνες είναι 47.13 mm με μέγιστο μέσο μηνιαίο ύψος βροχής τα 64.73 mm (Νοέμβριος) και με μέσο ελάχιστο ύψος βροχής τα 29.25 mm (Ιούνιος). Το μέγιστο μηνιαίο ύψος βροχής για τη περίοδο αυτή καταγράφηκε το Δεκέμβριο του 1969 και ήταν ίσο με 177.4 mm, ενώ αντίθετα μηδενικά ύψη βροχής καταγράφηκαν τους μήνες Ιούλιο και Αύγουστο.

Ο μετεωρολογικός σταθμός της Κοζάνης βρίσκεται σε υψόμετρο 710 m και είναι ο μόνος στον οποίο γινόταν καταγραφή της θερμοκρασίας. Τα διαθέσιμα δεδομένα αφορούσαν την περίοδο 1951-1990 και για την περίοδο αυτή η μέση ετήσια θερμοκρασία ήταν 12.85 °C με μέγιστη τιμή τους 14.11 °C (1960-61) και ελάχιστη 11.8 °C (1983-84). Η μέγιστη μέση μηνιαία θερμοκρασία ήταν 27.2 °C τον Αύγουστο του 1952, ενώ η ελάχιστη μέση μηνιαία θερμοκρασία ήταν -1.5 °C τον Ιανουάριο του 1954. Η μέγιστη μέση μηνιαία θερμοκρασία για όλα τα έτη και τους μήνες είναι 23.77 °C τον Ιούλιο και η ελαχίστη 2.31 °C τον Ιανουάριο.

Για τον υπολογισμό της μέσης βροχόπτωσης των υδρολογικών λεκανών στην περιοχή μελέτης χρησιμοποιήθηκε η διαδικασία της βροχοβαθμίδας (Παπαμιχαήλ, 2004). Με βάση το υψόμετρο και τη μέση ετήσια βροχόπτωση των σταθμών Κοζάνης, Αιανής, Σιάτιστας, Σερβίων, Εξάρχου και Δεσκάτης των κοινών υδρολογικών ετών παρατηρήσεων προέκυψε η ακόλουθη σχέση:

$$y = 0.247x + 435.5 \quad (1)$$

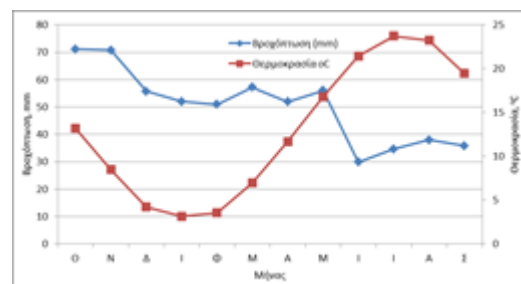
όπου y= ετήσιο ύψος βροχής σε mm και x= υψόμετρο σταθμού σε m.

Από τη σχέση (1) προκύπτει ότι για κάθε αύξηση του υψομέτρου κατά 100 m , το ετήσιο ύψος βροχής

αυξάνεται κατά 24.7 mm. Με βάση τα δεδομένα του σταθμού Αιανής της περιόδου 1969-70 μέχρι 1987-88 και της βροχοβαθμίδας της σχέσης (1) υπολογίστηκε η μέση μηνιαία βροχόπτωση των δύο λεκανών απορροής.

Η μέση μηνιαία θερμοκρασία των υδρολογικών λεκανών υπολογίστηκε με τη διαδικασία της θερμοβαθμίδας, χρησιμοποιώντας ως σταθμό βάσης το σταθμό της Κοζάνης και την μηνιαία κατακόρυφη θερμοβαθμίδα όπως δίνεται από τον Φλόκα (1986).

Στο Σχήμα 3 δίνεται το ομβροθερμικό διάγραμμα που περιγράφει τη μεταβολή της θερμοκρασίας και της βροχόπτωσης κατά τη διάρκεια του έτους στην λεκάνη της Αιανής. Στο ομβροθερμικό διάγραμμα παρατηρούνται κατά τη διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών υψηλές μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες και χαμηλές μέσες μηνιαίες βροχοπτώσεις.



Σχήμα 3. Ομβροθερμικό διάγραμμα της λεκάνης απορροής της Αιανής (1969-70 μέχρι 1987-88).

3.2. Δυναμική εξατμισοδιαπνοή

Η εμπειρική σχέση του Thornthwaite χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ολικής δυναμικής εξατμισοδιαπνοής σε μια περιοχή χωρίς ιδιαίτερη αναφορά σε συγκεκριμένες καλλιέργειες ή συστήματα εκμετάλλευσης και έχει τη μορφή (Παπαμιχαήλ, 2004):

$$ET_p = 16L_d \left[10T/I \right]^{6.75 \cdot 10^{-7} I^3 - 7.71 \cdot 10^{-5} I^2 + 0.01792I + 0.49239} \quad (2)$$

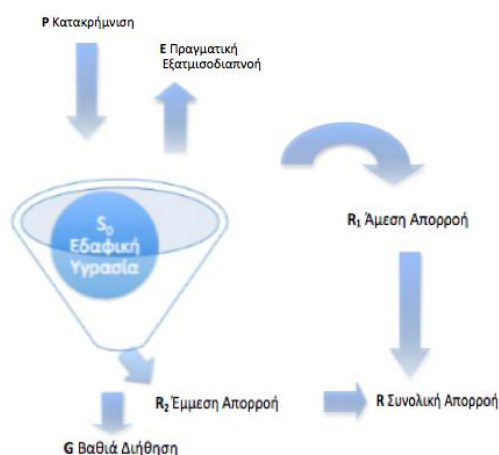
όπου: ET_p= η δυναμική εξατμισοδιαπνοή σε mm/μήνα, L_d= ο λόγος της μέσης διάρκειας ημέρας κάθε μήνα προς ημέρα διάρκειας 12 ωρών, T= μέση μηνιαία θερμοκρασία του αέρα (°C), I= ένας ετήσιος δείκτης θερμότητας που υπολογίζεται με τη σχέση:

$$I = \sum_{j=1}^{12} \left[\frac{T_j}{5} \right]^{1.514} \quad (3)$$

όπου T_j= μέση μηνιαία θερμοκρασία του αέρα (°C).

3.3. Υδρολογικό μοντέλο

Το απλό και διαδεδομένο μοντέλο των Thornthwaite & Mather (1957), όπως τροποποιήθηκε από τον Alley (Dingman, 1994) χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία για τον υπολογισμό του υδατικού ισοζυγίου των λεκανών απορροής. Βασίζεται στην εξομοίωση της υδρολογικής λειτουργίας της λεκάνης απορροής με τη λειτουργία μιας απλής δεξαμενής. Το χρονικό βήμα των υπολογισμών είναι μηνιαίο. Μία γενική περιγραφή της λειτουργίας του μοντέλου είναι η εξής: Υπολογίζονται οι όγκοι υδατικού πλεονάσματος F_p και υδατικού ελλείμματος D_p για την εύρεση της εδαφικής υγρασίας S για κάθε μήνα. Στη συνέχεια υπολογίζεται με βάση την εδαφική υγρασία και τη δυναμική εξατμισοδιαπνοή ET_p , η πραγματική εξατμισοδιαπνοή ET_c . Αφού αφαιρεθεί η ET_c , υπολογίζεται η βαθιά διήθηση G . Ο όγκος νερού που απομένει V , είναι υπεύθυνος για την άμεση απορροή, R_1 . Όμως, σε περίπτωση που η υγρασιακή κατάσταση του εδάφους ξεπεράσει τη μέγιστη εδαφική υγρασία S_0 , τότε προκύπτει έμμεση απορροή, R_2 . Η ολική απορροή, R , προκύπτει από το άθροισμα της άμεσης και έμμεσης απορροής. Στο Σχήμα 4 φαίνεται η σχηματική περιγραφή του μοντέλου των Thornthwaite & Mather ενώ αναλυτική περιγραφή των σχέσεων υπολογισμού μπορεί κανείς να βρει στο σύγγραμμα του Παπαμιχαήλ (2004).



Σχήμα 4. Σχηματική περιγραφή του μοντέλου των Thornthwaite & Mather.

Το συγκεκριμένο μοντέλο έχει τρεις βασικές παραμέτρους: Τη μέγιστη εδαφική υγρασία S_0 και τους συντελεστές βαθιάς διήθησης b και υστέρησης a . Η μέγιστη εδαφική υγρασία εκτιμάται με τη βοήθεια της σχέσης (Τσακίρης, 1995; Παπαμιχαήλ, 2004):

$$S_0 = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (4)$$

όπου CN είναι ο απορροϊκός συντελεστής (Curve Number) ο οποίος εκτιμάται με τη βοήθεια Πινάκων (Τσακίρης, 1995; Παπαμιχαήλ, 2004), με βάση τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά και τις χρήσεις γης της λεκάνης απορροής.

Η εκτίμηση του απορροϊκού συντελεστή εξαρτάται από τρεις κύριους παράγοντες, οι οποίοι είναι: α) ο τύπος του εδάφους, β) ο τρόπος

διαχείρισής του και γ) η υγρασιακή κατάσταση του πριν την έναρξη της προσομοίωσης.

Ο συντελεστής βαθιάς διήθησης εκτιμάται με βάση τη γεωλογική δομή της υδρολογικής λεκάνης και τους επιμέρους συντελεστές βαθιάς διήθησης του κάθε γεωλογικού σχηματισμού. Τέλος, ο συντελεστής υστέρησης a , εκτιμάται με βάση τη γεωλογική δομή, τις χρήσεις γης και την κλίση της λεκάνης.

3.4. Ανάγκες σε νερό των καλλιέργειών

Οι ανάγκες σε αρδευτικό νερό αποτελούν τη βασική παράμετρο για τον προγραμματισμό και σχεδιασμό των αρδευτικών έργων και τη διαχείριση του αρδευτικού νερού (Αντωνόπουλος, 1999; Παπαζαφειρίου, 1999; Γεωργίου, 2004; Παπαμιχαήλ και Γεωργίου, 2007; Georgiou and Paramichail, 2008).

Οι καθαρές σε νερό άρδευσης ανάγκες κάθε καλλιέργειας, θεωρώντας ότι η συμβολή του υπόγειου νερού και της εδαφικής υγρασίας είναι μηδενικές, υπολογίζονται από τη σχέση:

$$IR_n = ET_c - P_e \quad (5)$$

όπου ET_c = εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας, P_e = ωφέλιμη βροχή.

Οι ολικές σε νερό άρδευσης ανάγκες υπολογίζονται από τη σχέση:

$$IR_t = IR_n / E \quad (6)$$

όπου E = αποδοτικότητα άρδευσης.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Για την εφαρμογή του μοντέλου των Thornthwaite & Mather απαιτούνται δεδομένα βροχόπτωσης και εξατμισοδιαπνοής ενώ απαιτείται και ο υπολογισμός των τριών παραμέτρων S_0 , b και a . Η μέση βροχόπτωση για τις δύο λεκάνες υπολογίστηκε με τη διαδικασία της βροχοβαθμίδας, όπως περιγράφηκε στην Παράγραφο 3.1, ενώ η δυναμική εξατμισοδιαπνοή με τη μέθοδο του Thornthwaite (Παράγραφος 3.2) με τη βοήθεια της μέσης θερμοκρασίας των λεκανών.

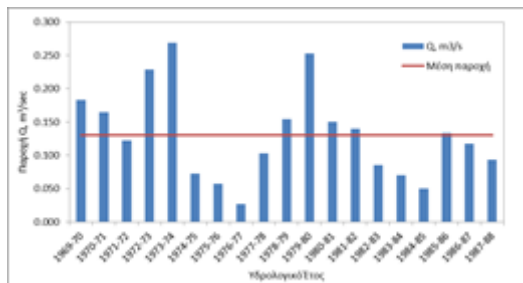
Με βάση τα στοιχεία κατανομής της χρήσης γης που είναι αντίστοιχα για τη λεκάνη του Χρωμίου και τη λεκάνη της Αιανής 42.9% και 37.9 % καλλιέργειες σιτηρών, 29.3% και 18.9 % βοσκότοποι και 17.9% και 22.7% δάση και θαμνώδεις εκτάσεις, βρέθηκε ότι η τιμή του σταθμισμένου απορροϊκού συντελεστή CN είναι 68.78 για τη λεκάνη του Χρωμίου και 70.19 για τη λεκάνη της Αιανής. Επομένως με βάση τη σχέση (4) οι μέγιστες εδαφικές υγρασίες S_0 για τις αντίστοιχες υπολεκάνες είναι 115 mm και 108 mm. Από το γεωλογικό χάρτη του ΙΓΜΕ (Μανάκος, 1997) και τους συντελεστές βαθιάς διήθησης των σχηματισμών βρέθηκε ότι ο μέσος συντελεστής βαθιάς διήθησης της λεκάνης της Αιανής είναι 24.62 ενώ για τη λεκάνη του Χρωμίου 19.12. Τέλος, ο συντελεστής υστέρησης πάρθηκε ίσος με 30%.

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα υπολογίστηκαν οι μηνιαίες απορροές για τα υδρολογικά έτη 1969-70 μέχρι 1987-88 για τις δύο λεκάνες της Αιανής και του Χρωμίου,

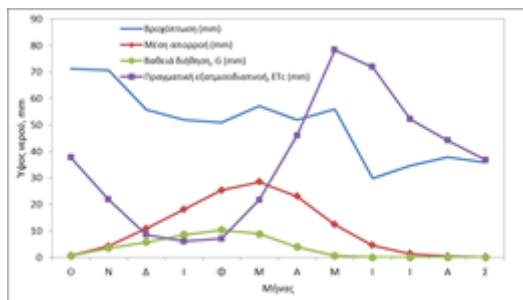
Στα Σχήματα 5 και 6 δίνονται αντίστοιχα η μέση ετήσια παροχή και η μέση διακύμανση κατά τη

διάρκεια του έτους των συνιστωσών του ισοζυγίου νερού της λεκάνης της Αιανής στη θέση Μεγάλη Ράχη για τα υδρολογικά έτη 1969-70 μέχρι 1987- 88.

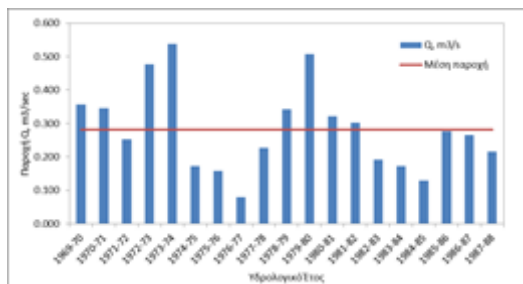
Στα Σχήματα 7 και 8 δίνονται αντίστοιχα η μέση ετήσια παροχή και η μέση διακύμανση κατά τη διάρκεια του έτους των συνιστωσών του ισοζυγίου νερού της λεκάνης του Χρωμίου στη θέση Μύλος του μπάρμπα Ζήση για τα υδρολογικά έτη 1969-70 μέχρι 1987- 88.



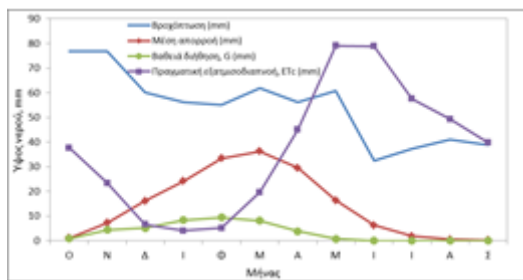
Σχήμα 5. Ετήσια παροχή νερού της λεκάνης της Αιανής (1969-70 μέχρι 1987-88) στη θέση Μεγάλη Ράχη.



Σχήμα 6. Μέση ετήσια διακύμανση των συνιστωσών του ισοζυγίου του νερού της λεκάνης Αιανής (1969-70 μέχρι 1987-88) στη θέση Μεγάλη Ράχη.



Σχήμα 7. Ετήσια παροχή νερού της λεκάνης του Χρωμίου (1969-70 μέχρι 1987-88) στη θέση Μύλος του μπάρμπα Ζήση.



Σχήμα 8. Μέση ετήσια διακύμανση των συνιστωσών του ισοζυγίου του νερού της λεκάνης του Χρωμίου

(1969-70 μέχρι 1987-88) στη θέση Μύλος του μπάρμπα Ζήση.

Ο μέσος ετήσιος συντελεστής απορροής για τη λεκάνη της Αιανής είναι 0.214 ενώ για τη λεκάνη του Χρωμίου 0.265.

Σύμφωνα με την ετήσια γεωργική στατιστική έρευνα του έτους 2010 προκύπτει ότι από το σύνολο των αροτριάων καλλιεργειών (17.931 στρ.) του δημοτικού διαμερίσματος Αιανής μόνο τα 512 στρ (3%) αρδεύονται, ενώ στο δημοτικό διαμέρισμα του Χρωμίου από τα 3.628 στρ αρδεύονται μόνο τα 79 στρ. (2%). Επιπλέον στην Αιανή υπάρχουν άλλα 50 στρ. δενδρωδών καλλιεργειών που αρδεύονται.

Τα στοιχεία αυτά δείχνουν ότι θα μπορούσαν να αυξηθούν οι αρδευόμενες εκτάσεις, με την αξιοποίηση των υπάρχοντων και τη κατασκευή νέων αρδευτικών έργων, όπως επίσης και με την ορθολογική διαχείριση των υδατικών πόρων της περιοχής. Στα πλαίσια της εργασίας αυτής υπολογίζονται οι μέσες ανάγκες σε αρδευτικό νερό, μιας μεγαλύτερης έκτασης και διαφορετικής κατανομής καλλιεργειών μέσα σε αυτήν. Συγκεκριμένα υπολογίζονται οι ανάγκες για άρδευση 2.000 στρεμμάτων στην Αιανή και 1.000 στρεμμάτων στο Χρώμιο με την κατανομή των καλλιεργειών που δίνεται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2. Κατανομή καλλιεργειών και έκταση του προτεινόμενου σχεδίου άρδευσης στην περιοχή μελέτης

Κατηγορίες καλλιεργειών	Εκτάσεις σε στρέμματα	
	Λεκάνη Αιανής	Λεκάνη Χρωμίου
Αραβόσιτος	600	300
Μηδική	800	500
Κηπευτικά	300	100
Δενδρώδεις καλλιέργειες	200	100
Αμπέλια	100	0
Σύνολο	2000	1000

Έχοντας υπολογίσει τις απορροές στις δύο περιοχές μελέτης εξετάστηκε αν αυτές καλύπτουν τις ανάγκες σε αρδευτικό νερό των καλλιεργειών του Πίνακα 2.

Στον Πίνακα 3 δίνονται συγκριτικά οι μέσες μηνιαίες και ετήσιες απορροές (Q) και οι ολικές ανάγκες σε αρδευτικό νερό (IR_i) στις δύο λεκάνες, καθώς επίσης και το έλλειμμα ή η περίσσεια νερού που μπορεί να υπάρχει μετά την κάλυψη αυτών των αναγκών. Διαπιστώνεται ότι στην υδρολογική λεκάνη της Αιανής οι απορροές δεν καλύπτουν τις ανάγκες σε αρδευτικό νερό από το μήνα Ιούνιο μέχρι και το Σεπτέμβριο, ενώ στην υδρολογική λεκάνη Χρωμίου οι απορροές δεν καλύπτουν τις ανάγκες σε αρδευτικό νερό από το μήνα Ιούλιο μέχρι και το Σεπτέμβριο. Εξετάζοντας όμως τις απορροές και ανάγκες σε ετήσια βάση παρατηρούμε ότι δεν υπάρχει έλλειμμα και το περίσσευμα νερού απορροής είναι πολύ σημαντικό και στις δύο λεκάνες. Άρα για να ικανοποιηθούν οι ανάγκες σε

αρδευτικό νερό των αντίστοιχων εκτάσεων θα πρέπει να γίνουν έργα αποταμίευσης νερού (ταμιευτήρες – λιμνοδεξαμενές), στις οποίες θα αποθηκεύεται νερό

κατά τη διάρκεια του χειμώνα και θα χρησιμοποιείται κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.

Πίνακας 3. Μέσες μηνιαίες και ετήσιες απορροές και ολικές σε νερό άρδευσης ανάγκες στις λεκάνες Αιανής και Χρωμίου

Λεκάνη Αιανής						
	Μάιος	Ιούνιος	Ιούλιος	Αύγουστος	Σεπτέμβριος	Ετήσιο
IR _t (m ³)	71.702	202.050	270.352	226.824	109.663	880.592
Q (m ³)	392.105	142.510	42.753	12.825	3.847	4.106.615
Έλλειμμα ή περίσσεια	320.403	-59.540	-227.599	-213.999	-105.816	3.226.023
Λεκάνη Χρωμίου						
	Μάιος	Ιούνιος	Ιούλιος	Αύγουστος	Σεπτέμβριος	Ετήσιο
IR _t (m ³)	41.525	106.532	137.830	113.792	58.327	458.008
Q (m ³)	836.208	317.291	95.187	28.556	8.567	8.850.575
Έλλειμμα ή περίσσεια	794.683	210.759	-42.643	-85.236	-49.760	8.392.566

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή έγινε μία προσπάθεια για να μελετηθεί το υδατικό ισοζύγιο του καποδιστριακού δήμου Αιανής Κοζάνης. Για το σκοπό αυτό προσδιορίστηκαν οι δύο σημαντικότερες υδρολογικές λεκάνες και προσδιορίστηκαν τα χαρακτηριστικά τους. Στη συνέχεια έγινε επεξεργασία των μετεωρολογικών στοιχείων και υπολογίστηκε το υδατικό δυναμικό της περιοχής με τη χρήση του μοντέλου Thornthwaite and Mather λόγω παντελούς έλλειψης μετρήσεων απορροής. Τέλος υπολογίστηκαν οι αρδευτικές ανάγκες για ένα σχέδιο καλλιεργειών και συγκρίθηκαν οι ανάγκες αυτές με τις υπολογισμένες απορροές. Από τη σύγκριση προέκυψε ότι ενώ οι απορροές κατά την αρδευτική περίοδο δεν μπορούν να καλύψουν τις αρδευτικές ανάγκες, εντούτοις οι χειμερινές απορροές είναι υπεραρκετές για την κάλυψη αυτών των αναγκών. Επομένως, προτείνεται η αξιοποίηση των χειμερινών απορροών με την κατασκευή έργων ταμίευσης (φράγμα, λιμνοδεξαμενές) όπου ο σκοπός τους θα είναι πέραν της ικανοποίησης των αρδευτικών αναγκών και ο εμπλουτισμός του υπόγειου υδροφορέα. Οι θέσεις στις οποίες μπορούν να κατασκευαστούν έργα αξιοποίησης των υδατικών πόρων είναι για τη λεκάνη του Χρωμίου, η θέση Μύλος του μπάρμπα Ζήση, και για τη λεκάνη της Αιανής η θέση Μεγάλη Ράχη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Αντωνόπουλος, Β., 1999. Υδρολογία της ακόρεστης ζώνης του εδάφους. Υπηρεσία Δημοσιευμάτων του Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, 275 σελ.
 Ασχονίτης Β. Γ., Μπαλτάς Ε. Α., Αντωνόπουλος Β. Ζ., 2006. Υδρολογική διερεύνηση της λεκάνης του Εορδαίου ποταμού. Πρακτικά 10^{ου} Πανελληνίου συνεδρίου ΕΥΕ, Ξάνθη, 23-30.
 Γεωργίου, Π.Ε., 2004. Βελτιστοποίηση λειτουργίας ταμιευτήρων για αρδευτικούς σκοπούς. Διδακτορική διατριβή, Γεωπονική Σχολή ΑΠΘ.
 Georgiou, P.E., Papamichail, D.M., 2008. Optimization model of an irrigation reservoir for water

allocation and crop planning under various weather conditions. Irrigation Science, 26: 487-504.

Dingman, S. L., 1994. Physical hydrology. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

Καραμούζης, Δ., Παπαμιχαήλ, Δ., Γεωργίου, Π., 2008. Υδρολογική μελέτη φράγματος Ολυνθίου (θέση Ψαλίδα). Ερ. Πρόγραμμα: Συμπληρωματική Έρευνα Έργων Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων Χαλκιδικής – Φράγμα Ολυνθίου, Θεσσαλονίκη.

Karpouzios, D., Baltas, E., Kavalieratos, S., Babajimopoulos, C., 2011. A hydrological investigation using a lumpedwater balance model: the Aison River Basin case (Greece). Water and Environment Journal, 25: 297–307.

Μανάκος, Α., 1997. Συμβολή στη γνώση της υδρογεωλογικής συμπεριφοράς των οφιολίθων του όρους Βουρινού, Ν. Κοζάνης, Πρακτικά 4^{ου} Υδρογεωλογικού Συνεδρίου, Θεσσαλονίκη, 213-227.

Παπαζαφειρίου, Ζ.Γ., 1999. Οι ανάγκες σε νερό των καλλιεργειών. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 347 σελ.

Παπαμιχαήλ, Δ.Μ., 2004. Τεχνική υδρολογία επιφανειακών υδάτων. Εκδόσεις Γιαχούδη, Θεσσαλονίκη, 394 σελ.

Παπαμιχαήλ, Δ.Μ., Γεωργίου, Π.Ε., 2007. Βέλτιστη χρήση νερού στη γεωργία. Πρακτικά Συνεδρίου «Προστασία, Αποκατάσταση & Βιώσιμη Ανάπτυξη του Φυσικού & Πολιτιστικού Περιβάλλοντος στην Ευρώπη», Δράση Jeann Monnet, Βέροια, 389-412.

Παπαμιχαήλ, Δ.Μ., Γεωργίου, Π.Ε., Καραμούζης, Δ.Ν., 2000. Εκτίμηση μηνιαίων εισροών του ταμιευτήρα του χειμάρρου Πετρένια Χαλκιδικής και σχεδιασμός λειτουργίας του. Πρακτικά 8^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου ΕΥΕ, Αθήνα, 277-284.

SCS (Soil Conservation Service), 1972. National Engineering Handbook, Section 4, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C.

Thornthwaite C.W., Mather J.R., 1957. Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. Publication in Climatology, 10(3), Centerton, N.J. Drexel Inst.

Τσακίρης, Γ., 1995. Τεχνική υδρολογία. Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα.
Φλόκας Α.Α., 1986. Μαθήματα μετεωρολογίας κλιματολογίας. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.

Ψιλοβίκος, Α., Ζαρκάδας, Π., 2006. Μοντέλο προσομοίωσης υδατικού ισοζυγίου της λεκάνης απορροής της λίμνης Καστοριάς. Πρακτικά 10^{ου} Πανελλήνιου συνεδρίου ΕΥΕ, Ξάνθη, 62-72.

ΣΧΕΣΗ ΑΡΔΕΥΣΗΣ - ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΠΟΙΟΤΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΤΟΜΑΤΑΣ ΣΤΗΝ ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΕΛΛΑΔΑ

**Δημήτριος Καλφούντζος, Παναγιώτης Βύρλας, Χρυσούλα Παπαϊωάννου, Αντώνιος Σιούρας,
Αγαθός Φιλίντας, Πασχάλης Ντιούδης**

Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα (Τ.Ε.Ι.) Λάρισας, Σχολή Τεχνολόγων Γεωπονίας,
Τμήμα Μηχανικής Βιοσυστημάτων, ΤΚ 411 10, Λάρισα, e-mail: dkalf@teilar.gr

Λόγω των σεναρίων μείωσης του διαθέσιμου νερού για την άρδευση των καλλιεργειών στη λεκάνη της Μεσογείου και ειδικότερα στη Θεσσαλία η οποία υποφέρει ιδιαίτερα από την μείωση των βροχοπτώσεων τα τελευταία χρόνια, η ορθή χρήση του νερού άρδευσης αποτελεί το κλειδί για την διαχείριση του αρδευτικού νερού. Η παρούσα εργασία διερευνά τις σχέσεις αρδευτικού νερού, παραγωγής και βασικών ποιοτικών χαρακτηριστικών υπαίθριας βιομηχανικής τομάτας στην κεντρική Ελλάδα. Από τα πειραματικά δεδομένα προκύπτει θετική συσχέτιση του αρδευτικού νερού με ορισμένα από τα ποσοτικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά τα οποία εξετάστηκαν. Τα αποτελέσματα μπορούν να αξιοποιηθούν στη βέλτιστη χρήση του αρδευτικού νερού.

Λέξεις κλειδιά: βιομηχανική τομάτα, ποιοτικά χαρακτηριστικά καρπών, διαλυτά στερεά συστατικά

RELATIONSHIP BETWEEN IRRIGATION, PRODUCTION AND QUALITY CHARACTERISTICS OF INDUSTRIAL TOMATO FRUIT IN CENTRAL GREECE

**Dimitrios Kalfountzos, Panagiotis Vyrlas, Chrysoula Papaioannou, Antonios Siouras,
Agathos Filintas, Paschalis Dioudis**

Technological Educational Institute of Larissa, School of Agricultural Technology, Department of Biosystems
Engineering, Zip. 411 10, Larissa, e-mail: dkalf@teilar.gr

Because of the scenarios for reduction of water available for irrigation in the Mediterranean region and especially in Thessaly which suffers particularly from reduced rainfall in recent years, the proper use of irrigation water is the key for the sustainable management of water. The present study examines the relationships between irrigation water, production and essential qualities outdoor industrial tomato in central Greece. The experimental data show a positive correlation of irrigation water to some of the quantity and quality characteristics examined. The results can be utilized to the optimum use of irrigation water.

Keywords: industrial tomato, fruit quality characteristics, total soluble solids

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εξάρτηση της γεωργικής παραγωγής από τη συχνότητα και την ποσότητα του νερού άρδευσης έχει διερευνηθεί από πάρα πολλούς ερευνητές (Doorenbos and Kassam, 1979). Κατά καιρούς έχουν διατυπωθεί σχετικές εξισώσεις οι οποίες άλλοτε είναι γενικές και άλλοτε αναφέρονται σε ορισμένες περιοχές και καλλιέργειες (Αλεξίου κ. α., 2000). Ο τομέας παραγωγής τομάτας για μεταποίηση είχε σημαντική θέση μεταξύ των κλάδων της αγροτικής οικονομίας της χώρας, για μια μεγάλη σειρά ετών έως και το έτος 2004, χρονιά που αποτέλεσε αφετηρία συνεχούς πτωτικής πορείας. Έτσι ενώ το 2004 καλλιεργήθηκαν 183.000 στρέμματα με παραγωγή 1.187.000 τόνους πρώτης ύλης και 237.000 τόνους τελικών προϊόντων, το 2011 κατέληξε να καλλιεργηθεί έκταση μόλις 40.000 στρεμμάτων με παραγωγή 330.000 τόνους πρώτη ύλη και 84.000 τόνους σε τελικά προϊόντα.

Οι παράγοντες που οδήγησαν σε μείωση της καλλιέργειας βιομηχανικής τομάτας, ειδικά το έτος 2011 οφείλονται α) στην αναθεώρηση της Κ.Α.Π. και της ΚΟΑ οπωροκηπευτικών το 2007 και β) στην εθνική επιλογή διατήρησης της συνδεδεμένης ενίσχυσης, ενισχυμένης σε ποσοστό 30% έως και το τέλος του 2010, δημιουργήσε συγκριτικό μειονέκτημα με αποτέλεσμα την εγκατάλειψη της καλλιέργειας

από τους παραδοσιακούς της καλλιεργητές. Το γεγονός ότι η βιομηχανική τομάτα λειτουργεί υπό το καθεστώς της συμβολαιακής γεωργίας, σε αντίθεση με άλλα ανταγωνιστικά προϊόντα όπως το βαμβάκι και το καλαμπόκι και η πλήρης αποδέσμευση της ενίσχυσης και η ενσωμάτωσή της στο καθεστώς της Ενιαίας Ενίσχυσης θα τονώσει το ενδιαφέρον των παραγωγών για την αύξηση των καλλιεργούμενων εκτάσεων.

Από τις ποιο εντατικές καλλιέργειες όσον αφορά την άρδευση και τη χρήση χημικών, είναι και η παραγωγή βιομηχανικής τομάτας (Rinaldi et al., 2003). Η συγκεκριμένη συγκαταλέγεται στις πλέον απαιτητικές καλλιέργειες σε νερό, διότι απαιτούνται περίπου 600 mm ανά έτος.

Κατά συνέπεια η βελτιστοποίηση των συνθηκών άρδευσης της καλλιέργειας βιομηχανικής τομάτας δεν θα πάψει να απασχολεί τους ερευνητές εφόσον η παγκόσμια παραγωγή της βαίνει αυξανόμενη. Συγκεκριμένα το 2009 αυξήθηκε κατά 7% σε σχέση με το 2008 και κατά 15% σε σχέση με το 2007. Το ίδιο συμβαίνει και στην παραγωγή των χωρών μελών της Ε.Ε. όπου τα τελευταία χρόνια παρουσιάζει συνεχή αύξηση. Κυρίαρχη θέση στην παραγωγή κατέχει η Ιταλία με $5,0 \cdot 10^6$ Mg (2009) και ακολουθεί η Ισπανία με $2,3 \cdot 10^6$ Mg, η Πορτογαλία με $1,1 \cdot 10^6$ Mg και η Ελλάδα με $0,8 \cdot 10^6$ Mg.

Επομένως είναι σκόπιμο η Ελλάδα βελτιστοποιώντας τις συνθήκες παραγωγής της εν λόγω καλλιέργειας, να γίνει ποιο ανταγωνιστική σε ένα προϊόν του οποίου η ζήτηση αυξάνεται παγκόσμια.

Όσον αφορά στην ποιότητα της βιομηχανικής τομάτας, μεταξύ των κυριότερων επιθυμητών χαρακτηριστικών που χαρακτηρίζουν την παραγωγή της, είναι η υψηλή περιεκτικότητα σε διαλυτά στερεά συστατικά, η χαμηλή οξύτητα, η αντοχή στη μεταφορά, η υψηλή παραγωγικότητα και το υψηλό ποσοστό καρπών 1^{ης} κατηγορίας (Goose and Binsted, 1964).

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα της βιομηχανικής τομάτας είναι ενδογενείς (ποικιλία κ.λπ.) και εξωγενείς (περιβάλλον και διαχείριση). Στο περιβάλλον, ανήκουν εδαφικές και κλιματολογικές συνθήκες. Στη διαχείριση, είναι ο τρόπος καλλιέργειας, η εποχή συγκομιδής, η δόση και η συχνότητα άρδευσης κ. α. δηλαδή τεχνικές οι οποίες χωρίς να επιβαρύνουν ιδιαίτερα τις εισροές της καλλιέργειας, συντελούν σε υψηλές αποδόσεις.

Η συγκομιδή (χειρωνακτική ή εκμηχανισμένη) της βιομηχανικής τομάτας στην Ελλάδα, γίνεται το 3^ο δεκαήμερο του Ιουλίου (πρώιμες ποικιλίες), τον Αύγουστο-Σεπτέμβριο (μεσο-πρώιμες ποικιλίες) και τον Οκτώβριο (όψιμες ποικιλίες), με μικρές αποκλίσεις ανάλογα με τις εκάστοτε εδαφοκλιματικές συνθήκες.

Στη διεθνή βιβλιογραφία (De Jager. and Kenedy, 1995) εφαρμόζονται τρεις μέθοδοι (επίπεδα) προγραμματισμού της άρδευσης με σκοπό την μεταφορά της τεχνολογίας στους χρήστες παραγωγούς. Το **Υψηλό** που βασίζεται στο υπολογιστικό μοντέλο των κλιματικών δεδομένων, το **Ενδιάμεσο** το οποίο αναπληρώνει αθροιστικά την ημερήσια εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας και το **Ελάχιστο** (συμβατικό) το οποίο εφαρμόζει σταθερή ποσότητα νερού σε σταθερά χρονικά διαστήματα.

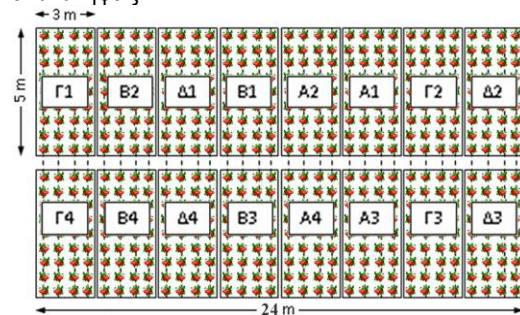
Η παρούσα εργασία διερευνά την επίδραση της ποσότητας του αρδευτικού νερού στην παραγωγή και ποιότητα της βιομηχανικής τομάτας στη Κεντρική Ελλάδα εφαρμόζοντας το Ενδιάμεσο επίπεδο άρδευσης.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1 Περιγραφή της εγκατάστασης

Το αρδευτικό δίκτυο αποτελούνταν από τον κύριο αγωγό μεταφοράς από PE Φ32/6 Atm και από δευτερεύοντες αγωγούς PE Φ20/6 Atm. Οι σταλακτηφόροι σωλήνες της επιφανειακής στάγδην άρδευσης είχαν ισαποχή 1,5 m, μήκος 5 m και ήταν τύπου PC/Φ16 με ενσωματωμένους σταλάκτες. Οι σταλάκτες ήταν αυτορυθμιζόμενοι και αυτοκαθαριζόμενοι ισαποχής 0,70 m, παροχής 2,2 l h⁻¹ σε πίεση λειτουργίας από 0,5 έως 3,5 Atm, με διπλό μηχανισμό αυτοκαθαρισμού και δύο κανάλια εξόδου ώστε να αποφεύγεται η έμφραξη. Μεταξύ της κύριας γραμμής και των γραμμών άρδευσης παρεμβάλλονταν μία ηλεκτροβάνα για τον έλεγχο της ροής στο σύστημα και ένας υδρομετρητής. Μετά το φίλτρο σήτας παρεμβάλλονταν ένας συλλέκτης. Ο

συλλέκτης περιελάμβανε 4 ηλεκτροβάνες και 4 υδρομετρητές. Σε κάθε γραμμή του συστήματος υπήρχε ρυθμιστής πίεσης κι έτσι το σύστημα λειτουργούσε με σταθερή πίεση 18 m. Κάθε ηλεκτροβάνα με τον υδρομετρητή της συνδέθηκε με δύο γραμμές άρδευσης που τροφοδοτούσαν δύο πειραματικά τεμάχια. Κάθε πειραματικό τεμάχιο επιφανειακής στάγδην άρδευσης είχε 2 σταλακτηφόρους σωλήνες (Σχήμα 1). Από τις ενδείξεις των υδρομετρητών και την έκταση του κάθε πειραματικού τεμαχίου υπολογίζονταν το ύψος του εφαρμοζόμενου νερού. Επίσης, πάντα καταγράφονταν και η διάρκεια της άρδευσης για κάθε μεταχείριση. Έγινε εφαρμογή τεσσάρων μεταχειρίσεων άρδευσης με το 120% (Α), 100% (Β), 80% (Γ) και 60% (Δ) της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας. Τα πειραματικά τεμάχια που φαίνονται στο Σχήμα 1, χαρακτηρίζονται από ένα γράμμα και έναν αριθμό. Το πρώτο γράμμα χαρακτηρίζει το επίπεδο άρδευσης και ο αριθμός τον αριθμό της επανάληψης. Οι διαστάσεις κάθε πειραματικού τεμαχίου ήταν 5X3=15 m². Το πειραματικό σχέδιο περιελάμβανε τυχαιοποιημένες ομάδες με τέσσερις επαναλήψεις.



Σχήμα 1. Σχηματική διάταξη πειραματικών τεμαχίων καλλιέργειας βιομηχανικής τομάτας αγροκτήματος Λάρισας.

2.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Για την υλοποίηση του ερευνητικού προγράμματος εγκαταστάθηκε πειραματικός αγρός βιομηχανικής τομάτας στη Λάρισα (αγρόκτημα ΤΕΙ) που αρδεύεται με στάγδην άρδευση και εφαρμόζονται διάφορα επίπεδα άρδευσης στα πειραματικά τεμάχια. Από τις αναλύσεις των δειγμάτων εδάφους προέκυψε ότι είναι αμμοαργιλοπηλώδες (Παπαϊωάννου κ.α. 2011., Καλφούντζος κ.α. 2012).

Για την εφαρμογή των αρδεύσεων λαμβάνονται υπόψη υδρολογικά χαρακτηριστικά του εδάφους (FC, PWP, διηθητικότητα). Η εφαρμογή των αρδεύσεων ακολουθεί το ενδιάμεσο μοντέλο προγραμματισμού της άρδευσης, το οποίο αναπληρώνει αθροιστικά την εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας με βάση το πρόγραμμα του FAO-56 και διενεργείται όταν έχει εξαντληθεί από το βάθος του ριζοστρώματος ποσότητα νερού περίπου ίση με την ωφέλιμη υγρασία ανάλογα με το επίπεδο εφαρμογής νερού σε κάθε πειραματικό τεμάχιο.

Τα φυτά βιομηχανικής τομάτας (υβρίδιο *Heinz S3402*) μεταφυτεύτηκαν στο στάδιο των 6-7 πραγματικών φύλλων στο έδαφος, στις 1-2 Μαΐου 2012. Κάθε πειραματικό τεμάχιο περιλαμβάνει

τέσσερις σειρές βιομηχανικής τομάτας σε αποστάσεις 0,45 m μεταξύ των δίδυμων γραμμών και 1,05 m μεταξύ τους. Η θρέψη περιελάμβανε την βασική εφαρμογή 41 Kg/στρ 12-12-17(2 Mg+8S) επί της γραμμής στις 8-6-2012 και σε τέσσερις δόσεις 60 Kg/στρ (34.5-0-0), δύο δόσεις 15 Kg/στρ (13.5-0-46,2) με υδρολίπανση σε όλες τις μεταχειρίσεις. Έγιναν δύο εφαρμογές του οικολογικού μυκητοκτόνου Vacciplant, σε δοσολογία 50 mL/100 L νερού και του οικολογικού εντομοκτόνου Belthirul (3200 wp) σε δοσολογία 50 g/100 L νερού, στο πλαίσιο της φυτοπροστασίας.

Η συγκομιδή πραγματοποιήθηκε στο κόκκινο στάδιο ωρίμανσης σύμφωνα με την κατάταξη του USDA (1997), την 24η Αυγούστου χειρωνακτικά. Από κάθε επανάληψη του πειράματος συλλέχθηκε και ζυγίστηκε χωριστά για κάθε γραμμή η παραγωγή 10 φυτών. Για κάθε πειραματικό τεμάχιο και κάθε επανάληψη εξετάστηκαν τα ποιοτικά χαρακτηριστικά της βιομηχανικής τομάτας στο Εργαστήριο Ποιότητας γεωργικών προϊόντων του Τμήματος Μηχανικής Βιοσυστημάτων του ΤΕΙ Λάρισας.

Για την εύρεση της εμπορεύσιμης και μη (πράσινη-σάπια) παραγωγής ανά πειραματικό τεμάχιο και μεταχείριση συγκομίστηκε μόνο η παραγωγή των 10 μεσαίων φυτών των δύο μεσαίων γραμμών φύτευσης, ενώ για την ανάλυση των δεδομένων που αφορούν στη σύσταση των καρπών (οργανοληπτικά χαρακτηριστικά) χρησιμοποιήθηκε το πλήρως τυχαιοποιημένο σχέδιο, με τέσσερις επαναλήψεις ανά μεταχείριση και πέντε όμοιους καρπούς ανά επανάληψη. Η σύγκριση των μέσων όρων έγινε με τεστ πολλαπλών ευρών Duncan, σε επίπεδο σημαντικότητας 0.05 (στατιστικό πακέτο SPSS 10).

2.3 Υδατοκατανάλωση

Η εφαρμοζόμενη ποσότητα νερού σε κάθε άρδευση υπολογίζονταν από κλιματικά δεδομένα του αυτόματου τηλεμετρικού μετεωρολογικού σταθμού που υπήρχε στη θέση του πειράματος με τη μέθοδο Penman-Moithieth FAO 56. Για τον προσδιορισμό της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας αναφοράς

χρησιμοποιείται η τροποποιημένη μέθοδος Penman-Monteith όπως αυτή περιγράφεται από τον FAO-56 (Allen et al., 1998).

Για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας χρησιμοποιήθηκε ο φυτικός συντελεστής K_c , ο φυτικός συντελεστής ο οποίος για το στάδιο (1) διάρκειας 33 ημερών είχε την τιμή 0,6, στο στάδιο (2) διάρκειας 40 ημερών αυξάνονταν γραμμικά από 0,6 έως 1,15, στο στάδιο (3) διάρκειας 45 ημερών ήταν 1,15 και τέλος στο στάδιο (4) διάρκειας 27 ημερών μειώνονταν γραμμικά από 1,15 έως 0,7. Οι μετρήσεις αναφέρονται στην περίοδο Μαΐου - Αυγούστου 2012.

Μετά τη μεταφύτευση της βιομηχανικής τομάτας έγινε άρδευση για το φύτρωμα της καλλιέργειας, με απλούς εκτοξευτήρες και δόση άρδευσης 15 mm.

Η συνολική βροχόπτωση κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου ανήλθε σε 110,4 mm.

Στον Πίνακα 1, δίνονται τα ύψη άρδευσης καθώς και το συνολικό νερό (άρδευση+βροχή+άρδευση φυτρώματος) για κάθε περίπτωση του πειράματος.

Πίνακας 1. Συνολικά ύψη άρδευσης για κάθε μεταχείριση, ποσοστό αρδευτικού νερού σε σχέση με το ύψος στη μεταχείριση Β και συνολικά ύψη νερού.

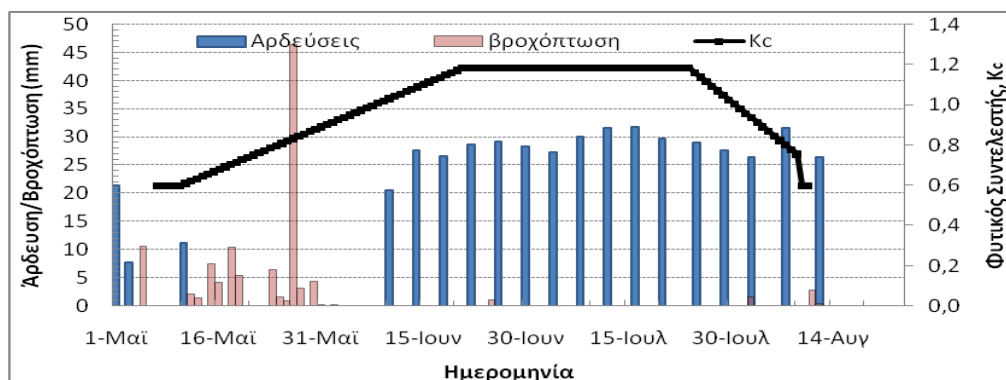
Επίπεδο άρδευσης	Άρδευση mm	% του Β	Σύνολο νερού mm
A	704,61	120	814,61
B	587,18	100	697,58
Γ	469,74	80	580,14
Δ	352,31	60	462,71

Το Σχήμα 2 δείχνει το προγραμματισμό των αρδεύσεων με βάση το πρόγραμμα του FAO-56, τον φυτικό συντελεστή της καλλιέργειας και την ωφέλιμη βροχόπτωση.

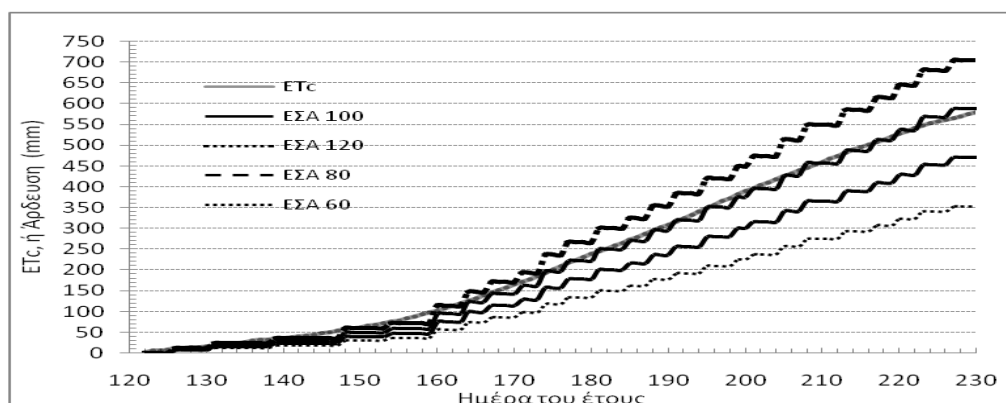
Το Σχήμα 3 δείχνει αθροιστικά το ύψος της άρδευσης σε κάθε μεταχείριση σε σχέση με την εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας.

Πίνακας 2. Ανόργανα διαθέσιμα στοιχεία.

	Μεταχείριση	N(Kg/στρ.) Ανόργανο	P ₂ O ₅ (Kg/στρ.) P-Olsen	K ₂ O (kg/στρ.) Εναλλακτικό
Έναρξη καλλιεργητικής περιόδου	A,B,Γ,Δ	39,19	20,04	218,39
Προσθήκη Λίπανσης	A, B, Γ, Δ	25,27	4,92	16,21
Τέλος καλλιεργητικής περιόδου	A	24,38	19,8	160,75
	B	37,38	18,43	192,15
	Γ	48,38	19,32	201,01
	Δ	42,25	12,69	210,55



Σχήμα 2. Αρδεύσεις υπολογισμένες από το πρόγραμμα FAO-56.



Σχήμα 3. Συνολικό ύψος άρδευσης ανά μεταχείριση του πειράματος σε σχέση με την εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται τα ισοζύγια θρεπτικών στοιχείων στις διαφορετικές μεταχειρίσεις. Επειδή η βιομηχανική τομάτα έχει υψηλές απαιτήσεις σε κάλιο διότι κάθε τόνος της συνολικά παραγόμενης τομάτας αφαιρεί από το έδαφος 4 Kg K₂O, έγινε προσθήκη όλων των βασικών στοιχείων με την ενδεδειγμένη από το πρακτικό λίπανσης θρεπτικών. Η μεταχείριση Α αφαίρεσε από το έδαφος την μεγαλύτερη ποσότητα σε άζωτο και κάλιο όπως φαίνεται και στον Πίνακα 2. Η παραγωγή που έδωσε όμως, δεν δικαιολογεί τόσο μεγάλη απώλεια, άρα λόγω του πλεονάζοντος νερού ενδεχομένως μέρος των στοιχείων αυτών μετακινήθηκαν προς βαθύτερα στρώματα. Αντίθετα η μεταχείριση Δ με το λιγότερο νερό και την χαμηλότερη παραγωγή αφαίρεσε μεγαλύτερες ποσότητες σε άζωτο, φώσφορο και κάλιο, γεγονός που οφείλεται στην δειγματοληψία εδάφους που έγινε κοντά στον σταλακτήρα.

Η καλλιέργεια της βιομηχανικής τομάτας αναπτύσσεται κανονικά σε θερμοκρασίες από 18 έως 28 °C. Η ύπαρξη κατά το έτος 2012 θερμοκρασιών μεγαλύτερων των 35 °C συνετέλεσε στη μείωση της παραγωγής σε σχέση με το έτος 2011 λόγω της αυξημένης προσβολής των καρπών από ηλιοεγκαύματα.

Η μεταχείριση με τη μεγαλύτερη ποσότητα αρδευτικού νερού (Α), παρουσίασε τη μεγαλύτερη εμπορεύσιμη παραγωγή (5,70 kg/m²) και το μεγαλύτερο βάρος καρπού (51,00 g). Το γεγονός ότι η ίδια μεταχείριση έδωσε και τη μεγαλύτερη

απορριπτόμενη παραγωγή (πράσινη=1,82 kg m⁻² και σάπια=2,31 kg m⁻²) δεν αποβαίνει τελικά σε βάρος της μεταχείρισης, γιατί ο λόγος της συνολικής εμπορεύσιμης παραγωγής προς την πράσινη, δεν διέφερε στατιστικώς σημαντικά μεταξύ των μεταχειρίσεων (p=0,077) (Πιν.3). Άλλωστε η ίδια μεταχείριση έδωσε και τη μεγαλύτερη φυτική μάζα (Πιν. 3).

Πίνακας 3. Συνολική εμπορεύσιμη παραγωγή, απορριπτόμενη παραγωγή (Kg m⁻²) τομάτας, αναλογία κόκκινης/πράσινης και βάρος καρπού.

Μετα- χείριση	Αριθμ. Επαναλ. (# καρπών)	Συνολική εμπορεύσιμη παραγωγή (kg m ⁻²)	Απορριπτόμενη παραγωγή (kg m ⁻²) πράσινη σάπια	Αναλογία κόκκινης /πράσινης	Βάρος καρπού (g)	
A	4 (160)	5,70a	1,82a	2,31a	3,13	51,00a
B	4 (160)	4,37b	1,20b	2,57a	3,64	42,80b
Γ	4 (140)	3,13c	0,66c	2,35a	4,74	41,60b
Δ	4 (160)	2,08d	0,84c	2,44a	2,47	43,80b
Sig.		<0,05	<0,05	<0,05	0,077	0,000

Η στατιστική ανάλυση πραγματοποιήθηκε με το κριτήριο Duncan (p<0,05). Τα διαφορετικά γράμματα δηλώνουν ότι υπάρχουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές.

Επειδή η τιμή της βιομηχανικής τομάτας εξαρτάται από το ποσοστό της κόκκινης παραγωγής δηλαδή την αναλογία κόκκινων/πράσινων, έγινε στατιστική επεξεργασία των δειγμάτων ως προς αυτή την παράμετρο (Πιν. 3) από την οποία δεν προέκυψαν διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων (p=0,077). Επομένως οι διαφορετικές δόσεις άρδευσης δεν βελτιστοποιούν την εκροή της συγκεκριμένης καλλιέργειας ως προς αυτή την ποιοτική παράμετρο της παραγωγής.

Τα διαλυτά στερεά συστατικά (ΔΣΣ) διέφεραν στατιστικώς σημαντικά μεταξύ των μεταχειρίσεων.

Την υψηλότερη τιμή (5,35%) παρουσίασαν οι καρποί της μεταχείρισης με τη μικρότερη ποσότητα νερού άρδευσης και τη μικρότερη (4,31%) οι καρποί με τη μεγαλύτερη ποσότητα νερού άρδευσης. Η τιμή αυτής της ποιοτικής παραμέτρου επηρεάζει επίσης την τιμή της βιομηχανικής τομάτας. Όταν κυμαίνεται μεταξύ 4,0 και 4,6% η τιμή για τον παραγωγό είναι 0,04 € kg⁻¹. μεταξύ 4,7 και 5,0% η τιμή αυξάνεται σε 0,06 € kg⁻¹ ενώ όταν τα ΔΣΣ είναι μεγαλύτερα από 5,1% η τιμή γίνεται 0,07 € kg⁻¹ (Πιν. 4).

Στη συγκεκριμένη εργασία, η μικρότερη τιμή (0,04 € kg⁻¹, Πιν. 4) για κάποιον παραγωγό που ενδεχομένως θα ακολουθούσε την άρδευση με 120% της εξατμισοδιαπνοής, θα οδηγούσε εκτός από την μόλυνση του περιβάλλοντος, στην οικονομική του ζημιά λόγω αυτής της παραμέτρου, επειδή ο ίδιος παραγωγός είχε και τη μεγαλύτερη εμπορεύσιμη παραγωγή αλλά και τη χαμηλότερη τιμή (Πιν. 3).

Σχετικά με άλλες ποιοτικές παραμέτρους των καρπών όπως το pH και την ογκομετρούμενη οξύτητα, στη βιβλιογραφία αναφέρονται τιμές για το pH από 4,26 έως 4,82 και την οξύτητα από 0,40 έως 0,91% (Stevens et al., 1986).

Πίνακας 4. Νωπό βάρος της φυτικής μάζας (Kg), τιμές των διαλυτών στερεών συστατικών των καρπών (%) και τιμή πώλησης της βιομηχανικής τομάτας (€ Kg⁻¹).

Μετα- Χείριση	Αριθμ. Επαναλ. (# καρπών)	Νωπό βάρος φυτικής μάζας (kg φυτό ⁻¹)	Αριθμ. Επαναλ. (# καρπών)	ΔΣΣ (%)	Τιμή πώλησης (€ kg ⁻¹)
A	4 (323)	1,91a	4 (120)	4,31c	0,04
B	4 (352)	1,77a	4 (120)	4,77bc	0,06
Γ	4 (252)	1,24b	4 (117)	5,19ab	0,07
Δ	4 (289)	1,28b	4 (120)	5,35a	0,07
Sig.		0,000		<0,000	

Η στατιστική ανάλυση πραγματοποιήθηκε με το κριτήριο Duncan ($p < 0,000$). Τα διαφορετικά γράμματα δηλώνουν ότι υπάρχουν στατιστικές σημαντικές διαφορές.

Ακολούθως στη συγκεκριμένη εργασία δεν βρέθηκαν στατιστικές σημαντικές διαφορές στο pH και την ογκομετρούμενη οξύτητα ($p > 0,05$, Πιν. 5), εφόσον οι παράμετροι που τις επηρεάζουν παρέμεναν ίδιες μεταξύ των μεταχειρίσεων. Οι τιμές του pH κυμάνθηκαν από 4,58 έως 4,72 και η ογκομετρούμενη οξύτητα από 0,44 έως 0,48%.

Πίνακας 5. Τιμές του pH και της ογκομετρούμενης οξύτητας των καρπών (% περιεκτικότητα των καρπών σε κιτρικό οξύ).

Μεταχείριση	Αριθμ. Επαναλ. (# καρπών)	pH	Οξύτητα (%)
A	4 (8)	4,65	0,48
B	4 (8)	4,58	0,48
Γ	4 (7)	4,72	0,47
Δ	4 (8)	4,64	0,44
Sig		=0,163	=0,590

Η στατιστική ανάλυση πραγματοποιήθηκε με το κριτήριο Duncan ($p < 0,05$)

Τα διαφορετικά γράμματα δηλώνουν ότι υπάρχουν στατιστικές σημαντικές διαφορές

4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης έρευνας η οποία έγινε για δεύτερη συνεχόμενη χρονιά στην ίδια περιοχή αλλά σε διπλανό έδαφος έδειξε ότι, η εφαρμογή διαφορετικών επιπέδων νερού άρδευσης,

φαίνεται ότι επηρέασε την ποιότητα και την ποσότητα της βιομηχανικής τομάτας. Συγκεκριμένα επηρέασε τη συνολική εμπορεύσιμη παραγωγή. Το επίπεδο με το 120% της εξατμισοδιαπνοής αν και έδωσε τη μεγαλύτερη παραγωγή, δεν αποβαίνει σε οικονομικό όφελος του παραγωγού, διότι ο παραγωγός έχει χαμηλότερο οικονομικό αποτέλεσμα σε σχέση με το 100%, λόγω της μειωμένης τιμής πώλησης του προϊόντος από το μικρότερο ποσοστό σε διαλυτά στερεά συστατικά. Τα υπόλοιπα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά που εξετάστηκαν δεν επηρεάστηκαν από τα επίπεδα άρδευσης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Κεφάλαια βιβλίων

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.

De Jager J. M. and Kenedy J.A., 1995. Weather-based irrigation scheduling for various farma (commercial and small-scale). Irrigation scheduling; from theory and practice Paper No 8, FAO, Rome.

Doorenbos, J and Kassam, A H, 1979. Yield Response to Water, FAO Irrigation and Drainage Paper No 33 193 p.

Goose, P.G. and Binsted, R. 1964. Tomato Paste, Puree, Juice and Powder, 1st ed Great Britain: Food Trade Press Ltd.

Rinaldi M., G. Trotta, G. Convertini, A.V. Vonella and A. Elia, Alternative Use of nitrogen fertilization of processing tomatoes of The Agrarian Informer, **11** (2003), pp 75–78.

Stevens M. A., Rick C.M. 1986. Genetics and breeding In: Atherton J.G and Rudich J. (Editors) The Tomato Crop Chapman and Hall New York pp 35-109.

United States Department of Agriculture (USDA) 1997. Agricultural Marketing Service. Fruit and Vegetable Division. Fresh Products Branch. United States Standards for Grades of Fresh Tomatoes. Effective October 1, 1991 (Reprinted - January 1997). <http://www.ams.usda.gov/standards/tomatfrh>

Πρακτικά συνεδρίων

Αλεξίου Ι, Κωτσόπουλος Σ, Καλφούντζος Δ, και Βύρλας Π, 2000. Εκτίμηση της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής μέσω συναρτήσεων διαθεσιμότητας της εδαφικής υγρασίας. 8ο Πανελλήνιο Συνέδριο, Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης, Αθήνα, Πρακτικά, 493-500.

Καλφούντζος Δ., Κόκκορα Μ., Βύρλας Π., 2012. Σχέση άρδευσης και παραγωγής βιομηχανικής Τομάτας. Πρακτικά 2^{ου} Κοινού Συνεδρίου Ε.Υ.Ε.=Ε.Ε.Δ.Υ.Π., Πάτρα. 825-833 Κεφάλαια βιβλίων

Παπαϊωάννου Χ., Καλφούντζος Δ., Βύρλας Π., Κόκκορα Μ., Κουτσιανόπουλος Ε., Μάντζιος Ν., Καρακντά Φ. 2011. Σχέση άρδευσης και ποιοτικών χαρακτηριστικών βιομηχανικής τομάτας. Πρακτικά 7^{ου} Συνεδρίου, ΕΓΜΕ, Αθήνα.

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΜΗ ΝΤΑΡΣΙΑΝΗΣ ΡΟΗΣ ΑΠΟ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΑΝΤΛΗΣΗΣ ΜΕ ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΗ ΠΑΡΟΧΗ ΦΡΕΑΤΙΟΥ ΜΕΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ ΣΤΗΝ ΠΙΕΡΙΑ

Δ. Καραμούζης¹, Δ. Καρπούζος² και Π. Γεωργίου³

Τομέας Εγγείων Βελτιώσεων, Εδαφολογίας και Γεωργικής Μηχανικής, Γεωπονική Σχολή, Αριστοτέλειο

Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 54124 Θεσσαλονίκη

E-mail: ¹kardia@agro.auth.gr, ²dimkarp@agro.auth.gr, ³pantaz@agro.auth.gr

Οι περιορισμένοι οικονομικοί πόροι δεν επιτρέπουν πάντοτε τη διάνοιξη φρεατίων παρατήρησης σε διάφορες αποστάσεις από την υδρογέωση άντλησης και έτσι συχνά τοποθετείται μόνο ένα πιεζόμετρο στην ίδια την υδρογέωση. Σε αυτή την περίπτωση, η ροή είναι μη νταρσιανή και περιέχει και τον όρο των απωλειών της υδρογέωσης. Οι απώλειες της υδρογέωσης είναι συνάρτηση της αποτελεσματικής ακτίνας r_e , του συντελεστή των απωλειών του φορτίου του φρεατίου C και του εκθέτη n της παροχής άντλησης, που συνιστούν και τις παραμέτρους της μη νταρσιανής ροής. Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται η πορεία εφαρμογής της προτεινόμενης μεθόδου χρησιμοποιώντας τις αντίστοιχες αναλυτικές λύσεις της διαδικασίας του Rorabaugh για άντληση του υδροφορέα από φρεάτιο μερικής διάτρησης με μεταβαλλόμενη παροχή. Η εφαρμογή για τον υπολογισμό των παραμέτρων της μη νταρσιανής ροής γίνεται στον υδροφορέα του Δίου του Νομού Πιερίας. Η εκτίμηση των τιμών των παραμέτρων αυτών συμβάλλει στην ακριβέστερη προσέγγιση των προβλημάτων διαχείρισης των υδρογεωτήσεων και των υδροφορέων της περιοχής.

Λέξεις κλειδιά: Μη νταρσιανή ροή, υπολογισμός παραμέτρων, απώλειες φορτίου, δοκιμαστική άντληση, φρεάτια μερικής διάτρησης

NON DARCY FLOW PARAMETERS ESTIMATION USING VARIABLE FLOW PUMPING DATA OF A PARTIAL PENETRATION WELL IN PIERIA (KATERINI) REGION

D. Karamouzis¹, D. Karpouzos² and P. Georgiou³

Department of Hydraulics, Soil Science and Agricultural Engineering, Faculty of Agriculture, Aristotle University of Thessaloniki, 54124 Thessaloniki

E-mail: ¹kardia@agro.auth.gr, ²dimkarp@agro.auth.gr, ³pantaz@agro.auth.gr

Limited financial resources do not always permit to install multiple observation wells or piezometers at various distances from the pumping wells. Thus, it is often that only one piezometer is installed at the location of the pumping well. In this case, the flow is non Darcian and the well losses should be taken into account. These losses are a function of the effective radius r_e , the coefficient C and the exponent n of the discharge which are the parameters of the non Darcy flow. In this paper a parameter estimation methodology is presented based on the implementation of the corresponding solutions of the Rorabaugh procedure for pumping of the partial penetration wells with variable flow. An application is given for the estimation of non Darcy flow parameters in the aquifer of Dion in Pieria. The determination of these values contributes to more accurate decision making in groundwater management.

Key words: Non Darcy flow, well losses, aquifer testing, parameter estimation, partial penetration wells

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Όπως είναι ήδη γνωστό, από τα στοιχεία των δοκιμαστικών αντλήσεων υπολογίζονται ο συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας K και ο συντελεστής αποθήκευσης S , εφαρμόζοντας τη μέθοδο του Theis, του Jacob ή του Ven Te Chow.

Όμως οι μέθοδοι αυτές εφαρμόζονται για την ανάλυση των δεδομένων των δοκιμαστικών αντλήσεων στους κλειστούς υπό πίεση ή και με κατάλληλη τροποποίηση και στους ελεύθερους υδροφορείς, όταν τα φρεάτια άντλησης δεν είναι μερικής φίλτρωσης, δηλαδή όταν οι διάτρητοι σωλήνες καταλαμβάνουν ολόκληρο το πάχος των υδροφορέων. Σε αντίθετη περίπτωση θα πρέπει οι υπολογισμοί να γίνονται εφαρμόζοντας την ανάλυση των διαθέσιμων δεδομένων των δοκιμαστικών αντλήσεων με την τροποποίηση του Hantush είτε στη

μέθοδο του Theis είτε στη μέθοδο του Jacob, όταν οι χρόνοι άντλησης είναι αντίστοιχα σχετικά μικροί ή σχετικά μεγάλοι (Καραμούζης, 2013)

Είθισται, για λόγους απλοποίησης να θεωρείται ότι η πιεζομετρική πτώση σε μια υδρογέωση σε ένα υδροφορέα οφείλεται μόνο στις απώλειες φορτίου λόγω της ροής προς την υδρογέωση άντλησης. Στην πράξη όμως στην υδρογέωση παρατηρείται μια επιπρόσθετη πτώση στάθμης, λόγω της ροής μέσω του φίλτρου του πηγαδιού και της συνήθως τυρβώδους ροής, που επικρατεί εντός του πηγαδιού, προς το συγκρότημα άντλησης (Bear, 1979). Επειδή οι απώλειες αυτές σχετίζονται με την τυρβώδη ροή εντός του πηγαδιού, η πιεζομετρική πτώση λόγω της μη νταρσιανής ροής είναι ανάλογη της νιοστής δύναμης της παροχής άντλησης, Q^n , όπου η τιμή του εκθέτη n είναι σταθερή και

μεγαλύτερη της μονάδας (Todd, 2010). Η μη νταρσιανή ροή γύρω από το πηγάδι είναι ιδιαίτερα σημαντική όταν η παροχή άντλησης είναι μεγάλη, η κατάσταση της υδρογεώτρησης μη ικανοποιητική και η σταθερή απωλειών παίρνει μεγάλες τιμές.

Στην παρούσα εργασία λαμβάνεται υπόψη η συμβολή τόσο της Νταρσιανής όσο και της μη Νταρσιανής ροής. Η απάλειψή της μπορεί να δώσει μικρότερες τιμές στον υπολογισμό των αποστάσεων τοποθέτησης νέων υδρογεωτρήσεων σε έναν υδροφορέα, οδηγώντας έτσι σε μη ορθή διαχείριση του υδατικού δυναμικού του (Καραμούζης και Τερζίδης, 1983). Οι περιορισμένοι οικονομικοί πόροι δεν επιτρέπουν πάντοτε τη διάνοιξη φρεατίων παρατήρησης σε διάφορες αποστάσεις από την υδρογεώτρηση άντλησης και έτσι συχνά τοποθετείται μόνο ένα πιεζόμετρο στην ίδια την υδρογεώτρηση. Σε αυτή την περίπτωση, η ροή είναι μη νταρσιανή και περιέχει και τον όρο των απωλειών της υδρογεώτρησης. Οι απώλειες της υδρογεώτρησης είναι συνάρτηση της αποτελεσματικής ακτίνας r_e , του συντελεστή των απωλειών του φορτίου του φρεατίου C και του εκθέτη n της παροχής άντλησης, που συνιστούν και τις παραμέτρους της μη νταρσιανής ροής. Έτσι, στην παρακάτω ενότητα παρουσιάζεται η μεθοδολογία προσδιορισμού των παραμέτρων της μη Νταρσιανής ροής.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Έστω υδροφορέας στον οποίο πραγματοποιείται δοκιμαστική άντληση με μεταβαλλόμενη παροχή και έχοντας διαθέσιμες m τιμές της πιεζομετρικής πτώσης (s_{oi} , $i=1,2,...,m$) στην υδρογεώτρηση άντλησης, οι οποίες αντιστοιχούν στις τιμές της παροχής Q_i , θα ισχύει η παρακάτω σχέση (Hantush, 1964):

$$s_{oi} = s_{ni} + C \cdot Q_i^n \quad (1)$$

όπου s_{ni} και CQ_i^n είναι η πιεζομετρική πτώση για νταρσιανή και μη νταρσιανή ροή, αντίστοιχα.

Αν θεωρηθεί ότι στη σχέση (1) η τιμή της σταθερής n είναι ίση με 2, τότε προφανώς έχουμε:

$$s_{oi}/Q_i = B_r + C \cdot Q_i \quad (2)$$

Η σχέση αυτή δείχνει ότι όταν τα διαθέσιμα δεδομένα s_{oi}/Q_i και Q_i , των διαφόρων βαθμίδων $i=1,2,...,m$, της δοκιμαστικής άντλησης, τοποθετηθούν σε ένα χιλιοστομετρικό χαρτί, λαμβάνεται μία ευθεία γραμμή, η οποία έχει κλίση C και επιπρόσθετα για $Q_w=0$ λαμβάνεται η τιμή της συνάρτησης B_r από τη σχέση:

$$B_r = (s_o/Q)_0 \quad (3)$$

Με γνωστή πλέον την τιμή της B_r και του σχετικού χρόνου t , στον οποίο αντιστοιχούν οι τιμές της s_o , υπολογίζεται η τιμή της αποτελεσματικής ακτίνας r_e του φρεατίου άντλησης από τη σχέση του Jacob:

$$B_r = \frac{2.3}{4\pi T} \log \left(\frac{2.25Tt}{r_e^2 S} \right) \quad (4)$$

όπου T και S είναι η διοχευτικότητα και η αποθηκευτικότητα του υδροφορέα αντίστοιχα.

Τα στάδια της προτεινόμενης μεθοδολογίας είναι τα εξής:

- Τα δεδομένα της δοκιμαστικής άντλησης με μεταβαλλόμενη παροχή δηλαδή της βαθμωτής δοκιμαστικής άντλησης τοποθετούνται σε ημιλογαριθμικό χαρτί με τις τιμές των s_o στην αριθμητική κλίμακα και τις τιμές του χρόνου t στη λογαριθμική κλίμακα.
- Επιλέγεται ένας ενδεικτικός χρόνος t_1^* της περιοχής δεδομένων της πρώτης βαθμίδας και σημειώνονται οι σχετικοί αντίστοιχοι χρόνοι στις υπολοίπες βαθμίδες, οι οποίοι θα είναι: $t_1^* = t_2^* = \dots = t_n^*$.
- Προεκτείνονται τα δεδομένα κάθε βαθμίδας και υπολογίζονται οι διαφορές των πιεζομετρικών πτώσεων Δs_{oi} , οι οποίες αντιστοιχούν στους σχετικούς χρόνους t_i^* . Στη συνέχεια υπολογίζονται οι τιμές των $s_{oi} = \sum \Delta s_{oi}$ και από αυτές οι τιμές των λόγων s_{oi}/Q_i .
- Τοποθετούνται τα δεδομένα των (s_{oi}/Q_i) και Q_i σε χιλιοστομετρικό χαρτί και φέρεται η ευθεία που περνάει ανάμεσα από αυτά τα δεδομένα.
- Υπολογίζεται η κλίση της ευθείας αυτής, οπότε ο συντελεστής C θα είναι:

$$C = \frac{\Delta [s_o(t_i^*) / Q_i]}{\Delta Q_i} \quad (5)$$

- Προεκτείνοντας την ευθεία αυτή διαβάζεται η τιμή του λόγου $(s_o/Q)_0$, η οποία αντιστοιχεί στην τιμή $Q_0=0$. Έτσι το B_r θα δίνεται από τη σχέση (3).
- Με γνωστές τις τιμές των B_r , t_1^* , KB και S και λύνοντας την εξίσωση (4) ως προς r_e^2 παίρνουμε:

$$r_e^2 = \frac{2.25KBt}{S} \exp(-4\pi \cdot KB \cdot B_r) \quad (6)$$

από την οποία υπολογίζεται η τιμή της αποτελεσματικής ακτίνας r_e .

Όταν στην εξίσωση (1) η τιμή του εκθέτη n είναι άγνωστη και διάφορη του 2, θα πρέπει να υπολογιστεί. Η διαδικασία που ακολουθείται έχει αναπτυχθεί από τον Rorabaugh (1953). Σύμφωνα με αυτόν η εξίσωση (1) είναι:

$$s_{oi}/Q_i - B_{ri} = C \cdot Q_i^{n-1} \quad (7)$$

από την οποία παίρνουμε:

$$\log(s_{oi}/Q_i - B_{ri}) = \log C + (n-1) \log Q_i \quad (8)$$

Η μέθοδος αυτή προκύπτει από μία εμπειρική λύση, η οποία, όπως φαίνεται και από τη σχέση (8), παίρνεται γραφικά από την ευθεία γραμμή ενός λογαριθμικού χαρτιού. Κατ' αρχήν, παραδεχόμαστε ορισμένες τιμές του B_{ri} . Στη συνέχεια τοποθετούνται τα δεδομένα των $(s_{oi}/Q_i - B_{ri})$ και Q_i στο λογαριθμικό χαρτί. Η λύση που παίρνεται αντιστοιχεί στην τιμή του B_r , η οποία καθορίζει μία ευθεία γραμμή. Για την τιμή $Q_i=1$, από τη σχέση (8) θα είναι:

$$C = (s_o/Q - B_r)_{Q_i=1} \quad (9)$$

Αν πάνω στην ευθεία αυτή πάρουμε δύο τιμές Q_1 και Q_2 που απέχουν ένα λογαριθμικό κύκλο, σύμφωνα με τη σχέση (8) θα έχουμε:

$$\log(s_o/Q - B_r)_2 - \log(s_o/Q - B_r)_1 = (n-1) \log\left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)$$

από την οποία επειδή $\log(Q_2/Q_1)=1$, παίρνουμε:

$$n = 1 + \log\left(\frac{s_o/Q - B_r)_2}{(s_o/Q - B_r)_1}\right) \quad (10)$$

Επίσης, με τη βοήθεια της εξίσωσης (7) για τις δύο παροχές άντλησης Q_1 και Q_2 θα έχουμε αντίστοιχα:

$$s_{o1}/Q_1 - B_r = CQ_1^{n-1} \quad (11a)$$

$$s_{o2}/Q_2 - B_r = CQ_2^{n-1} \quad (11b)$$

Διαιρώντας τις σχέσεις αυτές μεταξύ τους και λύνοντας ως προς B_r παίρνουμε:

$$B_r = \frac{\frac{s_{o1}}{Q_1} - \frac{s_{o2}}{Q_2} \left(\frac{Q_1}{Q_2}\right)^{n-1}}{1 - \left(\frac{Q_1}{Q_2}\right)^{n-1}} \quad (12)$$

Η σχέση αυτή χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της B_r , καθώς ο εκθέτης n μόλις υπολογίστηκε με τη βοήθεια της εξίσωσης (10) και οι τιμές s_{o1} , s_{o2} , Q_1 και Q_2 είναι γνωστές από τα δεδομένα της δοκιμαστικής άντλησης. Η γενική πορεία της μεθόδου ακολουθεί τα εξής βήματα:

1. Για διάφορες τιμές των B_{ri} υπολογίζονται οι τιμές $(s_{oi}/Q - B_{ri})$ από τα δεδομένα των πιεζομετρικών πτώσεων s_{oi} , τα οποία αντιστοιχούν στις διάφορες τιμές της παροχής Q_i των διαφόρων βαθμίδων, αλλά στον ίδιο χρόνο t^* .

2. Τα δεδομένα του προηγούμενου βήματος 1 τοποθετούνται σε λογαριθμικό χαρτί και παίρνεται μία ομάδα καμπυλών, οι οποίες αντιστοιχούν στις διάφορες τιμές των B_{ri} .

3. Με βάση αυτές τις καμπύλες φέρεται η ευθεία γραμμή που βρίσκεται ανάμεσα σε αυτές και εκτιμάται η τιμή του B_r με την οποία τα δεδομένα δίνουν την ευθεία γραμμή.

4. Διαβάζονται πάνω στην ευθεία γραμμή οι τιμές των $(s_{oi}/Q - B_r)_1$ και $(s_{oi}/Q - B_r)_2$, οι οποίες αντιστοιχούν σε δύο τιμές παροχών που απέχουν ένα λογαριθμικό κύκλο, δηλαδή είναι $Q_2/Q_1=10$.

5. Υπολογίζεται η τιμή του n , με τη βοήθεια των τιμών αυτών, από τη σχέση (10).

6. Υπολογίζεται η τιμή της B_r με τη βοήθεια της εξίσωσης (12) χρησιμοποιώντας τα δεδομένα δύο βαθμίδων άντλησης.

7. Διαβάζεται η τιμή $(s_o/Q - B_r)_0$, η οποία αντιστοιχεί στην τιμή $Q_o=1$, οπότε από τη σχέση (8) προκύπτει ότι:

$$C = (s_o/Q - B_r)_0 \quad (13)$$

8. Όπως και στο βήμα 7 της μεθόδου για $n=2$, υπολογίζεται η τιμή της αποτελεσματικής ακτίνας r_e , με τη βοήθεια της σχέσης (8) αφού είναι γνωστές πλέον οι τιμές των B_r , t_i^* , KB και S .

3. ΕΦΑΡΜΟΓΗ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η περιοχή μελέτης αφορά την λεκάνη της Κατερίνης (Πιερίας) και ειδικότερα το υδροφόρο σύστημα του Ολύμπου. Το τελευταίο αποτελείται από τον ορεινό όγκο του Ολύμπου και τμήμα της

πεδιάδας της Κατερίνης μέχρι τον ποταμό Αίσονα (Υδρογαία 1975; Καραμούζης κ. άλ., 1985, 1986; Καβαλιεράτου 2007). Στους σχηματισμούς της περιμέτρου είναι συνεχής και συμπεριφέρεται ως υδροφορέας ελεύθερης επιφάνειας ενώ στο πεδινό τμήμα της λεκάνης λόγω της αργιλλικής επικάλυψης ο υδροφορέας βρίσκεται υπό πίεση. Η μεθοδολογία της παρούσας εργασίας βασίστηκε σε στοιχεία δοκιμαστικών αντλήσεων που έγιναν στην υδρογεώτρηση μερικής διάτρησης B3 της περιοχής του Δίου (Υδροέρευνα, 1981).

Ο υδροφορέας στην περιοχή του Δίου είναι ένας ελεύθερος πολύ βαθής υδροφορέας. Για τον υπολογισμό των υδρογεωλογικών σταθερών του υδροφορέα εφαρμόστηκε η μέθοδος των Hantush-Theis (Kruseman and de Ridder, 1970), επειδή η υδρογεώτρηση άντλησης στην οποία έγιναν οι μετρήσεις της πιεζομετρικής πτώσης είναι μερικής διάτρησης και εισάγονται επιπρόσθετα η διορθωμένη πιεζομετρική πώση (Τερζίδης και Καραμούζης, 1985). Για τον υπολογισμό της υδραυλικής αγωγιμότητας K , του πάχους της πιεζομετρικής επιφάνειας από το αδιαπέρατο υπόστρωμα B , της διοχετευτικότητας $T=KB$ και της αποθηκευτικότητας S χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα της Υδροέρευνας (1981) που αναφέρονται στην άντληση του πρώτου βήματος (Καραμούζης κ. άλ., 1985). Με βάση την παραπάνω επεξεργασία πάρθηκαν οι τιμές $K=6.804 \times 10^{-2}$ m/min, $(S/B)=4.218 \times 10^{-6}$ m⁻¹, $B=726.66$ m, οπότε τελικά οι τιμές των T και S είναι $71193,6$ m²/ημέρα= 49.44 m²/min και $3.065 \cdot 10^{-3}$, αντίστοιχα.

Τα δεδομένα της δοκιμαστικής άντλησης της υδρογεώτρησης B-3 παρουσιάζονται στις στήλες 1 και 2 του Πίνακα 1, τα οποία αντιστοιχούν στο σχετικό χρόνο $t^*=60$ min. Ακολουθώντας τα βήματα 1 έως 8 της προηγούμενης παραγράφου για $n \neq 2$, υπολογίζονται οι τιμές, για ορισμένες τιμές των B_r , των όρων $s_o/Q - B_r$ και συμπληρώνονται οι στήλες (4) έως (8). Τα δεδομένα αυτά τοποθετούνται στο λογαριθμικό χαρτί του Σχήματος 1, και φέρονται οι αντίστοιχες καμπύλες. Με βάση αυτές τις καμπύλες φέρεται η ευθεία γραμμή η οποία αντιστοιχεί σε μια του B_r . Εκλέγοντας δύο τιμές της παροχής Q οι οποίες να απέχουν ένα λογαριθμικό κύκλο, $Q_1=100$ και $Q_2=1000$, διαβάζονται οι αντίστοιχες τιμές $s_o/Q - B_r = 1.34 \cdot 10^{-3}$ και $s_o/Q - B_r = 3.25 \cdot 10^{-3}$. Αντικαθιστώντας τις τιμές αυτές στη σχέση (10), προκύπτει:

$$n = 1 + \log\left(\frac{3.25 \cdot 10^{-3}}{1.34 \cdot 10^{-3}}\right) = 1.3848 \quad (14)$$

Από την παραπάνω σχέση με τη βοήθεια των σηλών (1) και (3) και για $n=1.3848$, υπολογίζεται η τιμή του B_r για $t^*=60$ min:

$$B_r = \frac{[2.433 - 2.675 \cdot (300/400)^{(1.3848-1)}] \cdot 10^{-3}}{1 - (300/400)^{(1.3848-1)}} = (15)$$

$$= 3.657 \cdot 10^{-4} \text{ hr/m}^2 = 2.19408 \cdot 10^{-2} \text{ min/m}^2$$

Πίνακας 1: Επεξεργασία δεδομένων υπολογισμού των n , r_e και C .

Παροχή Q_i (m^3/hr)	Πιεζ. πτώση s_{oi} (m)	$s_{oi}/Q_i \cdot 10^{-3}$ (hr/m^2)	Τιμές του όρου $(s_{oi}/Q_i - B_T) \cdot 10^{-3}$				
			Τιμές του B_T				
			$14 \cdot 10^{-4}$	$8.5 \cdot 10^{-4}$	$4.0 \cdot 10^{-4}$	$3.0 \cdot 10^{-4}$	$2.0 \cdot 10^{-4}$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
300	0.73	2.433	1.033	1.583	2.033	2.133	2.233
400	1.07	2.675	2.275	1.825	2.275	2.375	2.475

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (6) τις τιμές $T = 49.44 \text{ m}^2/\text{min}$, $S = 3.065 \times 10^{-3}$, $t^* = 60 \text{ min}$, $B_T = 2.19408 \times 10^{-2} \text{ min}/m^2$, παίρνουμε:

$$r_e^2 = \frac{2.25 \cdot 49.44 \cdot 60}{3.065 \cdot 10^{-3}} \cdot \exp(-4 \cdot 3.14 \cdot 49.44 \cdot 2.19408 \cdot 10^{-2}) = 2.636 \text{ m}^2 \quad (16)$$

Έτσι η αποτελεσματική ακτίνα θα είναι $r_e = 1.62 \text{ m}$.

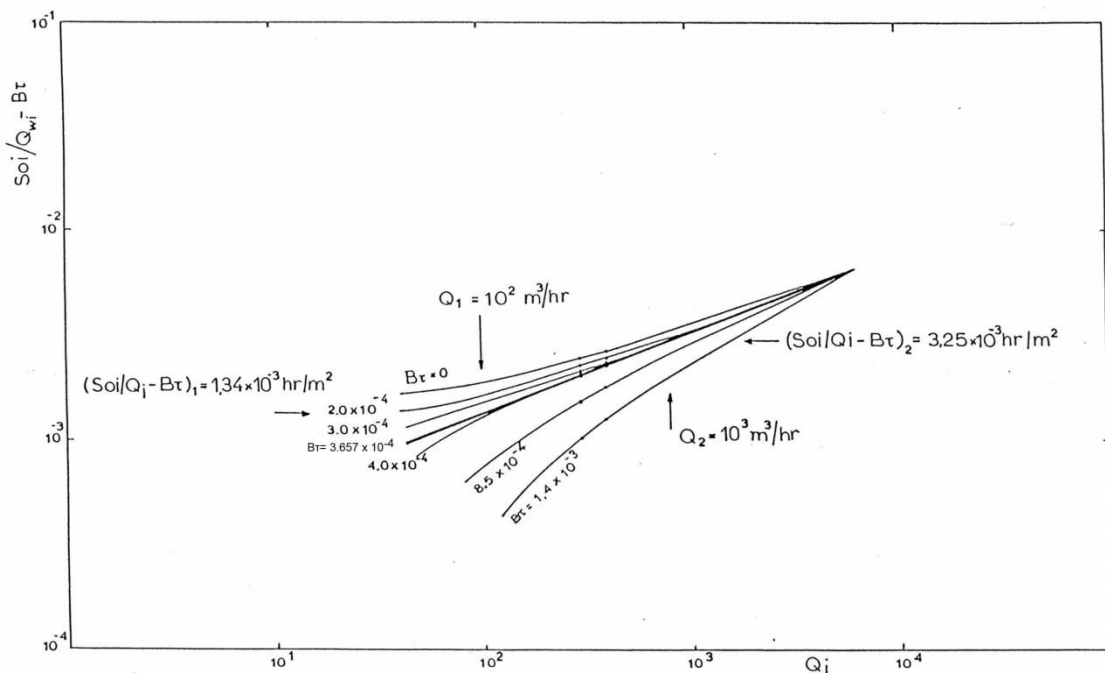
Για τον υπολογισμό του συντελεστή απωλειών C χρησιμοποιείται η εξίσωση (1) με $s_{ri} = B_T \cdot Q$ και τα δεδομένα της πρώτης βαθμίδας της δοκιμαστικής άντλησης, που είναι $s_{o1} = 0.73 \text{ m}$ και $Q_1 = 300 \text{ m}^3/\text{hr}$. Επειδή $n = 1.3848$ και $B_T = 3.657 \cdot 10^{-4} \text{ hr}/m^2$ από την εξίσωση (1), προκύπτει:

$$C = \frac{s_{oj} - B_T Q_j}{Q_j^n} = \frac{(0.73 \text{ m}) - (3.657 \cdot 10^{-4} \text{ hr}/m^2)(300 \text{ m}^3/\text{hr})}{300^{1.3848}} = 2.303 \cdot 10^{-4} \frac{\text{hr}^n}{m^{3n-1}} \quad (17)$$

Για τον έλεγχο των τιμών των B_T , r_e και C αντικαθιστούμε την παροχή της δεύτερης βαθμίδας της δοκιμαστικής άντλησης στην παρακάτω εξίσωση, οπότε παίρνουμε:

$$s_{o2} = B_T Q_2 + C Q_2^n = (3.657 \cdot 10^{-4} \text{ hr}/m^2)(400 \text{ m}^3/\text{hr}) + (2.303 \cdot 10^{-4})(400)^{1.3847} = 1.070 \text{ m} \quad (18)$$

Όπως παρατηρείται, η τιμή αυτή είναι ίδια με την πραγματική τιμή της πιεζομετρική πτώσης στο φρεάτιο άντλησης, η οποία μετρήθηκε στο χρόνο $t = 60 \text{ min}$. Συνεπώς οι τιμές των B_T , r_e και C είναι ορθές.



Σχήμα 1. Ανάλυση δεδομένων υπολογισμού των B_T , r_e και C στην υδρογεώτρηση B-3 (Δίον Πιερίας).

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκε η μεθοδολογία υπολογισμού των παραμέτρων του φρεατίου άντλησης που απαιτούνται στη συνήθη περίπτωση όπου τα δεδομένα των διαθέσιμων μετρήσεων πιεζομετρικής πτώσης περιορίζονται μόνο σε αυτά του πιεζομέτρου της υδρογεώτρησης. Στην περίπτωση αυτή πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η συνιστώσα της μη νταρσιανής ροής, με παραμέτρους το συντελεστή C, τον εκθέτη n της παροχής και την αποτελεσματική ακτίνα r_e της υδρογεώτρησης, κατά τον υπολογισμό της πιεζομετρικής πτώσης. Ιδιαίτερα δε, η μεθοδολογία που παρουσιάστηκε συνιστάται όταν η υδρογεώτρηση είναι μερικής διάτρησης, όπως συνήθως συμβαίνει σε υδροφορείς μεγάλου πάχους.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Bear, J., 1979. *Hydraulics of groundwater*, McGraw Hill.

Hantush, M.S., 1964α. Drawdown around wells of variable discharge. *J. of Geoph. Res.*, 69(20):4221-4235.

Hantush, M.S., 1964β. *Hydraulics of Wells*. In *Hydroscience*, vol. 1, Academic Press, New York.

Καβαλιεράτου, Σ., 2007. Ανάλυση και διερεύνηση της βιώσιμης διαχείρισης των υπογείων νερών με μαθηματικά μοντέλα σε περιβάλλον GIS. Διδακτορική Διατριβή. Γεωπονική Σχολή ΑΠΘ.

Καραμούζης, Δ.Ν., 2013. *Υδραυλική και Διαχείριση Υπόγειων Υδάτων*. Υπό Έκδοση.

Καραμούζης, Δ.Ν., Καλαϊτζίδου-Παϊίκου, Ν., Παπαμιχαήλ, Δ., Κωτσόπουλος, Σ. και Καλαμπίδης, Δ., 1985. Μελέτη Υδρογεωλογικών Παραμέτρων. Έκθεση στο Ερ. Πρόγραμμα: Κατάρτιση Μαθηματικού Μοντέλου Πεδιάδας Πιερίας, Α.Π.Θ.

Καραμούζης, Δ.Ν., Καλαϊτζίδου-Παϊίκου, Ν., Παπαμιχαήλ, Δ., Κωτσόπουλος, Σ. και Καλαμπίδης, Δ., 1986. Ανάλυση Δεδομένων Δοκιμαστικών Αντλήσεων. Έκθεση στο Ερ. Πρόγραμμα: Κατάρτιση Μαθηματικού Μοντέλου Πεδιάδας Πιερίας, Α.Π.Θ.

Καραμούζης, Δ.Ν., Τερζίδης, Γ.Α., 1983. Υπολογισμός απόστασης φρεατίων άντλησης με νταρσιανή και μη νταρσιανή ροή. *Υδροτεχνικά*, 1(1):79-92.

Kruseman, G.P., De Ridder, N.A., 1970. *Analysis and Evaluation of Pumping Test Data*. Intern. Inst. for Land Recl. and Impr. Bul. 11, Wageningen, Netherlands.

Rorabaugh, M.I., 1953. Graphical and theoretical analysis of step drawdown test of artesian well, *PASCE*, 79(362):1-23.

Τερζίδης, Γ.Α., Καραμούζης, Δ.Ν., 1985. *Υδραυλική Υπογείων Νερών*. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.

Todd, D.K., 2010. *Groundwater Hydrology*. John Wiley and Sons.

Υδρογαία, 1975. *Υδρογεωλογική προμελέτη περιοχής Κατερίνης Πιερίας*.

Υδροέρευνα ΑΕ, 1981. *Άρδευση περιοχής Κατερίνης από υπόγεια νερά*.

ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΣΥΣΚΕΥΗΣ RICHARDS ΚΑΙ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ

Γιώργος Μπουραζάνης¹, Γιώργος Κάργας², Πέτρος Κερκίδης³

¹ Δ/ση Αγροτικής Οικονομίας & Κτηνιατρικής, Περιφερειακή Ενότητα Λακωνίας, Περιφέρεια Πελοποννήσου, 2^ο χλμ. Σπάρτης Γυθείου, 23100 Σπάρτη,

^{2,3} Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Ιερά Οδός 75, 11855 Αθήνα

gbourazanis@windtools.gr, kargas@aia.gr, kerkides@aia.gr

Η γνώση των υδραυλικών ιδιοτήτων των γεωργικών εδαφών και ειδικότερα της χαρακτηριστικής καμπύλης υγρασίας (ΧΚΥ) είναι μεγάλης σημασίας διότι υπεισέρχεται σε κάθε πτυχή της διαχείρισης του αρδευτικού νερού. Δεδομένα για την παρουσίαση της ΧΚΥ προσδιορίζονται ευκολότερα στο εργαστήριο απ' ό,τι στον αγρό. Υπάρχουν αρκετές εργαστηριακές μεθοδολογίες για τον προσδιορισμό ζευγών τιμών της, όπως οι συσκευές Haines και Richards, τα κύτταρα πίεσης κ.ά.. Με την παρούσα εργασία, δοκιμάζεται μία νέα μεθοδολογία προσδιορισμού ζευγών τιμών της ΧΚΥ, με τη ταυτόχρονη χρήση συσκευής Richards και ενσωματωμένης σ' αυτή διηλεκτρικής συσκευής. Ο συνδυασμός αυτός επιτρέπει τη σχετικά εύκολη εφαρμογή φορτίου πίεσης, H , με τη συσκευή Richards, ενώ συγχρόνως η διηλεκτρική συσκευή προσδιορίζει την κατ' όγκο υγρασία, Θ , του δείγματος. Με την παρούσα μεθοδολογία δεν απαιτείται η διακοπή της διαδικασίας εφαρμογής πίεσης, το άνοιγμα της συσκευής και ο ανεξάρτητος προσδιορισμός της κατά μάζα, πρώτα, υγρασίας του δείγματος (Θ_m) και ακολούθως, μέσα από τον προσδιορισμό της φαινομενικής πυκνότητας των στερεών συστατικών του εδάφους, ρ_s , της κατ' όγκο υγρασίας (Θ_v). Παρουσιάζονται ΧΚΥ, αδιατάρακτων δειγμάτων που ελήφθησαν από κατατομή, σε βάθη 0-10 και 10-20 cm όπως αυτές προσδιορίστηκαν με τη χρήση του πιο πάνω συνδυασμού συσκευών και διαταραγμένων δειγμάτων με την κλασική μεθοδολογία της συσκευής Richards. Οι χρησιμοποιηθείσες συσκευές και οι πειραματικές μεθοδολογίες παρουσιάζονται αναλυτικά. Γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο μεθοδολογιών και εξετάζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους. Τέλος, σχολιάζονται ζητήματα, όπως ο η ευκολία της μεθόδου, ο χρόνος που απαιτείται για λήψη μετρήσεων και εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα

Λέξεις κλειδιά: προσδιορισμός χαρακτηριστική καμπύλη υγρασίας, συσκευή Richards, διηλεκτρική συσκευή

DETERMINATION OF SOIL MOISTURE CHARACTERISTIC CURVE USING RICHARD'S DEVICE AND DIELECTRIC SENSOR

George Bourazanis¹, George Kargas², Petros Kerkides³

¹Department of Rural Economy and Veterinary of Regional Government of Laconia, Sparta, Laconia, 23100, Greece

^{2,3} Laboratory of Agricultural Hydraulics, Department of Natural Resources development and Agricultural Engineering University of Athens, 11855, Athens, Greece

gbourazanis@windtools.gr, kargas@aia.gr, kerkides@aia.gr

The knowledge of the hydraulic properties of agricultural soils and especially of the soil moisture characteristic curve (SMCC) is an important issue, which has to do with every aspect of the management of irrigated agriculture. Determination of the SMCC is easier to obtain in the laboratory than in the field. There are several available laboratory methodologies for determining the SMCC like Haines device, Richards's device, pressure cells and other. In this study, a new methodology for determining the SMCC is tested. The Richard's and the dielectric devices are used simultaneously. This combination allows for relatively easy application of pressure head, with the Richard's device, while the dielectric device determines the volumetric moisture, Θ_v , of the sample, without, interruption of the pressure application process, (opening the device and first the independent determination of the mass based moisture content (Θ_m) and then, through the determination of the bulk density of the solid components of the soil, ρ_b , of the volume based moisture content (Θ_v). SMCCs determined with the described devices combination and only with Richard's device are compared. The soil samples were taken from a profile, at depths from 0 to 10 and 10-20 cm. Analytical description of the methodology applied is provided below in the text. The comparison indicates that:

1. The combination of Richard's device and dielectric sensor works satisfactorily.
2. It is less time consuming and less laborious.
3. With a suitable calibration ρ_s is not necessary and therefore possible negative effect might be removed.

Key words: soil moisture characteristic curve determination, Richard's device, dielectric device

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Είναι γεγονός ότι ο σχεδιασμός άρδευσης με τον παραδοσιακό τρόπο ποτίσματος (κατάκλυση) στηρίζεται σε δύο αδόκιμες σταθερές, την υδατοϊκανότητα Θ_{Fc} (Field Capacity) και το σημείο

μονίμου μαράνσεως Θ_{PWP} (Permanent Wilting Point). Η πλήρης γνώση της χαρακτηριστικής καμπύλης υγρασίας είναι ουσιαστικής σημασίας τόσο για τον προσδιορισμό της δόσης άρδευσης αλλά και για άλλα συναφή με την άρδευση και ορθολογική

διαχείριση της αρδευόμενης γεωργίας προβλήματα όπως η κίνηση των διαλυτών ουσιών και η αλατότητα το φαινόμενο της ανακατανομής του αρδευτικού νερού κ.α.. Τούτο γιατί όλα τα εννοιολογικά μοντέλα πρόβλεψης άλλων υδραυλικών ιδιοτήτων των εδαφών όπως η $K(\theta)$, η $K(H)$ ή $D(\theta)$ ή $S(\theta)$ κ.λ.π. μπορούν να εφαρμοσθούν μόνο αν έχουν προσδιορισθεί ανεξάρτητα και αξιόπιστα ζεύγη τιμών υγρασίας πίεσης της ΧΚΥ.

Ο προσδιορισμός αυτός απαιτεί την ταυτόχρονη γνώση της κατ' όγκο υγρασίας θ_v και του αντίστοιχου φορτίου πίεσης H . Τούτο μπορεί να γίνει στον αγρό με τη χρήση οργάνων που προσδιορίζουν το H (βαθμονομημένα πλακίδια βουγιούκου, υδραργυρικά ή άλλα τασίμετρα) αλλά συγχρόνως για τον ίδιο όγκο εδάφους να παρέχεται και η δυνατότητα προσδιορισμού της θ (συσκευές νετρονίων, και πρόσφατα διηλεκτρικές συσκευές TDR, FDR, ADR κ.α.). Στο εργαστήριο ο προσδιορισμός ζευγών τιμών της ΧΚΥ γίνεται ενδεχομένως πιο εύκολα τόσο σε διαταραγμένα (κυρίως) αλλά και αδιατάρακτα δείγματα με συσκευές Haines για σχετικά μεγάλα φορτία πίεσης $H > -1$ bar και με συσκευές πίεσης (Richard's ή κύτταρα πίεσης) για μικρότερα φορτία H . Η συσκευή Richard's προωθήθηκε από την Soil Moisture για τον προσδιορισμό των θ_{Fc} και θ_{PWP} με την κατασκευή πορωδών πλακών με εύρος πίεσης λειτουργίας τους το 1/3 και τα 15 bars αντίστοιχα για τις θ_{Fc} και θ_{PWP} .

Κατά τα άλλα αν θελήσει κανείς να προσδιορίσει ζεύγη τιμών υγρασίας-πίεσης της ΧΚΥ με τη συσκευή Richard's δεν έχει παρά να ακολουθήσει την κλασική διαδικασία πολλών δειγμάτων, που το καθένα χρησιμοποιείται για ένα ζεύγος τιμών (H , θ) δηλαδή για ένα σημείο της ΧΚΥ.

Στόχοι αυτής της εργασίας είναι:

1. να παρουσιαστεί μία νέα μέθοδος με την οποία μπορεί να προσδιορισθεί όλη η ΧΚΥ για αδιατάρακτο δείγμα μέχρι και τα 15 bar και
2. να συγκριθούν ΧΚΥ προσδιορισμένες με τις δύο μεθόδους (Richard's και νέα μέθοδος) για δύο εδαφικά δείγματα (0-10 και 10-20 cm) και να διερευνηθεί ειδικά στα μικρά φορτία πίεσης ποια είναι η συσχέτιση της ΧΚΥ που προσδιορίζεται με την κλασική μέθοδο Richard's στη οποία συνήθως χρησιμοποιείται διαταραγμένο εδαφικό δείγμα με την ΧΚΥ του ίδιου εδαφικού δείγματος χωρίς αυτό να έχει διαταραχθεί

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1. Δειγματολήπτης Αδιατάρακτου

Για τη λήψη αδιατάρακτων δειγμάτων κατασκευάστηκε δειγματολήπτης και περιέκτης από διάφανο πλαστικό. Ο πλαστικός περιέκτης είχε ύψος 6 cm και διάμετρο 10 cm. Επίσης είχε στο πλάι οπή διαμέτρου 4,4 cm ώστε να μπορεί να εισάγεται στο αδιατάρακτο δείγμα κατά την έννοια της καθέτου του άξονα του κυλίνδρου ο διηλεκτρικός αισθητήρας. Οι διαστάσεις του πλαστικού κυλίνδρου επιλέχθηκαν με στόχο ο όγκος του εδαφικού δείγματος να καλύπτει τον όγκο δειγματοληψίας της διηλεκτρικής συσκευής.



Εικόνα 1. Ο δειγματολήπτης αδιατάρακτου με τα τμήματά του καθώς και ο πλαστικός περιέκτης με τα χαρακτηριστικά του

2.2. Η συσκευή Richard's

Για τον προσδιορισμό της ΧΚΥ χρησιμοποιήθηκε συσκευή Richard's με κεραμική πλάκα 15 Atm της εταιρείας Soil Moisture



Εικόνα 2. Συσκευή Richard's

2.3. Διατάξεις εφαρμογής πίεσης

Ως πηγές αέρα υπό πίεση χρησιμοποιήθηκαν ένας ηλεκτρικός αεροσυμπιεστής με αεροθάλαμο με δυνατότητα διατήρησης πίεσης στις 6 Atm και ένας αεροθάλαμος πεπιεσμένου ξηρού αέρα 200 Atm.



Εικόνα 3. Μέσα εφαρμογής πίεσης

Η διάταξη ρύθμισης πίεσης αποτελείτο για τον ηλεκτρικό αεροσυμπιεστή από ζεύγος υδατοπαγίδας και ελαιοπαγίδας και από τρεις ρυθμιστές ακριβείας διαφορετικού εύρους ρύθμισης ο καθένας και για τον αεροθάλαμο υψηλής πίεσης πεπιεσμένου ξηρού αέρα ένας ρυθμιστής υποβιβασμού υψηλής πίεσης και δύο ρυθμιστές πίεσης ακριβείας διαφορετικού εύρους ο καθένας.



Εικόνα 4. Γραμμές ρύθμισης πίεσης για τον ηλεκτρικό αεροσυμπιεστή και για τον αεροθάλαμο πεπιεσμένου αέρα και ρυθμιστές αυτών

2.4. Διηλεκτρική συσκευή

Η διηλεκτρική συσκευή που χρησιμοποιήθηκε ήταν η ML2 της Delta-T με μήκος δρομέων/ακίδων 6 cm και η ανάγνωση των μετρήσεων γινόταν με το μετρητή HH2 της ίδιας εταιρείας.



Εικόνα 5. Διηλεκτρική συσκευή και καταγραφικό δεδομένων

Η συσκευή ML2 ανήκει στην κατηγορία των ADR (Amplitude Domain Reflectometry) και λειτουργεί σε συχνότητα 100 MHz. (Munioz-Carpena, Ritter and Bosch, 2005)

2.5.Σύνδεση στη Richard's με τη διηλεκτρική συσκευή

Η σύνδεση της διηλεκτρικής συσκευής με την Richard's έγινε μέσω εξαρτήματος της συσκευής και πριν τη λήψη των μετρήσεων έγινε έλεγχος σωστής λειτουργίας της.



Εικόνα 6. Εξάρτημα μέσω του οποίου έγινε η σύνδεση με τη διηλεκτρική συσκευής το logger



Εικόνα 7. Η διηλεκτρική συσκευή με την παρεμβολή του εξαρτήματος της συσκευής Richard's

Κατά τη μεθοδολογία αυτή ο αισθητήρας βρίσκεται οριζόντια εντός της συσκευής Richard's, καρφωμένος στο εδαφικό δείγμα με είσοδό του από την πλαϊνή οπή του διάφανου πλαστικού περιέκτη και συνδεδεμένος εξωτερικά με το μετρητή με την παρεμβολή του εξαρτήματος της συσκευής Richard's.



Εικόνα 8. Παρουσίαση της συνδεσμολογίας και της τοποθέτησης του δείγματος στη συσκευή Richard's

2.6.Διαδικασία προσδιορισμού της ΧΚΥ με την συσκευή Richard's (Klute A. 2006)

«Μεταλλικοί δακτύλιοι με διάμετρο 4.6 cm και ύψος 1cm πληρούνται με αεροξηραμένα και κοσκινισμένα ($\delta < 2\text{mm}$) εδαφικά δείγματα Το πλήθος των δειγμάτων ισούται με τον αριθμό των σημείων της ΧΚΥ που είναι επιθυμητό να προσδιορισθούν. Καταβάλλεται προσπάθεια τα δείγματα αυτά να έχουν την ίδια φαινομενική πυκνότητα. Τα δείγματα τοποθετούνται επί της κεραμικής πλάκας και ακολούθως πλάκα και δείγματα κορένονται από κάτω προς τα επάνω. Ακολούθως τοποθετείται η

πλάκα με τα δείγματα εντός της συσκευής Richard's και συνδέεται η έξοδος του νερού με το βύσμα εξόδου που υπάρχει επί του τοιχώματος της συσκευής. Σφραγίζεται η συσκευή και αρχίζει η εφαρμογή προαποφασισμένων τιμών θετικών πιέσεων. Σε κάθε εφαρμοζόμενη θετική τιμή πίεσης αρχίζει να εξέρχεται νερό από την οπή εξόδου μέχρι να επέλθει νέα ισορροπία όπου και σταματάει η έξοδος νερού. Τότε μηδενίζεται η εφαρμοζόμενη θετική πίεση ανοίγεται η συσκευή αφαιρείται ένα δείγμα με προσοχή ώστε να μην μείνουν εδαφικοί κόκκοι στην πλάκα, επανασφραγίζεται η συσκευή και εφαρμόζεται η επόμενη τιμή θετικής πίεσης. Επαναλαμβάνεται η διαδικασία μέχρι εξαντλήσεως των δειγμάτων με τελευταία τιμή εφαρμοζόμενης θετικής πίεσης τις 15 Atm. Κάθε δείγμα που αφαιρείται ζυγίζεται (m_o) τοποθετείται σε φούρνο ξήρανσης και αφήνεται για 24 h σε 105°C . Ακολούθως ζυγίζεται ξανά (m_σ) και υπολογίζεται η υγρασία κατά μάζα του δείγματος (Θ_m) από τον τύπο:

$$\Theta_m = \frac{m_o - m_\sigma}{m_\sigma} = \frac{m_{\text{νερού}}}{m_\sigma} \quad (1)$$

Η φαινόμενη πυκνότητα των δειγμάτων υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\rho_\phi = \frac{m_\sigma}{V_{\text{ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ}}} \quad (2)$$

Με συνδυασμό των (1) και (2) παίρνουμε την υγρασία κατ' όγκο από τον τύπο:

$$\Theta_v = \Theta_m * \frac{\rho_\phi}{\rho_{\text{νερού}}} \quad (3)$$

Έτσι καταλήγουμε κάθε φορά σε ζεύγη τιμών πίεσης υγρασίας κατ' όγκο και τέλος έχουμε την ΧΚΥ

2.7.Διαδικασία προσδιορισμού της ΧΚΥ με την νέα μεθοδολογία

Αρχικά βαθμονομείται η διηλεκτρική συσκευή για το συγκεκριμένο αδιατάρακτο εδαφικό δείγμα, ακολουθώντας τη διαδικασία βαθμονόμησης πολλών σημείων (Theta probe Soil Moisture Sensor, Type ML2x, User manual, 1999). Κορένεται από κάτω προς τα επάνω το εδαφικό δείγμα και ακολούθως αφήνεται να στραγγίσει. Κατά τη διαδικασία στράγγισης και ανά τακτά διαστήματα ζυγίζεται το δείγμα και συγχρόνως μετράται η ένδειξη του οργάνου σε mV ρεύματος. Υπολογίζεται η ρίζα της διηλεκτρικής σταθεράς με τον ακόλουθο τύπο:

$$\sqrt{\epsilon} = 1.07 + 6.4V - 6.4V^2 + 4.7V^3 \quad (4)$$

Επίσης από τη διαφορά της κάθε ζύγισης και από τη γνώση της φαινόμενης πυκνότητας προσδιορίζεται η κατ' όγκο υγρασία.

Ακολούθως συσχετίζεται διαγραμματικά η ρίζα της διηλεκτρικής σταθεράς με την υπολογισμένη κατ' όγκο υγρασία και από την προσαρμοζόμενη ευθεία προσδιορίζεται τα a_0 (σημείο τομής ευθείας με y'y') και a_1 (κλίση της ευθείας). Οι τιμές αυτές αντικαθίστανται στην εξίσωση που ακολουθεί και κατ' αυτό τον τρόπο υπολογίζεται η κατ' όγκο υγρασία του δείγματος.

$$\Theta_v = \frac{\sqrt{\epsilon} - a_0}{a_1} \quad (5)$$

Στη συνέχεια η πλάκα με το δείγμα και τη διηλεκτρική συσκευή τοποθετείται στην Richard's (εικόνα 8) και την σφραγίζεται. Συνδέεται εξωτερικά ο μετρητής (εικόνα 8) και αρχίζει η εφαρμογή προαποφασισμένων τιμών θετικής πίεσης. Παρακολουθούνται μέσω του μετρητή τιμές τάσης-υγρασίας για κάθε τιμή εφαρμοζόμενης θετικής πίεσης μέχρι αυτές να σταθεροποιηθούν για περισσότερο από 48 ώρες. Έτσι προσδιορίζονται ζεύγη τιμών υγρασίας πίεσης και συνεπώς η ΧΚΥ του δείγματος.

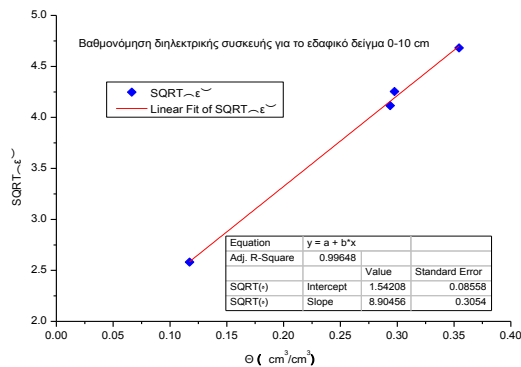
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1. Βαθμονόμηση διηλεκτρικής συσκευής

Στους πίνακες που ακολουθούν εμφανίζεται η βαθμονόμηση της διηλεκτρικής συσκευής (ML2) για τα δύο δείγματα ώστε να προκύψουν τα α_0 και α_1 της εξίσωσης (5)

Πίνακας 1. Βαθμονόμηση (δείγμα 0-10cm)

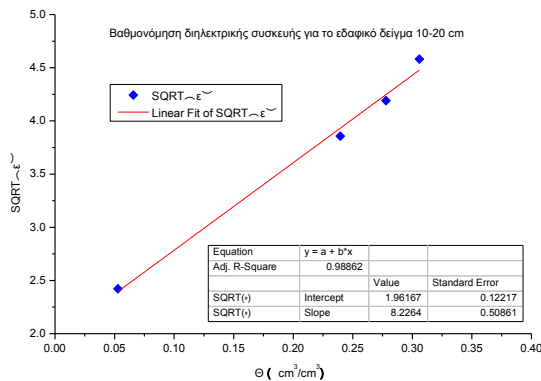
ΜΕΤΡΗΣΗ (mV)	$\sqrt{\epsilon}$	M_V (Υγρό)	M_E (Ξηρό)	$M_{\text{μερού}}$	Θ_m	ρ_ϕ	Θ_V
0.8338	4.681	1026.80	859.8	167.00	0.1942	1.825	0.3544
0.750	4.254	1000.00	140.20	0.1631	0.2975		
0.720	4.116	998.20	138.40	0.1610	0.2937		
0.311	2.581	915.00	55.20	0.0642	0.1171		



Σχήμα 1. Συσχέτιση ρίζας διηλεκτρικής σταθεράς και υγρασίας για το δείγμα 0-10 cm

Πίνακας 2 Βαθμονόμηση (δείγμα 10-20 cm)

ΜΕΤΡΗΣΗ (mV)	$\sqrt{\epsilon}$	M_V (Υγρό)	M_E (Ξηρό)	$M_{\text{μερού}}$	Θ_m	ρ_ϕ	Θ_V
0.8155	4.582	1038.90	894.8	144.10	0.1610	1.899	0.3058
0.737	4.190	1025.70	130.90	0.1463	0.2778		
0.660	3.857	1007.60	112.80	0.1261	0.2394		
0.2695	2.422	919.70	24.90	0.0278	0.0528		



Σχήμα 2. Συσχέτιση ρίζας διηλεκτρικής σταθεράς και υγρασίας για το δείγμα 0-10 cm

Πίνακας 3. Συγκριτική παρουσίαση των α_0 & α_1

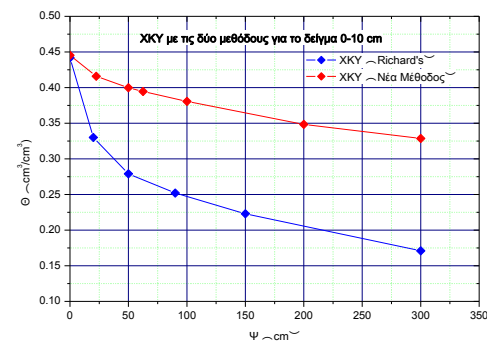
	α_0	α_1
0-10 cm	1.54	8.90
10-20 cm	1.96	8.22

3.2. Προσδιορισμός ζευγών τιμών της ΧΚΥ και σύγκριση των δύο μεθόδων

Μετά τη βαθμονόμηση του διηλεκτρικού αισθητήρα, προσδιορίστηκαν οι ΧΚΥ των δύο δειγμάτων (0-10 και 10-20 cm βάθος) με τη νέα μέθοδο και ακολούθως με την κλασική μέθοδο Richard's. Ακολουθούν πίνακες και διαγράμματα με τη συγκριτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

Πίνακας 4. Παρουσίαση των ΧΚΥ για το δείγμα 0-10 cm με τις δύο μεθόδους

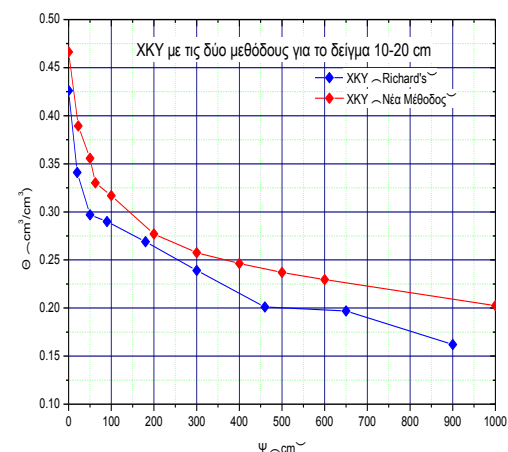
Ψ (cm)	Richard's	Νέα Μέθοδος	
	Θ_V (cm³/cm³)	Ψ (cm)	Θ_V (cm³/cm³)
0	0.442	0	0.4454
20	0.33	22.5	0.4160
50	0.279	50	0.3997
90	0.252	62.5	0.3945
150	0.223	100	0.3807
300	0.171	200	0.3483
		300	0.3286



Σχήμα 3. Συσχέτιση ΧΚΥ για το δείγμα 0-10 cm

Πίνακας 5. Παρουσίαση των ΧΚΥ για το δείγμα 10-20 cm με τις δύο μεθόδους

Ψ (cm)	Richard's	Νέα Μέθοδος	
	Θ_V (cm³/cm³)	Ψ (cm)	Θ_V (cm³/cm³)
0	0.426	0	0.4663
20	0.341	22.5	0.3894
50	0.297	50	0.3556
90	0.29	62.5	0.3302
180	0.269	100	0.3169
300	0.239	200	0.2770
460	0.201	300	0.2575
650	0.197	400	0.2464
900	0.162	500	0.2369
		600	0.2296
		1000	0.2024

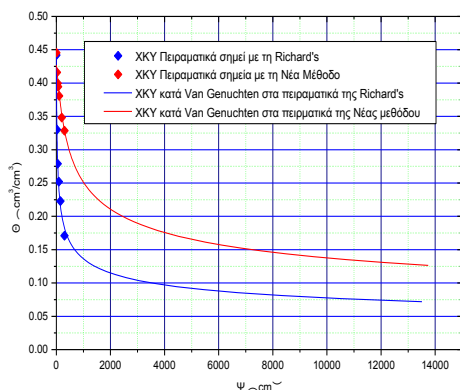


Σχήμα 4. ΧΚΥ για το δείγμα 10-20 cm

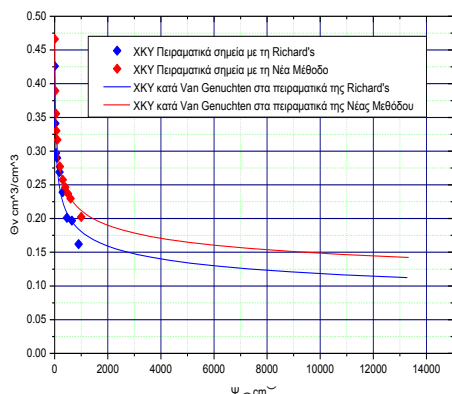
Στη συνέχεια με τη χρήση του προγράμματος RETC (Van Genuchten, et al. 1991) προσαρμόστηκαν καμπύλες στα πειραματικά δεδομένα και προσδιορίστηκαν τα α και n που είναι οι συντελεστές του μοντέλου Van Genuchten.

Πίνακας 6. Συγκριτική παρουσίαση των συντελεστών α και n κατά van Genuchten για τα δύο δείγματα και τις δύο μεθόδους

	Δείγμα 0-10		Δείγμα 10-20	
	Richar's	Νέα μέθοδος	Richar's	Νέα μέθοδος
α	0.1206	0.00676	0.0993	0.11212
n	1.24506	1.26856	1.18468	1.18153



Σχήμα 5. Σύγκριση ΧΚΥ κατά Van Genuchten για το δείγμα 0-10 cm



Σχήμα 6. Σύγκριση ΧΚΥ κατά Van Genuchten για το δείγμα 10-20 cm

4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τεχνικά η προτεινόμενη νέα μέθοδος διαφέρει ως προς την κλασική μέθοδο Richard's κατά τα ακόλουθα:

Η εξισορρόπηση του δείγματος για κάθε εφαρμοζόμενη πίεση διαπιστώνεται από σταθεροποίηση της τιμής της διηλεκτρικής σταθεράς και όχι από το εάν έχει σταματήσει η εκροή νερού από την ειδική έξοδο κάτω που είναι δυσκολότερο να διαπιστωθεί σε μεγάλες πιέσεις όπου η εκροή είναι ελάχιστη. Η εξισορρόπηση γινόταν εντός περίπου 4-6 ημερών στα συγκεκριμένα δείγματα.

Η αδιάλειπτη εφαρμογή πίεσης εξασφαλίζει ότι δεν προκύπτουν ανακατανομές της υγρασίας εντός του δείγματος κάτω που στην κλασική μέθοδο Richard's περιορίζεται με το μικρό ύψος των δειγμάτων (1 cm) το οποίο όμως συγχρόνως δυσκολεύει την πλήρωση και το χειρισμό τους.

Ο όγκος εδάφους επί του οποίου μετράται η υγρασία στην κλασική μέθοδο Richard's είναι περίπου 16.6 cm³ (όγκος μεταλλικού δακτυλίου) ενώ με τη νέα μέθοδο είναι 75 cm³. (Theta probe Soil Moisture Sencor Type ML2x, User manual, 1999.)

Η προτεινόμενη μέθοδος με την χρήση του διηλεκτρικού αισθητήρα παρουσιάζει το πλεονέκτημα της απαλλαγής από την κουραστική εργασία των συνεχών ζυγίσεων των δειγμάτων για τον προσδιορισμό της ΧΚΥ.

Επίσης και στις δύο περιπτώσεις παρατηρείται ότι οι τιμές υγρασίας των αδιατάρακτων δειγμάτων είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες υγρασίες των διαταραγμένων για τις ίδιες τιμές πίεσης. Η διαφορά αυτή θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως σημαντική στο επιφανειακό δείγμα εδάφους όπως φαίνεται στον πίνακα 9 όπου εξετάζεται η τιμή της υγρασίας των δύο ΧΚΥ στην πίεση -1,0 bar:

Πίνακας 7. Διαφορά μετρούμενης υγρασίας για ίδια τιμή αρνητικής πίεσης με τις δύο μεθόδους στα δύο δείγματα για άρδευση πορτοκαλιάς

Δείγματα	Πίεσης εφαρμογής άρδευσης	Θ από ΧΚΥ με Richard's	Θ από ΧΚΥ με Νέα Μέθοδο	Διαφορά
0-10 cm	-1,0 bar	0,14	0,25	0,11
10-20 cm	-1,0 bar	0,17	0,21	0,04

Συγχρόνως οι συντελεστές α (Van Genuchten) των δύο δειγμάτων υποδεικνύουν ότι στα αδιατάρακτα δείγματα η ζώνη εισόδου αέρα είναι ευρύτερη έναντι των διαταραγμένων αφού $\alpha_{\text{Νέα Μέθοδος}} < \alpha_{\text{Richard's}}$ και επίσης οι παραπλήσιες τιμές του n υποδηλώνουν ότι η κλίση των δύο καμπυλών είναι ίδια (Radcliffe and Simunek, 2010). Από αυτά συμπεραίνεται διαφορετική κατανομή πόρων μεταξύ αδιατάρακτων και διαταραγμένων δειγμάτων, χωρίς να μπορεί να αποκλειστεί και ενδεχόμενο λάθους κατά τη διάρκεια της βαθμονόμησης.

Εκτίμησή μας είναι ότι η προτεινόμενη μεθοδολογία έχει σημαντικά προτερήματα (χρόνος, κόπος, συνεχείς μετρήσεις κ.λ.π.) και πρέπει να τύχει περαιτέρω διερεύνησης.

Ευχαριστίες

Στο ΥΑΑ&Τ καθώς και στην Ν.Α. Λακωνίας γιατί ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε αποκτήθηκε με χρηματοδότησή τους.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Van Genuchten Th. M.1980a. A closed form equation on predicting of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 44:892-898
- Radcliffe D. and Simunek J., 2010.
- RETC PROGRAM in the Soil Physics with Hydrus, Modeling and Applications. CRC Press, pp.73-79
 - Soil Water Retention Curve Equations in the Soil Physics with Hydrus, Modeling and Applications. CRC Press, pp.65-67
- Munioz-Carpena R., Ritter A and Bosch D., 2005, Field Methods for monitoring Soil Water Status in Alvarez-Benedi J. And Munioz-Carpena R. (editors) Soil Water Solute Process Characterization, An integrated Approach, CRC Press, pp 168-193

Klute A. 2006. Water retention: Laboratory methods in Klute A. (editor) Methods of Soil Analysis Part 1-Physical and Mineralogical Methods, 2nd Ed., SSSA Book Series 5 pp.635-656
Theta probe Soil Moisture Sencor Type ML2x, User manual, 1999. Delta-T Devices

Van Genuchten M. Th., Simunek J, Leij F. J. and Yates S. R.. The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils 1991, US EPA ADA Oclahoma

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΠΑΡΟΧΗΣ ΑΡΔΕΥΤΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΜΕ ΤΗ ΒΟΗΘΕΙΑ ΑΣΑΦΩΝ ΚΑΝΟΝΩΝ

Χ. Τζιμόπουλος

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή,
Α.Π.Θ., 54124, Θεσσαλονίκη
tzimop@eng.auth.gr

Τα συστήματα ασαφών κανόνων γνωστά επίσης και ως ασαφή επαγωγικά συστήματα (fuzzy inference systems, FIS), ή βάση ασαφών κανόνων (fuzzy rule base, FRB) κλπ, βρίσκουν εφαρμογή σε πολλά πεδία επιστημών, όπως την ιατρική, την φυσική και στις επιστήμες του μηχανικού. Ένα ασαφές σύστημα R ορίζεται ως το σύνολο των κανόνων που αποτελείται από ασαφείς υποθέσεις (ή προϋποθέσεις) $A_{i,k}$ (fuzzy premises) με τη μορφή ασαφών συνόλων με συναρτήσεις συμμετοχής $\mu_{A_{i,k}}$ και ένα σύνολο ασαφών αποκρίσεων $B_{i,k}$ (responses) επίσης με τη μορφή ασαφών συνόλων και αποτελεί μια εφαρμογή της συνεπαγωγής της μαθηματικής λογικής σε ασαφείς αριθμούς. Στην παρούσα εργασία επιχειρείται η κατασκευή ενός νέου μοντέλου με τη βοήθεια της ασαφούς λογικής για τον υπολογισμό της παροχής στην κεφαλή του αρδευτικού δικτύου. Το μοντέλο αυτό έχει σαν υποθέσεις 3 συναρτήσεις συμμετοχής που παριστάνουν τα ανοικτά υδροστόμια που λειτουργούν στο Αρδευτικό δίκτυο (μικρός αριθμός υδροστομίων, μεσαίος αριθμός υδροστομίων, μεγάλος αριθμός υδροστομίων) και ως αποκρίσεις επίσης 3 συναρτήσεις συμμετοχής που παριστάνουν τις αποδόσεις των αντλιών συναρτήσει του αριθμού των υδροστομίων. Ως τελικό αποτέλεσμα του μοντέλου για δεδομένο αριθμό υδροστομίων εν λειτουργία, προκύπτει η απόδοση του αντλητικού συγκροτήματος και η παροχή κεφαλής.

Λέξεις κλειδιά: Αρδευτικά δίκτυα, μέθοδος Clément, παροχή αντλιοστασίου, ασαφή συστήματα.

DESIGN DISCHARGE OF A PRESSURE IRRIGATION NETWORK USING FUZZY RULES

C. Tzimopoulos,

Aristotle University of Thessaloniki, School of Rural & Surveying Engineering, Faculty of Engineering, A.U.TH.,
Thessaloniki 54124, Greece
tzimop@eng.auth.gr

The flow on-demand in pressure irrigation networks has a probabilistic approach, originally developed by Clément. This approach fails to give sufficient answer for cases the number of farmers exceeds the number of open hydrants. Here we propose a new model based on fuzzy rules base, which can give satisfactory results for the above case. Fuzzy rules base is one of the most successful of fuzzy logic theory, since they capture real world's inaccurate and approximate structure. In the new model three membership functions presenting the number of hydrants were used as fuzzy premises and as fuzzy responses three other membership functions were used, presenting the efficiency of pumping station. So for a given number of farmers N_1 exceeding the number N of open hydrants, we can estimate the efficiency of pumping station and the reduced discharge.

Key words: pressure irrigation networks, Clément method, pumping station discharge, fuzzy rules.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα αρδευτικά έργα αποτελούν ένα σύνολο εγκαταστάσεων-συσκευών και οργάνων που έχουν σαν τελικό στόχο τη χορήγηση νερού στις καλλιέργειες. Ένα τυπικό αρδευτικό δίκτυο εν συντομία αποτελείται από τα εξής στοιχεία: 1) Έργα και εγκαταστάσεις συλλογής και αποθήκευσης του νερού-Αντλιοστάσιο. 2) Δίκτυο σωληνωτών αγωγών μεταφοράς και διανομής του αρδευτικού νερού. 3) Σύστημα άρδευσης ή σύστημα εφαρμογής του νερού στο έδαφος. Τα συστήματα άρδευσης, είναι αυτά με τα οποία γίνεται απευθείας χορήγηση αρδευτικού νερού στα καλλιεργούμενα εδάφη. Υπάρχουν τέσσερις μέθοδοι άρδευσης: 1) Η επιφανειακή άρδευση. 2) Η υπάρδευση. 3) Η άρδευση με καταιονισμό ή τεχνητή βροχή. 4) Η τοπική άρδευση ή άρδευση με σταγόνες. Η άρδευση με καταιονισμό ή τεχνητή βροχή με την οποία και θα ασχοληθούμε, αποτελεί την πιο διαδεδομένη σήμερα μέθοδο άρδευσης. Με αυτήν επιτυγχάνεται η άρδευση μεγάλων εκτάσεων που η τροφοδοσία τους με νερό γίνεται μέσα από ένα κοινό σύστημα αγωγών μεταφοράς και διανομής. Βρίσκει εφαρμογή στα

συλλογικά αρδευτικά δίκτυα υπό πίεση που άρχισαν να εφαρμόζονται με μεγάλη επιτυχία στην Ελλάδα από το 1967. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται επίσης και στις περιπτώσεις ατομικών αρδευτικών δικτύων με καταιονισμό που χρησιμοποιούνται σε αυτοτελείς αρδευτικές μονάδες με ιδιαίτερη ανεξάρτητη εγκατάσταση τροφοδοσίας νερού (Τζιμόπουλος, 1982). Ανεξαρτήτως της πηγής από την οποία λαμβάνεται το νερό, για την ομαλή λειτουργία του συστήματος, απαιτείται συνήθως ένα αντλιοστάσιο στην κεφαλή του αρδευτικού δικτύου. Οι αγωγοί διανομής του νερού καταλήγουν σε υδροληψίες με υδροστόμια σε κάθε αγροτεμάχιο, όπου και συνδέονται οι αυτοτελείς αρδευτικές μονάδες με τους εκτοξευτήρες για την άρδευση των αγροτεμαχίων. Η κατανομή της παροχής στα υδροστόμια γίνεται με ελεύθερη ζήτηση και έτσι παρέχονται στους καλλιεργητές σημαντικά πλεονεκτήματα: 1) Δίνεται η ελευθερία στον αγρότη να διαθέσει το νερό με μία περιορισμένη παροχή οποιαδήποτε ώρα του 24ωρου. 2) Ο αγρότης καθορίζει μόνος του την ημέρα και τη διάρκεια της άρδευσης, ανάλογα και με τις ανάγκες των φυτών. 3) Το νερό που ξοδεύει ο

καλλιεργητής θα πρέπει να πληρώνεται με βάση τα κυβικά μέτρα νερού που κατανάλωσε.

Ο αριθμός των ανοικτών υδροστομιών στην κεφαλή ενός αρδευτικού δικτύου καθορίζεται με ένα πιθανοθεωρητικό μοντέλο του Clément, (Clément, 1955, Clément, 1966):

$$N = R_p + U(F(x))\sqrt{R_p q}. \quad (1)$$

Αυτός είναι ο α' τύπος της ελεύθερης ζήτησης του Clément και δίνει τον αριθμό των υδροστομιών N τα οποία θεωρούνται ταυτόχρονα ανοιχτά για να υπάρχει μία ποιότητα λειτουργίας F(x) (ή ένας συντελεστής ποιότητας λειτουργίας U(F(x))). Στον

παραπάνω τύπο του Clément είναι: $p = \frac{q_0 S}{r R d}$ = η

πιθανότητα λειτουργίας ενός υδροστομίου, $q=1-p$, $R=0$ συνολικός αριθμός των εγκατεστημένων υδροστομιών, $F(x)=$ η ποιότητα λειτουργίας του δικτύου, $U(F(x))=$ συντελεστής ποιότητας λειτουργίας του δικτύου που παρέχεται από πίνακες της κανονικής κατανομής. Επίσης στον τύπο που εκφράζει την πιθανότητα λειτουργίας ενός υδροστομίου είναι: q_0 = η θεωρητική ειδική παροχή άρδευσης για το μήνα αιχμής (L/s/στρ.), $S=$ η αρδευόμενη επιφάνεια από το υδροστόμιο (στρ.), $r=$ η απόδοση χρονικής χρησιμοποίησης του δικτύου, $d=$ η μέση παροχή κάθε στομίου υδροληψίας (L/s). Με βάση τον παραπάνω τύπο που παρέχει σε ένα δίκτυο τον αριθμό των ανοικτών υδροστομιών N, η παροχή για να λειτουργούν ταυτόχρονα τα N υδροστόμια είναι:

$$Q = Nd = R_p d + U(F(x))d\sqrt{R_p q}, \text{ (L/s)}.$$

Ως προς την ποιότητα λειτουργίας του δικτύου F(x), μία τιμή της τάξεως του 95% σημαίνει ότι σε N καλλιεργητές που μεταβαίνουν στο δίκτυο ένα ποσοστό 5% εξ αυτών, δεν θα μπορέσει να εξυπηρετηθεί. Βεβαίως κάτι τέτοιο δεν ισχύει ακριβώς, γιατί στην πραγματικότητα αυτό που θα συμβεί είναι ότι απλώς παρέχεται στον κάθε καλλιεργητή λιγότερη ποσότητα νερού, με επακόλουθο μικρότερη πίεση. Αυτό συμβαίνει γιατί αυτό το έλλειμμα νερού που εμφανίζεται, μοιράζεται σε όλους τους χρήστες.

Ο πιθανοθεωρητικός λοιπόν τύπος του Clément αδυνατεί να δώσει σαφή απάντηση σε περιπτώσεις κατά τις οποίες ο αριθμός των καλλιεργητών στο αρδευτικό δίκτυο είτε είναι ίσος με N, είτε υπερβαίνει την τιμή N των ανοικτών υδροστομιών, παρόλο που τέτοιες περιπτώσεις συχνά συμβαίνουν. Στο παραπάνω πρόβλημα θα προσπαθήσουμε να δώσουμε μια απάντηση με βάση ένα μοντέλο που μελετήθηκε με τη βοήθεια της ασαφούς λογικής και πιο συγκεκριμένα με τη βοήθεια των ασαφών κανόνων.

2. ΑΣΑΦΕΙΣ ΚΑΝΟΝΕΣ

2.1 ΑΣΑΦΗΣ ΛΟΓΙΚΗ

Η μέθοδος της ασαφούς λογικής έχει εισαχθεί, για να καλύψει το χάσμα, μεταξύ της ανθρώπινης λογικής και της «επιστημονικής» λογικής. Η πρώτη είναι ασαφής, περιγραφική, γλωσσολογική, ενώ η

δεύτερη είναι ακριβής, μαθηματική, αυστηρή και άκαμπτη. Οι επιστήμονες, ακολουθούν την δεύτερη προσέγγιση, δηλαδή την επιστημονική λογική, ενώ η πρώτη δηλαδή η ανθρώπινη λογική, είναι πιο κοντά στην ανθρώπινη γλώσσα και διαίσθηση και κατά συνέπεια είναι καλύτερα προσαρμοσμένη σε διαδικασίες λήψης αποφάσεων. Το κεντρικό νόημα της ασαφούς λογικής (fuzzy logic) είναι ότι η τιμή της αλήθειας στην προσεγγιστική λογική ή ο **βαθμός συμμετοχής** σε ένα προσεγγιστικό σύνολο, αποδίδεται με μια τιμή του πεδίου πραγματικών αριθμών [0, 1]. Η τιμή 0 δηλώνει ότι ένα στοιχείο δεν αποτελεί μέλος του συνόλου και η τιμή 1 ότι αποτελεί πλήρως μέλος του συνόλου. Αντίστοιχα, μια τιμή για ένα στοιχείο κοντά στο 0, εκφράζει σε **μικρό ποσοστό** τα χαρακτηριστικά του μέλους ενός συνόλου, ενώ για τιμές κοντά στο 1, το στοιχείο εκφράζει σε **μεγάλο ποσοστό** τα χαρακτηριστικά μέλους του συνόλου. Ένα ασαφές σύνολο $\tilde{A}$ υποσύνολο ενός γενικού συνόλου αναφοράς X, είναι ένα σύνολο διατεταγμένων ζευγών, x και $\mu_{\tilde{A}}(x)$

(Zadeh, 1965): $\tilde{A} = \{(x, \mu_{\tilde{A}}(x)) | x \in X\}$, όπου

$\mu_{\tilde{A}}(x)$ είναι η **συνάρτηση συμμετοχής** (membership function), η οποία εκφράζει για το στοιχείο x τον βαθμό(ποσοστό) συμμετοχής του στοιχείου ή τον βαθμό αλήθειας ως προς το ασαφές σύνολο (Fuzzy set) $\tilde{A}$. Συνήθως ως συνάρτηση συμμετοχής λαμβάνεται ένας τριγωνικός ή τραπεζοειδής αριθμός. Ένας τριγωνικός ασαφής αριθμός $\tilde{A} = (a, 2b/c)$, έχει συνάρτηση συμμετοχής ως εξής:

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 0 & x < a, \\ (a+x)/(a+b) & a \leq x \leq b, \\ (c-x)/(c-b) & b \leq x \leq c, \\ 0 & x > c. \end{cases} \quad (3)$$

2.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΣΑΦΩΝ ΚΑΝΟΝΩΝ

Τα συστήματα ασαφών κανόνων είναι επίσης γνωστά και ως ασαφή επαγωγικά συστήματα (fuzzy inference systems), ασαφή μοντέλα (fuzzy models), ασαφείς συσχετισμένες μνήμες (fuzzy associative memories, FAM), βάση ασαφών κανόνων (fuzzy rules base, FRB) κτλ (Bárdossy and Duckstein, 1995). Εφεξής θα χρησιμοποιηθεί ο ορισμός «μοντέλα της βάσης ασαφών κανόνων, FRB». Τα μοντέλα αυτά βρίσκουν εφαρμογή σε πολλά πεδία επιστημών, όπως την ιατρική, την φυσική και στις επιστήμες του μηχανικού. Αποτελούν μία από τις πιο επιτυχημένες εφαρμογές της ασαφούς λογικής και των ασαφών συνόλων, καθώς μπορούν και συλλαμβάνουν την προσεγγιστική και ανακριβή φύση του πραγματικού κόσμου. Στα μοντέλα της βάσης ασαφών κανόνων οι σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών περιγράφονται λεκτικά και όχι χρησιμοποιώντας γνωστές μαθηματικές σχέσεις. Για την μαθηματοποίηση των λεκτικών αυτών μεταβλητών χρησιμοποιούνται τα ασαφή σύνολα.

Στην **συμβατική μαθηματική λογική** οι συμβατικοί κανόνες αποτελούνται από μια συνθήκη και ένα αποτέλεσμα, συνθέτοντας μια λογική έκφραση. Αν οι συνθήκες του κανόνα ικανοποιούνται απολύτως, τότε αυτός είναι αληθής. Η διαφορά στα **συστήματα ασαφών κανόνων** είναι ότι οι υποθέσεις του κανόνα είναι δυνατόν να ικανοποιούνται σε μερικό βαθμό, οπότε και ο κανόνας έχει μερική ισχύ. Ένα απλό παράδειγμα κανόνα αυτής της μορφής είναι το ακόλουθο: «*Εάν η θερμοκρασία είναι υψηλή τότε η κατανάλωση του νερού είναι υψηλή*». Ο όρος «*υψηλή*», αποτελεί μια ποσότητα η οποία δεν είναι εύκολο να προσδιοριστεί. Θερμοκρασίες από 30°C και πάνω μπορούν να θεωρηθούν υψηλές, όχι όμως όλες στον ίδιο βαθμό. Υπάρχει ένα εύρος τιμών, το οποίο ανήκει μεν στο ασαφές σύνολο «*υψηλή θερμοκρασία*», αλλά σε διαφορετικό βαθμό για κάθε μία τιμή. Αντιστοίχως η ποσότητα «*υψηλή κατανάλωση*» δεν παίρνει μία και μοναδική τιμή. Συνεπώς οι ασαφείς κανόνες είναι δυνατόν να λάβουν υπόψη ανακριβείς ποσοτικές πληροφορίες στην τελική λήψη της απόφασης.

Η εφαρμογή της βάσης ασαφών κανόνων στη λήψη αποφάσεων είναι απόρροια του γεγονότος ότι η ανθρώπινη λογική βασίζεται σε εκφράσεις της Μαθηματικής λογικής «*εάν—>τότε, (συνεπαγωγή)*». Το «*εάν*» αποτελεί ένα διάνυσμα επεξηγηματικών μεταβλητών ή ασαφών υποθέσεων και το «*τότε*» το διάνυσμα με τα ασαφή αποτελέσματα ή αποκρίσεις. Οι ασαφείς κανόνες αποτελούν το μέσον για τη μετατροπή της παραπάνω λεκτικής έκφρασης σε μια υπολογιστικά εφικτή μορφή. Η απλότητα των ασαφών συστημάτων προκύπτει από το γεγονός ότι ο τρόπος λειτουργίας τους προσομοιάζει στον ανθρώπινο τρόπο σκέψης.

Στην **συμβατική μαθηματική λογική** ένας κανόνας αποτελεί μια λειτουργία που διατυπώνεται με εκφράσεις, συνδεδεμένες μεταξύ τους με λογικούς τελεστές, ώστε να συνθέτουν μια λογική έκφραση και έτσι να προκύπτει κάποιο αποτέλεσμα. Αν ικανοποιούνται οι συνθήκες ενός κανόνα τότε το ίδιο ισχύει και για το αποτέλεσμα. Στην **ασαφή μαθηματική λογική** κάθε ασαφής κανόνας οδηγεί επαγωγικά σε κάποιο συμπέρασμα που είναι ανάλογο με τον βαθμό ισχύος της υπόθεσης.

Ένα ασαφές σύστημα R ορίζεται ως το σύνολο των κανόνων που αποτελείται από ασαφείς υποθέσεις $A_{i,k}$ (fuzzy premises) με τη μορφή ασαφών συνόλων με συναρτήσεις συμμετοχής $\mu_{A_{i,k}}$ και ένα σύνολο ασαφών αποκρίσεων $B_{i,k}$ (responses) επίσης με τη μορφή ασαφών συνόλων (Tzimiropoulos and Mpallas, 2007, Tzimiropoulos et al, 2008, Tzimiropoulos et al, 2008):

$$\text{If } a_1 \text{ is } A_{1,i} \otimes \dots \otimes a_K \text{ is } A_{i,K} \text{ then } B_i. \quad (4)$$

Όλοι οι κανόνες σε ένα σύστημα χρησιμοποιούν τις ίδιες μεταβλητές ως υποθέσεις και την ίδια μεταβλητή ως απόκριση. Ένας ασαφής κανόνας αποτελείται από λεκτικούς όρους οι οποίοι συνδέονται μεταξύ τους με όρους της μορφής «*EAN-TOTE, (IF-THEN, συνεπαγωγή)*», όπου το «*EAN*» αποτελεί το διάνυσμα των ασαφών υποθέσεων και το «*TOTE*» το διάνυσμα των ασαφών αποκρίσεων.

Στα ασαφή συστήματα κανόνων ισχύει η μερική ικανοποίηση ενός κανόνα (Μπαλλάς, 2007).

Οι ασαφείς υποθέσεις είναι οι μεταβλητές εκείνες οι οποίες λειτουργούν ως «*επεξηγηματικές*» για να δώσουν το αποτέλεσμα, που είναι η απόκριση του κανόνα. Οι ασαφείς υποθέσεις και αποκρίσεις περιγράφονται συνήθως με τη βοήθεια λεκτικών μεταβλητών και συνδέονται μεταξύ τους με τη βοήθεια τελεστών, οι οποίοι απεικονίζονται με το σύμβολο $\otimes$ στο παραπάνω γενικό παράδειγμα. (Το σύμβολο $\otimes$ αποτελεί συνήθως ένα σύνδεσμο διάζευξης ή (OR, disjunction, V) ή ένα σύνδεσμο σύζευξης και (AND, conjunction, Λ). Οι λεκτικές αυτές μεταβλητές λειτουργούν ως «*τίτλοι*» στα ασαφή σύνολα και είναι έτσι δυνατή η μετάφραση της ανακριβούς λεκτικής πληροφορίας σε ασαφή σύνολα, τα οποία είναι δυνατόν να υποστούν υπολογιστική επεξεργασία. Κατά συνέπεια και οι κανόνες γίνονται εύκολα κατανοητοί απλώς και μόνο διαβάζοντάς τους. Ένα σύστημα ασαφών κανόνων αποτελείται από λεκτικούς κανόνες που αντιστοιχίζουν τις συναρτήσεις συμμετοχής των ασαφών υποθέσεων με τις συναρτήσεις συμμετοχής των ασαφών αποκρίσεων. Οι ασαφείς υποθέσεις μετατρέπονται σε έναν αριθμό που παίρνει τιμές μεταξύ 0 και 1 και δείχνει το ποσοστό ισχύος της απόκρισης B, δηλαδή στην ασαφή λογική ένας κανόνας μπορεί να είναι αληθής αλλά σε μερικό βαθμό στο διάστημα [0,1], (Τζιμόπουλος και Μπαλλάς, 2006, Τζιμόπουλος και Μπαλλάς, 2007α, Τζιμόπουλος και Μπαλλάς, 2007α,β).

3. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΑΡΔΕΥΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ

Δίνεται ένα αρδευτικό δίκτυο με 100 υδροστόμια το οποίο υδροδοτείται από ένα αντλιοστάσιο με τρεις αντλίες. Η απόδοση του αντλιοστασίου κυμαίνεται από 0%(κλειστές όλες οι αντλίες), μέχρι 100%(ανοικτές όλες οι αντλίες, $Q=420\text{L/s}$, όταν λειτουργούν ανοικτά τα 60 υδροστόμια του δικτύου, με παροχή κάθε υδροστομίου 7L/s). Το δίκτυο έχει υπολογιστεί για να παρέχει 4 at στα υδροστόμια των υδροληψιών, όταν λειτουργούν ανοικτά τα 60 υδροστόμια. Ζητείται η απόδοση του δικτύου όταν λειτουργούν ανοικτά τα 75 υδροστόμια. Το δίκτυο θεωρείται ως αποτελούμενο από τρεις τριγωνικούς ασαφείς αριθμούς που έχουν ως εξής:

$$\tilde{A}_1 = (50/60/70) = \text{Κανονικός αριθμός ανοικτών υδροστομίων,}$$

$$\tilde{A}_2 = (60/70/80) = \text{Μεγάλος αριθμός ανοικτών υδροστομίων,}$$

$$\tilde{A}_3 = (70/90/100) = \text{Μέγιστος αριθμός ανοικτών υδροστομίων.}$$

Η απόδοση του αντλιοστασίου θεωρείται ως ανάλογη της πίεσης και χαρακτηρίζεται επίσης από τρεις τριγωνικούς ασαφείς αριθμούς που έχουν ως εξής:

$$\tilde{B}_1 = (50\%/60\%/70\%) = \text{Χαμηλή απόδοση,}$$

$$\tilde{B}_2 = (60\%/70\%/80\%) = \text{Μέση απόδοση,}$$

$$\tilde{B}_3 = (70\%/90\%/100\%) = \text{Υψηλή απόδοση}.$$

Το όλο σύστημα σχεδιάζεται ως εξής:

1ος κανόνας: IF (Κανονικός αριθμός ανοικτών υδροστομίων) THEN (Υψηλή απόδοση),

2ος κανόνας: IF (Μεγάλος αριθμός ανοικτών υδροστομίων) THEN (Μέση απόδοση),

3ος κανόνας: IF (Μέγιστος αριθμός ανοικτών υδροστομίων) THEN (Χαμηλή απόδοση) ή

1ος κανόνας: IF ($\tilde{A}_1$) THEN ($\tilde{B}_3$),

2ος κανόνας: IF ($\tilde{A}_2$) THEN ($\tilde{B}_2$),

3ος κανόνας: IF ($\tilde{A}_3$) THEN ($\tilde{B}_1$)

Θεωρούμε τώρα ότι στο αρδευτικό δίκτυο σε μια δεδομένη στιγμή λειτουργούν 75 υδροστόμια, δηλαδή η λειτουργία του δικτύου υπερβαίνει τα κανονικά υδροστόμια κατά 15. Στο σχ. 1 παρατηρούμε ότι η τετμημένη $x=75$ υδροστόμια τέμνει τους δύο ασαφείς αριθμούς, τον $\tilde{A}_2$ στο 0.5

($v_2=0.5$) και τον $\tilde{A}_3$ στο 0.25($v_3=0.25$). Η απόδοση

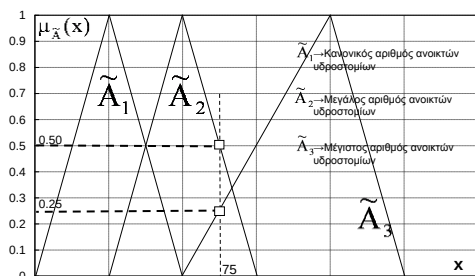
του συστήματος θα είναι αντίστοιχα 0.5 στον $\tilde{B}_2$

($v_2=0.5$) και 0.25 στον $\tilde{B}_1$ ($v_1=0.25$). Θεωρούμε ότι

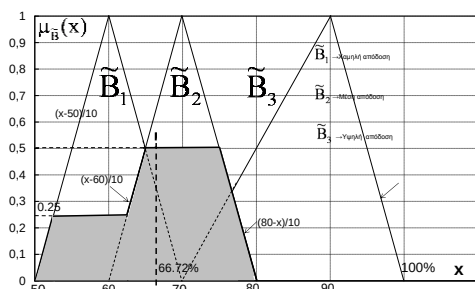
η ένωση αυτών γίνεται με τη μέθοδο των μεγίστων συνδυασμών με την ακραία τιμή όπως φαίνεται στο σχ.2. Προκύπτει λοιπόν ένας ασαφής αριθμός και για την αποσαφήνισή του εφαρμόζεται η μέθοδος του ασαφούς μέσου όρου-κέντρου βάρους (fuzzy mean-COG) που δίνεται από την εξίσωση:

$$b = M(\tilde{B}) = \frac{\sum_{-\infty}^{+\infty} t \mu_{\tilde{B}}(t) dt}{\sum_{-\infty}^{+\infty} \mu_{\tilde{B}}(t) dt} \quad (5)$$

Ο αριθμητής της έκφρασης αυτής αποτελεί το άθροισμα των ροπών όλων των τμημάτων της απόδοσης που μετέχουν στον κανόνα, ενώ ο παρονομαστής αποτελεί το εμβαδόν όλων των τμημάτων της απόδοσης που μετέχουν στον κανόνα.



Σχήμα 1. Παράσταση του αρδευτικού δικτύου



Σχήμα 2. Παράσταση του αντλιοστασίου

$$I_1 = \int_{50}^{52.5} 0.1(t-50)dt + \int_{52.5}^{62.5} 0.25tdt + \int_{62.5}^{65} 0.1(t-60)dt$$

$$I_2 = \int_{62.5}^{65} 0.25tdt + \int_{65}^{75} 0.5tdt + \int_{75}^{80} 0.1(80-t)dt$$

$$L_1 = \int_{50}^{52.5} 0.1(t-50)dt + \int_{52.5}^{62.5} 0.25tdt + \int_{62.5}^{65} 0.1(t-60)dt$$

$$L_2 = \int_{62.5}^{65} 0.25tdt + \int_{65}^{75} 0.5tdt + \int_{75}^{80} 0.1(80-t)dt$$

$$M(\tilde{B}) = (I_1 + I_2) / (L_1 + L_2) = 667.18 / 10 = 66.72\%$$

Επομένως η απόδοση του αντλιοστασίου είναι 66.72%, και η πίεση των υδροστομίων ανέρχεται σε $\sim P=2.67$ at ενώ η παροχή τους θα είναι $d=4.67$ L/s.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.

- Ο α΄ τύπος του Clément αδυνατεί να δώσει απάντηση για τις περιπτώσεις όπου ο αριθμός των καλλιεργητών N_1 είναι μεγαλύτερος από τον αριθμό N των ανοικτών υδροστομίων που υπολογίστηκαν με τον τύπο αυτόν.
- Όταν συμβεί αυτό δεν σταματά η λειτουργία του δικτύου, αλλά το αντλιοστάσιο προσαρμόζεται στις απαιτήσεις του δικτύου μειώνοντας και την παροχή στην κεφαλή και στα υδροστόμια του δικτύου, αλλά επίσης και την πίεση.
- Το μοντέλο που αναπτύχθηκε με βάση τους ασαφείς κανόνες, δίνει ποσοτική απάντηση στα παραπάνω χαρακτηριστικά του δικτύου και κρίνεται απαραίτητο για τη σωστή διαχείριση του αρδευτικού δικτύου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΕΛΛΗΝΙΚΗ

Μπαλλάς Λ., 2007, «Διαχείριση υδατικών πόρων με τη βοήθεια ασαφών συστημάτων- Εφαρμογή στην υδρολογική λεκάνη Βόλβης», Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, σελ. 276.

Τζιμόπουλος Χ., 1982. «Γεωργική υδραυλική- Συλλογικά αρδευτικά δίκτυα με καταιονισμό», Τόμος II, σελ. 263.

Τζιμόπουλος Χρ. και Μπαλλάς Λ. 2006, «Πρόβλεψη του δείγματος τιμών ενός βροχομετρικού σταθμού με ασαφή λογική», 10ο Πανελλήνιο επιστημονικό συνέδριο της Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης (ΕΥΕ), «Διαχείριση Υδατικών Πόρων και Προστασία Περιβάλλοντος – Σύγχρονες Θεωρήσεις, Προβλήματα και Προοπτικές», Ξάνθη.

Τζιμόπουλος Χρ. και Μπαλλάς Λ. 2007α, «Προσομοίωση της διακύμανσης της στάθμης της λίμνης Βόλβης με εφαρμογή των ασαφών κανόνων», 6ο Εθνικό Συνέδριο της ΕΕΔΥΠ, «Ολοκληρωμένη διαχείριση υδατικών πόρων με βάση τη λεκάνη απορροής», Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.

Τζιμόπουλος Χ. και Μπαλλάς Λ., 2007β, «Συστήματα ασαφών κανόνων για τον υπολογισμό υδρογραφήματος εκροής», Περιοδικό Υδροτεχνικά, Ελληνική Υδροτεχνική Ένωση, Τόμος 17, σελ. 19-32.

ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ

Bárdossy A., and Duckstein L., 1995. *Fuzzy rule-based modeling with applications to geophysical, biological and engineering systems*. CRC Press, Boca Raton, Fla, 232 pp.

Clément R., 1955, "Le calcul des débits dans les canalisations d' irrigation", Association Amicale des Ingénieurs du Genie Rural- Journées d' études sur l' irrigation, 27-30 Juin, France.

Clément R., 1966, "Calcul des débits dans les reseaux d' irrigation fonctionnant à demande", La Houille Blanche No 2, 159-164.

Tzimopoulos C. and Mpallas L., 2007, "Extrapolating rainfall data using fuzzy rule- based modelling", Global Network for Environmental Science and Technology (GNEST)-University of the Aegean, 10th International Conference on Environmental Science and Technology, Cos Island, Greece.

Tzimopoulos C., Mpallas L., Papaevangelou G.

,2008, "Estimation of evapotranspiration using fuzzy rules and comparison with the Blaney-Criddle method", Journal of environmental science and technology, 1 (4): 181-186.

Tzimopoulos C., Mpallas L., Evangelides C. ,2008, "Fuzzy model comparison to extrapolate rainfall data", Journal of environmental science and technology, 1 (4): 214-224.

Zadeh, L. , 1965, "Fuzzy sets", Information and Control, 8(3):338-353.

Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΛΑΤΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΣΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΠΟΡΩΔΩΝ ΜΕΣΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ

Κάργας Γ¹., Ντούλας Ν²., Νεκτάριος Π²., Κλάδου Α.¹

Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών

¹Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής, Γ.Π.Α

²Τμήμα Επιστήμης Φυτικής Παραγωγής, Γ.Π.Α

Kargas@aua.gr

Στην παρούσα εργασία διερευνάται η επίδραση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του εδάφους στον υπολογισμό της υγρασίας από τον διηλεκτρικό αισθητήρα TDR300 σε τρία πορώδη μέσα. Η διερεύνηση έγινε σε εύρος υγρασίας από την ξηρή κατάσταση μέχρι τον κορεσμό και σε διάφορα επίπεδα αλατότητας του εδαφικού διαλύματος. Από τα αποτελέσματα διαπιστώνεται ότι η σχέση της κατ' όγκο υγρασίας (θ) των πορώδων μέσων και της τετραγωνικής ρίζας της διηλεκτρικής σταθεράς (ϵ) μέχρι ένα επίπεδο της φαινόμενης ηλεκτρικής αγωγιμότητας (σ_b) (0.5 dS/m) είναι γραμμική. Συνέπεια αυτού είναι η ευκολότερη βαθμονόμησης του αισθητήρα αφού γι' αυτήν απαιτείται η γνώση δύο ζευγών τιμών της εδαφικής υγρασίας και της διηλεκτρικής σταθεράς. Συνήθως επιλέγονται οι τιμές στην ξηρή και κορεσμένη κατάσταση του πορώδους μέσου. Από τιμές της φαινόμενης ηλεκτρικής αγωγιμότητας μεγαλύτερες από 0.50 dS/m αποδεικνύεται ότι είναι καταλληλότερη η λογαριθμική σχέση μεταξύ της εδαφικής υγρασίας και της διηλεκτρικής σταθεράς. Η μεταβολή αυτή των σχέσεων για το ίδιο έδαφος οφείλεται στο γεγονός ότι η αυξημένη αλατότητα προκαλεί αύξηση του χρόνου μετάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Έτσι για την ίδια περιεκτικότητα σε υγρασία αλλά κάτω από διαφορετικά επίπεδα αλατότητας ο χρόνος μετάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος στην περίπτωση των αλατούχων εδαφών είναι μεγαλύτερος. Στην περίπτωση αυτή όμως εκτός από τα ζεύγη τιμών της υγρασίας και της διηλεκτρικής σταθεράς χρειάζεται και η γνώση της φαινόμενης ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Με τον τρόπο αυτό επιλύεται το πρόβλημα της μέτρησης της υγρασίας του πορώδους μέσου και στις περιπτώσεις υψηλής αλατότητας με έναν σχετικά εύκολο τρόπο.

Λέξεις-κλειδιά: Διηλεκτρικοί αισθητήρες, βαθμονόμηση, αλατότητα

THE EFFECT OF SALINITY IN THE DETERMINATION OF SOIL MOISTURE BY USING DIELECTRIC DEVICE

Kargas G¹, Ntoulas N², Nektarios P², Kladou A.¹

¹Dep. of Natural Resources Development & Agricultural Engineering

² Department of Crop Science

Kargas@aua.gr

In the present study the impact of soil electrical conductivity on water content determination using the dielectric sensor TDR300 was investigated in three porous media. The study included different water content regimes varying from completely dry to saturation as well as several electrical conductivity levels of soil solution. From the results it was determined that the relation between volumetric water content (θ) of the porous media and the square root of permittivity (ϵ) was linear up to 0.5 dS/m of bulk electrical conductivity (σ_b). Based on this finding TDR300 calibration is facilitated by knowing a pair of water content values (usually completely dry and at saturation) and the values of permittivity. It was also proven that for bulk electrical conductivity values exceeding 0.5 dS/m, the relationship between water content and permittivity becomes logarithmic, rather than linear. The alteration of the relationship type between water content and permittivity for a specific porous medium level is due to the increased travel time of the electromagnetic wave that is caused by the increased electrical conductivity. Thus, for a specific porous medium and for the same water content, the electromagnetic wave travel time increases in accordance to electrical conductivity increase. In such cases it is obvious that apart from the water content pair values and permittivity, the bulk electrical conductivity value is necessary in order to obtain correct water content measurements. In conclusion, the accurate determination of porous media water content using TDR300 dielectric sensor can be resolved relatively easy even at high electrical conductivity values.

Key words: Dielectric sensors, calibration, salinity

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η δυνατότητα απόκτησης μετρήσεων ακριβείας της εδαφικής υγρασίας με τη χρήση της συσκευής TDR έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη πολλών διηλεκτρικών αισθητήρων οι οποίοι χρησιμοποιούν σαν βάση για τον υπολογισμό της θ τη διηλεκτρική σταθερά του εδάφους. Οι Topp et. al., (1980) παρουσίασαν μία εμπειρική εξίσωση η οποία χρησιμοποιείται ευρέως για τον υπολογισμό της θ από την ϵ η οποία γενικά είναι ανεξάρτητη από το είδος του εδάφους και την αλατότητά του. Το υψηλό κόστος της TDR έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη φθηνότερων διηλεκτρικών αισθητήρων, οι οποίοι όμως λειτουργούν σε πολύ χαμηλότερες συχνότητες.

Οι Ferre and Topp (2002) έδειξαν ότι η εξίσωση των Topp et. al. (1980) είναι ισοδύναμη με μία γραμμική σχέση μεταξύ της τετραγωνικής ρίζας της ϵ και της θ :

$$\theta = 0.115\sqrt{\epsilon} - 0.176 \quad (1)$$

Η εξίσωση (1) μπορεί να μετασχηματιστεί στην εξίσωση (2):

$$\sqrt{\epsilon} = \alpha_1\theta + \alpha_0 = 8.69\theta + 1.52 \quad (2)$$

όπου α_1 είναι η τιμή της κλίσης της ευθείας και α_0 η τιμή της τετραγωνικής ρίζας της ϵ όταν $\theta=0$.

Η ύπαρξη γραμμικής σχέσης μεταξύ της τετραγωνικής ρίζας της ϵ και της θ έχει παρατηρηθεί και σε άλλους διηλεκτρικούς αισθητήρες σε ανόργανα κυρίως εδάφη. (Seyfried and Murdock, 2004; Kargas and Kerkides, 2008; Kargas et al., 2011; Kargas and Soulis 2012). Επίσης στους διηλεκτρικούς αισθητήρες δεν έχει εξεταστεί λεπτομερώς η επίδραση της EC στην μέτρηση της θ και υπονοείται ότι αυτοί συμπεριφέρονται με παρόμοιο τρόπο με την TDR (Kargas and Kerkides 2010, 2012.)

Οι διηλεκτρικοί αισθητήρες όμως λειτουργούν σε πολύ χαμηλότερες συχνότητες συγκριτικά με την συσκευή TDR. Στην περίπτωση αυτή όμως το φανταστικό μέρος της διηλεκτρικής σταθεράς, η οποία είναι ένας μιγαδικός αριθμός, μπορεί να αποκτήσει σημαντικές τιμές ιδιαίτερα σε καθεστώς υψηλής αλατότητας. Έτσι η τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς η οποία μετρείται με τους αισθητήρες η οποία στην περίπτωση του TDR θεωρείται ίση με το πραγματικό μέρος του μιγαδικού αριθμού, μπορεί να είναι μεγάλη με αποτέλεσμα την υπερεκτίμηση της υγρασίας (θ) σε αυτές τις περιπτώσεις

Γενικά έχουν αναπτυχθεί δύο διαφορετικές μεθοδολογίες για την βαθμονόμηση των αισθητήρων. Στην πρώτη περίπτωση η σχέση μεταξύ της ϵ και της θ αποκτάται σε δείγματα εδάφους με προκαθορισμένη υγρασία η οποία είναι ομοιόμορφα κατανομημένη στην εδαφική μάζα (Seyfried et al., 2005). Η δεύτερη είναι η μέθοδος διήθησης από την βάση μιας στήλης η οποία περιέχει το εδαφικό δείγμα (Young et. al. 1997). Με τη μέθοδο αυτή, η οποία είναι σχετικά γρήγορη, μπορούν να ληφθούν

πολλά πειραματικά σημεία ϵ - θ . Όμως έχει το μειονέκτημα ότι η κατανομή της υγρασίας είναι ανομοιόμορφη με αποτέλεσμα ο υπολογισμός της ϵ να γίνεται με διαφορετικό τρόπο από αυτόν της ομοιόμορφης υγρασίας (Kargas and Kerkides 2009; Kargas et.al., 2011).

Ο αισθητήρας TDR300 ο οποίος είναι σχετικά καινούργιος, επειδή παρέχει την δυνατότητα αλλαγής του μήκους των ραβδίων του έχει χρησιμοποιηθεί μέχρι τώρα κυρίως σε περιπτώσεις υποστρωμάτων περιορισμένου βάθους σε ταρατσόκηπους ή σε θερμοκήπια. Έτσι πολύ λίγα είναι γνωστά για την συμπεριφορά του και για την επίδραση που έχουν διάφορες εδαφικές ιδιότητες στην ακρίβεια των μετρήσεων του.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση της επίδρασης της εδαφικής αλατότητας στις εξισώσεις βαθμονόμησης του TDR300 σε τρία διαφορετικά πορώδη μέσα και αν αυτές οι εξισώσεις διαφέρουν μεταξύ τους.

2.ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1. Ο αισθητήρας TDR300

Ο αισθητήρας TDR300 είναι εφοδιασμένος με δύο μεταλλικά ραβδία, τα οποία λειτουργούν σαν κυματοδηγοί. Το εκπεμπόμενο σήμα του αισθητήρα μεταφέρεται διαμέσου των ραβδίων και ανακλάται, όταν φτάσει στο άκρο τους. Οι μετρήσεις της συσκευής αναφέρονται στην περίοδο του σήματος (P)(μseconds), η οποία είναι αντίστροφη της συχνότητας του. Όσο μεγαλύτερη είναι η θ του πορώδους μέσου τόσο μεγαλύτερη είναι και η περίοδος του σήματος. Ο όγκος αναφοράς του εδαφικού δείγματος είναι κύλινδρος ύψους όσο το μήκος των ραβδίων και διαμέτρου μεγαλύτερης κατά 3 cm εξωτερικά των ραβδίων. Ο TDR300 έχει ενσωματωμένη βαθμονόμηση μεταξύ της P και της θ για τα ανόργανα πορώδη μέσα και τα μέσα με υψηλή περιεκτικότητα σε άργιλο (Spectrum Technologies, Inc., 2009).

Για την επίτευξη μέγιστης ακρίβειας στον υπολογισμό της θ ο κατασκευαστής συνιστά την πραγματοποίηση ειδικής βαθμονόμησης του αισθητήρα. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν ραβδία μήκους 12 cm.

2.2. Πορώδη μέσα

Στην παρούσα εργασία εξετάστηκαν τρία διαταραγμένα πορώδη μέσα Ένα αμμώδες (S), ένα αργιλώδες(C), και ένα υπόστρωμα με κατ' όγκο αναλογίες συστατικών SL15:PUM40:PER20:C20:Z5 όπου (SL) αμμοπηλώδες έδαφος, (PUM) ελαφρόπετρα, (C) κομπόστα, Περλίτης (PER) και (Z) ζεόλιθος.

2.3. Μετρήσεις σε υγρά γνωστής διηλεκτρικής σταθεράς και ηλεκτρικής αγωγιμότητας

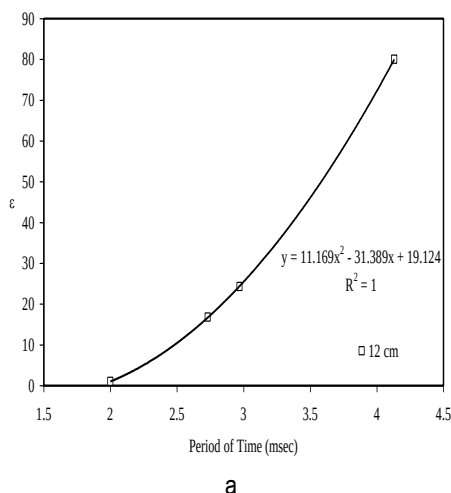
Για την εύρεση της σχέσης μεταξύ της P και της ϵ , την οποία δεν παρέχει ο κατασκευαστής, ελήφθησαν οι μετρήσεις της P στον αέρα, στην βουτανόλη, στην αιθανόλη και σε απιονισμένο νερό

θερμοκρασίας 20° C. Χρησιμοποιήθηκαν ο αέρας και τα τρία παραπάνω υγρά επειδή είναι γνωστή η διηλεκτρική τους σταθερά, 1, 16.8, 24.3 και 80 αντίστοιχα και έτσι ήταν δυνατόν να ευρεθεί η σχέση της ϵ με την P .

Η ευαισθησία του TDR300 στην ηλεκτρική αγωγιμότητα εξετάστηκε κατ' αρχή σε 25 υγρά διαλύματα KCl των οποίων η ηλεκτρική αγωγιμότητα μεταβλήθηκε από 0 dS m⁻¹ έως 10 dS m⁻¹. Σε κάθε τιμή της EC έγινε καταγραφή της τιμής της P .

2.4. Διαδικασία μελέτης στα πορώδη μέσα

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των ανεξάρτητων δειγμάτων προκαθορισμένης υγρασίας. Τα ξηρά δείγματα τοποθετήθηκαν αρχικά σε δοχείο προκαθορισμένου όγκου 25×15×10 cm για να υπολογιστεί η φαινόμενη πυκνότητα ρ_{ϕ} (gr/cm³). Στην συνέχεια τοποθετήθηκαν σε λεκάνη όπου προστίθετο κάθε φορά συγκεκριμένη ποσότητα απιονισμένου νερού για να αποκτηθεί προκαθορισμένη υγρασία. Σε κάθε επίπεδο υγρασίας τα δείγματα ανακατεύονταν καλά μέχρι να ομογενοποιηθούν υγρασιακά πλήρως. Οι τιμές της πραγματικής υγρασίας των εδαφών και των υποστρωμάτων (θ_m) που αποκτήθηκαν είναι 0, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30 και 0.35 cm³/cm³. Μετά



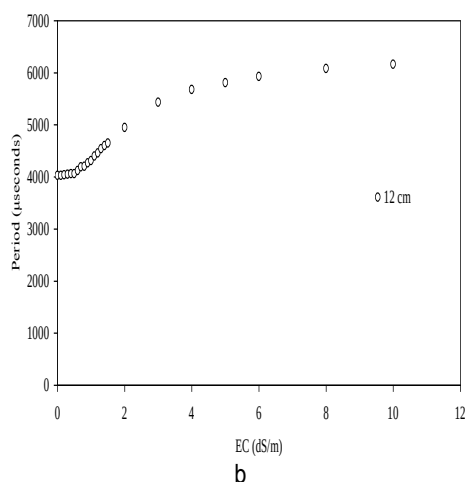
την υγρασιακή τους ομογενοποίηση τα δείγματα, τοποθετήθηκαν στο δοχείο 25×15×10 cm. Στην συνέχεια ελήφθησαν οι μετρήσεις με τον αισθητήρα. Μετά το πέρας όλων των μετρήσεων ακολουθούσε ξήρανση των δειγμάτων. Με τον τρόπο αυτό έγινε ανεξάρτητος υπολογισμός της θ_m με την αξιοποίηση της ρ_{ϕ} . Επίσης μετά την έξοδο από τον φούρνο και αφού μειώνονταν η θερμοκρασία στους 25°C γινόταν πάντα μέτρηση της P σε πλήρες ξηρό δείγμα δηλαδή σε $\theta_m=0$.

Για να διερευνηθεί λεπτομερέστερα η επίδραση της αλατότητας εξετάστηκε και το αμώδες μέσο σε διάφορα επίπεδα EC εκτός από τα υγρά διαλύματα. Ξεκινώντας από ξηρή άμμο οι προκαθορισμένες υγρασίες αποκτήθηκαν με τέσσερα διαφορετικά διαλύματα 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 και 5 dS/m. Η απόκτηση κάθε προκαθορισμένης υγρασίας έγινε με τον ίδιο τρόπο που προαναφέρθηκε με το απιονισμένο νερό. Συνολικά κατασκευάστηκαν 36 δείγματα διαφορετικής θ_m και ηλεκτρικής αγωγιμότητας.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1. Μετρήσεις στα υγρά

Στο Σχήμα 1α παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από το πείραμα στα υγρά για την εύρεση της σχέσης μεταξύ της P και της ϵ για μήκος ραβδίων 12 cm.



Σχήμα 1.(α). Η σχέση μεταξύ της ϵ και της P σε msec για μήκος ραβδίων 12 cm.(β). Η σχέση μεταξύ της EC και της περιόδου (t) σε microseconds

Η σχέση P - ϵ η οποία προέκυψε για τον υπολογισμό της ϵ στα πορώδη μέσα, από τις μετρήσεις της P είναι

$$\epsilon = 11.169P^2 - 31.389P + 19.124 \quad (3)$$

Από το Σχήμα 1b φαίνεται ότι η P αρχίζει να αυξάνεται όταν η ηλεκτρική αγωγιμότητα υπερβαίνει τα EC 0.2 dS/m. Έτσι ενώ ξεκινά από τιμή περίπου 3600 msec για EC 0 dS/m καταλήγει στην τιμή 6000 msec για EC 10 dS/m. Σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή ο αισθητήρας κατά την εμβάπτιση του σε νερό με EC 0 dS/m οφείλει να δείχνει τιμή υγρασίας 70-75% για μήκος ραβδίων 12 cm. Πράγματι η τιμή της θ που μετρήθηκε ήταν 73.1%. Όμως στην EC 10 dS/m η τιμή της θ ήταν 195%.

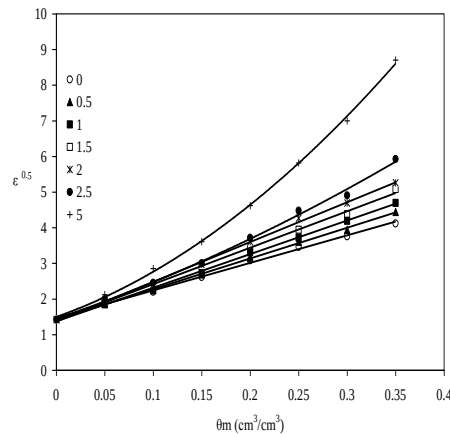
Φαίνεται λοιπόν ότι η ηλεκτρική αγωγιμότητα επηρεάζει σοβαρά την P και άρα προκαλεί τεράστια αύξηση της ϵ και συνεπώς της υπολογιζόμενης υγρασίας (θ).

3.2. Η βαθμονόμηση του αισθητήρα TDR300 για $EC \leq 2$ dS/m και φαινόμενη $EC < 0.5$ dS/m

Στο Σχήμα 2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από το πείραμα στην άμμο με διαφορετικά επίπεδα αλατότητας. Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι η επίδραση της EC αρχίζει από πολύ μικρές τιμές της. Ακόμα και στην $EC=0.5$ dS/m υπάρχει επίδραση στην ϵ . Όμως η σχέση μεταξύ της τετραγωνικής ρίζας της ϵ και της θ_m παραμένει γραμμική μέχρι $EC=2$ dS/m. Ο συντελεστής R^2 μέχρι και την $EC=2$ dS/m

είναι αρκετά υψηλός με τιμή 0.998. Επιπλέον παρατηρείται ότι οι συντελεστές της γραμμικής σχέσης για $EC=0$ dS/m είναι παρόμοιοι με αυτούς της εξίσωσης (1). Συγκεκριμένα οι τιμές είναι 0.123 και 0.175. Όμως όσο αυξάνεται η EC του διαλύματος οι παράμετροι μεταβάλλονται. Έτσι στην $EC=2$ dS/m οι τιμές είναι 0.089 και 0.121. Πιο συγκεκριμένα για συνήθη τιμή της $\theta=0.2$ cm³/cm³ στα εδάφη για $EC=0$ dS/m η υπολογιζόμενη ε θα είναι 9.26 ενώ για $EC=2$ dS/m θα είναι 12.98. Έτσι βλέπουμε ότι ο ισχυρισμός του κατασκευαστή για μη επίδραση της EC στην ε και στην θ μέχρι $EC=2$ dS/m δεν ισχύει. Πρέπει να υπενθυμίσουμε ότι οι διηλεκτρικές

συσκευές επηρεάζονται όχι από την EC του διαλύματος αλλά από την φαινόμενη EC, η οποία εξαρτάται από την θ του μέσου και την EC του διαλύματος (Rhoades et.al., 1976; Kelleners et.al., 2005; Evett et. al., 2005). Η τιμή της φαινόμενης EC όπως μετρήθηκε από τον διηλεκτρικό αισθητήρα WET-2 στην μέγιστη $\theta=0.35$ cm³/cm³ για EC του διαλύματος 2 dS/m είναι 0.50 dS/m. Συνεπώς το ανώτερο όριο διατήρησης της γραμμικής σχέσης μεταξύ της τετραγωνικής ρίζας της ε και της θ στα διάφορα πορώδη μέσα θα είναι η τιμή της φαινόμενης EC 0.50 dS/m.

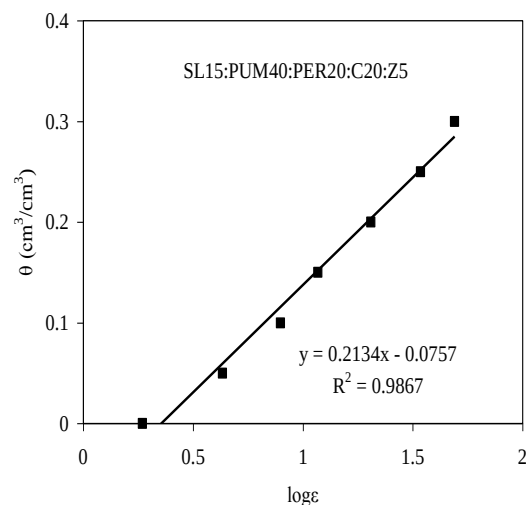
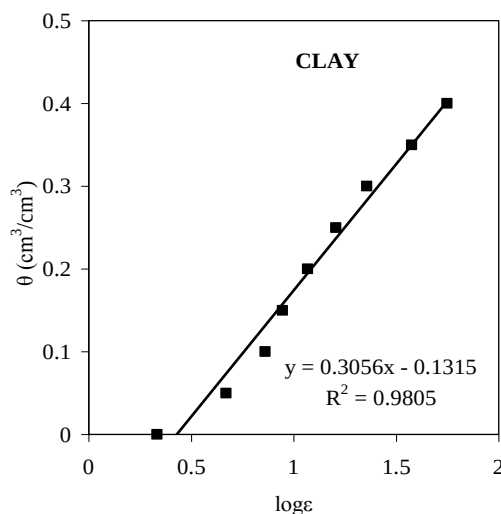


Σχήμα 2. Η σχέση μεταξύ τετραγωνικής ρίζας της ε και της θ_m στα διάφορα επίπεδα αλατότητας (0, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 και 5 dS/m)

3.3. Η βαθμονόμηση του αισθητήρα TDR300 για $EC>2$ dS/m και φαινόμενη $EC>0.50$ dS/m

Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι για $EC>2$ dS/m η γραμμικότητα της σχέσης $\sqrt{\varepsilon} - \theta$ μειώνεται και ειδικά στην $EC=5$ dS/m ο συντελεστής συσχέτισης είναι $R^2=0.96$. Στην περίπτωση αυτή στην $\theta_m=0.20$ cm³/cm³ η τιμή της ε από την εξίσωση (3) αντιστοιχεί στην τιμή $\varepsilon=21.4$. Έτσι η αύξηση της EC προκαλεί

αύξηση της P με συνέπεια για την ίδια τιμή υγρασίας η ε να αποκτά πολύ μεγάλες τιμές. Εάν θεωρήσουμε την σχέση $\sqrt{\varepsilon} - \theta$ γραμμική για $EC=5$ dS/m τότε στην $\theta_m=0.30$ cm³/cm³ η υπολογιζόμενη $\theta=0.38$ cm³/cm³. Φαίνεται λοιπόν από αυτό το παράδειγμα ότι η γραμμική σχέση πάνω από το όριο της φαινόμενης $EC=0.50$ dS/m οδηγεί σε σημαντικές αποκλίσεις.



Σχήμα 3. Η σχέση θ -logε για το αργιλώδες έδαφος και του υποστρώματος.

Για την περίπτωση αυτή εξετάσαμε την λογαριθμική σχέση βαθμονόμησης μεταξύ της θ και

της ε . Η σχέση αυτή έχει παρουσιαστεί σαν καταλληλότερη σε ορισμένες περιπτώσεις πορώδων

μέσων (Sun et.al. 1999; Tomer et.al. 1999; Regalado 2004).

Για $EC=5$ dS/m η λογαριθμική σχέση παρουσιάζει υψηλότερο συντελεστή προσδιορισμού $R^2=0.987$ και μορφή

$$\theta = 0.229 \log \varepsilon - 0.094 \quad (4)$$

Για την τιμή της $\varepsilon=21.4$ η θ η οποία προκύπτει από την (4) είναι $\theta=0.21$ cm³/cm³. Φαίνεται λοιπόν ότι η λογαριθμική σχέση δίνει πολύ καλύτερα αποτελέσματα από την γραμμική σχέση $\sqrt{\varepsilon} - \theta$.

Η μορφή αυτή βαθμονόμησης εξετάστηκε επιπλέον σ' ένα αργιλώδες έδαφος και σ' ένα υπόστρωμα για ταρτσόκηπους στα οποία η μέγιστη φαινόμενη EC είναι πάνω από το όριο των 0.50 dS/m (Σχήμα 3).

Η φαινόμενη EC του αργιλώδους εδάφους είναι 0.59 και του υποστρώματος 0.65 dS/m. Η σχέση $\theta - \log \varepsilon$ παρουσιάζει και στις δύο περιπτώσεις μεγαλύτερο R^2 συγκριτικά με την σχέση $\sqrt{\varepsilon} - \theta$. Επιβεβαιώνεται και από αυτά τα αποτελέσματα ότι υπάρχει ένα όριο πάνω από το οποίο η καμπύλη βαθμονόμησης αλλάζει μορφή.

Συνοψίζοντας από τα παραπάνω αποτελέσματα προκύπτει ότι η απόκτηση μετρήσεων ακριβείας της θ από τον TDR300 συσχετίζεται με την μέτρηση της φαινόμενης EC, διότι από αυτήν εξαρτάται η μορφή της εξίσωσης βαθμονόμησης που θα εφαρμοστεί.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Evelt SR, Tolk JA, Howell TA (2005) TDR laboratory calibration in travel time, bulk electrical conductivity, and effective frequency. *Vadose Zone Journal* **4**, 1020–1029.
- Ferre, P.A. and Topp, G.C. 2002. Time-domain reflectometry. p.434–446. In: G.H. Dane and G.C. Topp. *Methods of soil analysis, Part 4 - Physical methods*. Soil Sci. Soc. Am. J. Inc., Madison, Wisconsin, USA ok
- Kargas, G. and Kerkides, P. 2008. Water content determination in mineral and organic porous media by ML2 theta probe. *Irrig. Drainage* **57**:435–449.
- Kargas, G., and Kerkides, P. (2009). "Performance of the theta probe ML2 in the presence of non-uniform soil water profiles." *Soil Till. Res.*, **103**(2), 425–432.
- Kargas, G., Kerkides, P., 2010. Evaluation of a dielectric sensor for measurements. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* **136**(8), 553–558.
- Kargas, G., Kerkides, P. Seyfried, P.M. and Sgoumbopoulou, A. 2011. WET sensor performance in organic and inorganic media with heterogeneous moisture distribution. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **75**:1244–1252.
- Kargas, G. and Soulis, K. 2012. Performance analysis and calibration of a new low-cost capacitance soil moisture sensor. *J. Irr. Drainage Eng.* **138**:632–641.
- Kargas, G., Kerkides, P. 2012. Comparison of two models in predicting pore water electrical conductivity in different porous media. *Geoderma* **189**:563–573.
- Kelleners T, Seyfried M, Blonquist J, Bilskie J, Chandler D (2005) Improved interpretation of water content reflectometer measurements in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **69**, 1684–1690.
- Regalado C.M. 2004. A physical interpretation of logarithmic TDR calibration equations of volcanic soils and theirs solid fraction permittivity based on Lichtenecker's mixing formulae. *Geoderma* **123**:41–50.
- Rhoades J, P. Ratts and R. Prather, 1976. Effects of liquid-phase electrical conductivity, water content, and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity. *Soil Sci. Soc. Amer. Journal* **40**:651–655.
- Seyfried, M.S. and. Murdock, M.D 2004. Measurement of soil water content with a 50-MHz soil dielectric sensor. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **68**:394–403.
- Seyfried, M.S., Grant, L.E., Du, E. and Humes, K. 2005. Dielectric loss and calibration of the hydra probe soil water sensor. *Vadose Zone J.* **4**:1070–1079.
- Sun Z.J., Young G.D., McFarlane R.A., and B.M. Chambers. 1999. The effect of soil electrical conductivity on moisture determination using time-domain reflectometry in sandy soil. *Can. J. Soil Sci.*
- Spectrum Technologies, Inc. 2009. Field Scout TDR300, Product Manual. 12360 S. Industrial Dr. East, Plainfield, IL 60585 USA.
- Tomer M.D., Clothier B.E., Vogeler I and S. Green. 1999. A dielectric water content relationship for sandy volcanic soils in New Zealand. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **63**:777–781.
- Topp, G.C., Davis, J.L. and Annan. A.P. 1980. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Res.* **16**:574–582.
- 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 Sci. Soc. Am. J.* **61**:707–712.

ΟΙ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΤΩΝ ΠΡΟΦΙΛ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΕΝΟΣ ΓΥΜΝΟΥ ΚΑΙ ΑΡΧΙΚΑ ΚΟΡΕΣΜΕΝΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΜΕ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΕΞΑΤΜΙΣΗΣ

Κάργας Γ., Λαμπροπούλου Α., Μείμαρης Μ., Κερκίδης Π.

Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών

Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων & Γεωργ. Μηχανικής

Τομέας Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, Ιερά Οδός 75, 118 55 Αθήνα
kargas@aua.gr, kerkidesaia.gr, labropoyloyalexia@windowlive.com

Στην παρούσα πειραματική εργασία παρουσιάζονται τα διαφορετικά προφίλ υγρασίας όπως μεταβάλλονται στον χρόνο, σε ένα γυμνό και αρχικά κορεσμένο πηλώδες έδαφος μέχρι το βάθος των 60 cm όταν από την επιφάνεια του επιτρέπεται η όχι η εξάτμιση, ενώ η στάθμη του υπόγειου νερού βρίσκεται σε μεγάλο βάθος. Στην περίπτωση απουσίας εξάτμισης φαίνεται ότι η κίνηση του νερού γίνεται κυρίως κάτω από την επίδραση της βαρύτητας αφού η κλίση του φορτίου πίεσης είναι πολύ μικρή. Στην περίπτωση παρουσίας εξάτμισης στην επιφάνεια του εδάφους, αυτή βαθμιαία ξηραίνεται, με αποτέλεσμα την εμφάνιση αρνητικών κλίσεων του υδραυλικού φορτίου λόγω ισχυρών αρνητικών κλίσεων του φορτίου πίεσης. Από μια χρονική στιγμή και μετά το μέγεθος της κλίσης του φορτίου πίεσης (αρνητικές τιμές) δεν μπορεί να μεγαλώσει περαιτέρω. Αυτό σε συνδυασμό με την μείωση της υδραυλικής αγωγιμότητας λόγω μείωσης της εδαφικής υγρασίας στην ανώτερη εδαφική επιφάνεια οδηγεί στην μείωση της ταχύτητας εξάτμισης. Σε ένα ορισμένο βάθος Z_0 η κλίση του φορτίου πίεσης τείνει προς την τιμή -1 με αποτέλεσμα η ροή να είναι μηδενική. Κάτω από το βάθος Z_0 η κίνηση του νερού γίνεται κυρίως με την επίδραση της βαρύτητας αφού οι κλίσεις του φορτίου πίεσης είναι μικρές.

Από την σύγκριση των απωλειών νερού μέχρι το βάθος των 60 cm ανάμεσα στις δύο περιπτώσεις για χρονικό διάστημα 10 ημερών φαίνεται ότι οι απώλειες είναι μεγαλύτερες στην περίπτωση της απουσίας εξάτμισης από την επιφάνεια διήθησης. Η διαφορά αυτή προκύπτει κυρίως κατά το χρονικό διάστημα της πρώτης ημέρας μετά την διακοπή της άρδευσης.

Λέξεις-κλειδιά: Ανακατανομή εδαφικού νερού, υγρασία, εξάτμιση.

THE DIFFERENT FORMS OF SOIL MOISTURE PROFILES IN BARE SOIL UNDER FREE EVAPORATION AND NO EVAPORATION CONDITIONS

Kargas G., Labropoulou A., Meimaris M. and P. Kerkides

Agricultural University of Athens

Sector of water resources management

kargas@aia.gr, kerkides@aia.gr, labropoyloyalexia@windowlive.com

In this experimental work the soil moisture profiles time evolution is presented for a loamy soil, initially saturated up to a depth of 60 cm, for two different surface conditions. In one case the soil surface is left free to evaporate (FE), while in the other case soil surface evaporation is prevented (NE). Water table is in a great depth in the soil profile. It is found that for the NE case water movement is governed mainly by gravity, since, soil water pressure head gradient is rather small. For the FE case, it is found that soil water up-wards movement, in order to meet atmospheric demands is governed mainly by quite large negative soil water pressure head gradients. In this respect upper soil layer becomes dry quite fast, thus leading unsaturated hydraulic conductivity to very low values. The diminishing value of hydraulic conductivity has as a result the drastic reduction of soil surface water evaporation rate. It is also observed that in a certain depth Z_0 below soil surface the slope of pressure head approaches the value -1 and therefore the slope of hydraulic head approaches the value of 0, thus Darcy's velocity appears to be negligible. Below Z_0 water movement is practically governed by gravity. One could anticipated that soil water losses up to a depth of 60 cm for a quite large time interval of about 10 days, are larger for NE than that for the FE case.

Key words: Redistribution soil water, soil moisture, evaporation

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Όταν η άρδευση ή η βροχόπτωση σταματούν και το ελεύθερο νερό της εδαφικής επιφάνειας απομακρύνεται, η κίνηση του νερού μέσα στο έδαφος δεν σταματά και πιθανότατα διαρκεί για μεγάλο χρονικό διάστημα. Εάν υπάρχει υψηλή υπόγεια στάθμη ή το εδαφικό προφίλ έχει κορεστεί, η κίνηση του νερού μετά το τέλος της διήθησης ορίζεται σαν εσωτερική στράγγιση (Hillel, 1998). Αντίθετα εάν η υπόγεια στάθμη είναι πολύ βαθιά

και το εδαφικό προφίλ δεν έχει φτάσει στον κορεσμό σε μεγάλο βάθος, τότε η κίνηση του νερού ορίζεται σαν ανακατανομή. Αποτέλεσμα και των δύο διαδικασιών είναι το νερό να ανακατανέμεται στο έδαφος αυξάνοντας την υγρασία των κατώτερων εδαφικών στρώσεων ενώ μειώνεται αυτή των ανώτερων εδαφικών στρώσεων.

Στην υποθετική περίπτωση μιας ομοιόμορφου υγρασιακά (κορεσμός) εδαφικής κατατομής με απουσία υπόγειας στάθμης η κίνηση του νερού προς

τις βαθύτερες στρώσεις γίνεται λόγω βαρύτητας αφού οι κλίσεις του φορτίου πίεσης θα είναι σχεδόν μηδενικές.

Οι Hillel και Van Bavel (1976) εξέτασαν την περίπτωση της εσωτερικής στράγγισης σε τρία εδάφη με αριθμητική επίλυση της εξίσωσης Richards. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το αμμώδες έδαφος παρόλο ότι έχει πολύ μικρότερη τιμή υγρασίας κορεσμού στραγγίζει πολύ γρηγορότερα αρχικά. Έτσι στις δύο πρώτες ημέρες χάνει την διπλάσια ποσότητα συγκριτικά με το πηλώδες έδαφος και την πενταπλάσια συγκριτικά με το αργιλώδες. Στην συνέχεια οι διαφορές μειώνονται και μπορούν να αντιστραφούν καθώς η στράγγιση στο αμμώδες έδαφος πρακτικά σταματά ενώ στο πηλώδες και πολύ περισσότερο στο αργιλώδες μπορεί να συνεχίζεται για πολλές ημέρες. Επίσης από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι η αθροιστική στράγγιση και στα τρία κορεσμένα εδάφη μέχρι το βάθος των 116 cm ήταν μεγαλύτερη στην περίπτωση της στράγγισης χωρίς την παρουσία εξάτμισης συγκριτικά με αυτήν παρουσία εξάτμισης.

Τα παραπάνω αποτελέσματα είναι τελείως διαφορετικά εάν στο εδαφικό προφίλ εμφανίζονται στρώσεις με διαφορετικές υδραυλικές ιδιότητες (Hillel and Talpaz, 1977).

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η ανακατανομή του εδαφικού νερού σε ένα αρχικά κορεσμένο πηλώδες έδαφος μέχρι το βάθος των 60 cm για τις περιπτώσεις παρουσίας και απουσίας εξάτμισης.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1. Περιγραφή εδάφους

Το έδαφος αυτό βρίσκεται στον πειραματικό αγρό του εργαστηρίου της Γεωργικής Υδραυλικής όπου εκτελούνται διάφορες πειραματικές-ερευνητικές εργασίες

Στον πίνακα 1 δίνεται η μηχανική ανάλυση του εδάφους κατά βάθος και ο αντίστοιχος τύπος του εδάφους

Πίνακας 1. Μηχανική ανάλυση στα διάφορα βάθη και τύπος του εδάφους

Βάθος cm	Sand %	Silt %	Clay %	Τύπος
0-10	42.4	38.3	19.3	L
10-20	40.7	38.7	20.6	L
20-30	36.4	41.3	22.3	L
30-40	36.7	40.0	23.3	L
40-60	26.7	46.7	26.6	L-CL
60-100	24.4	36.0	39.6	CL

2.2 Πειραματική διαδικασία

Η πειραματική διαδικασία πραγματοποιήθηκε στο αγρόκτημα του εργαστηρίου Γ. Υδραυλικής τον Ιούλιο του 2010. Τα δύο πειραματικά τεμάχια ήταν διπλανά και είχαν διαστάσεις 5X5 m. Στο κέντρο κάθε τεμαχίου τοποθετήθηκε ειδικός σωλήνας

υποδοχής της διηλεκτρικής συσκευής PR2 (Delta –T Device Ltd, User manual for the Profile probe, 2008).

Η συσκευή PR2 μετρά τη θ σε καθορισμένα βάθη του εδάφους. Η διάμετρος της είναι περίπου 25 mm και το μήκος 120 cm. Για τη μέτρηση της θ η συσκευή εισάγεται στον ειδικό σωλήνα και οι τιμές της λαμβάνονται με τη βοήθεια της φορητής συσκευής (HH2). Η PR2 λειτουργεί στη συχνότητα των 100 MHz και το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που δημιουργείται επεκτείνεται σε ακτίνα 10 cm γύρω από τη συσκευή. Με τον τρόπο αυτό προσδιορίζεται η διηλεκτρική σταθερά του εδάφους που περιβάλλει την συσκευή και διαμέσου της διηλεκτρικής σταθεράς (ϵ) του μέσου με την βοήθεια της βιομηχανικής βαθμονόμησης της συσκευής υπολογίζεται η υγρασία του εδάφους (θ). Το σήμα εξόδου της συσκευής σε κάθε βάθος δίνεται σε Volts. Από τις τιμές των Volts διαμέσου της εξίσωσης υπολογίζεται η διηλεκτρική σταθερά.

$$\sqrt{\epsilon} = 1.125 - 5.536V + 67.17V^2 - 234.42V^3 + 413.56V^4 - 356.68V^5 + 121.53V^6 \quad (1)$$

Η θ προσδιορίζεται από την εξίσωση:

$$\theta = \frac{\sqrt{\epsilon} - \alpha_o}{\alpha_1} \quad (2)$$

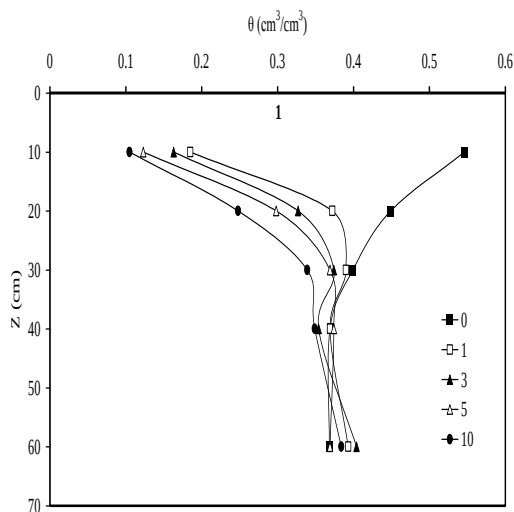
Στην περίπτωση της εργοστασιακής βαθμονόμησης οι τιμές των α_o και α_1 είναι 1.6 και 8.4 αντίστοιχα.

Στα δύο πειραματικά τεμάχια αφού τοποθετήθηκαν οι σωλήνες για την μέτρηση με την PR2 και απομακρύνθηκε η φυσική βλάστηση, εγκαταστάθηκε σύστημα στάγδην άρδευσης σε πυκνή διάταξη ώστε να γίνεται διαβροχή όλου του πειραματικού τεμαχίου. Στην συνέχεια τα πειραματικά τεμάχια αρδεύτηκαν ταυτόχρονα μέχρι να πραγματοποιηθεί κορεσμός της εδαφικής κατατομής μέχρι το βάθος των 60 cm. Μετά την επίτευξη του κορεσμού στο ένα πειραματικό τεμάχιο η επιφάνεια έμεινε ελεύθερη (1) ενώ στο άλλο σκεπάστηκε με διαφανές πλαστικό ώστε να αποτρέπεται η εξάτμιση (2).

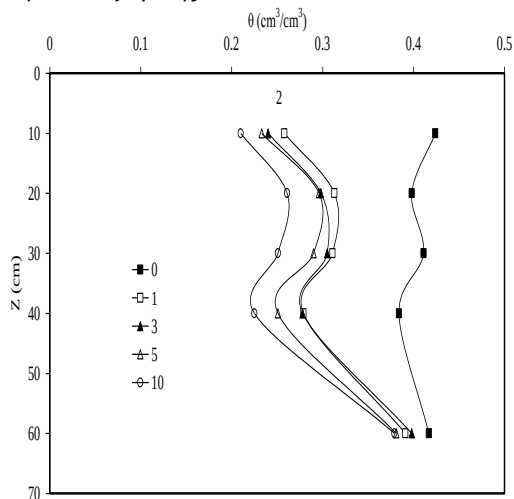
Μετά την διακοπή της άρδευσης λαμβάνονταν μετρήσεις της υγρασίας σε ημερήσια βάση και καθορισμένη ώρα για μεγάλο χρονικό διάστημα.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στα σχήματα 1.1 και 1.2 παρουσιάζεται η χρονική εξέλιξη των κατατομών υγρασίας στα πειραματικά τεμάχια με παρουσία και απουσία εξάτμισης, αντίστοιχα.



Σχήμα 1.1. Μεταβολή των κατατομών υγρασίας κατά τις 10 ημέρες μετά την διακοπή της άρδευσης παρουσία εξάτμισης

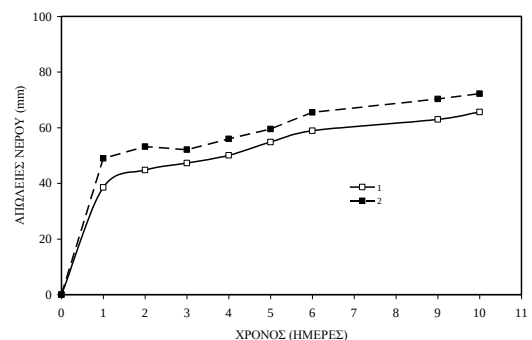


Σχήμα.1.2. Μεταβολή των κατατομών υγρασίας κατά τις 10 ημέρες μετά την διακοπή της άρδευσης απουσία εξάτμισης.

Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι στην περίπτωση της εξάτμισης (σχήμα 1.1) προκαλείται βαθμιαία ξήρανση της εδαφικής επιφάνειας, με αποτέλεσμα την εμφάνιση αρνητικών κλίσεων του υδραυλικού φορτίου λόγω ισχυρών αρνητικών κλίσεων του φορτίου πίεσης. Οι μεγάλες αρνητικές κλίσεις του υδραυλικού φορτίου φαίνεται να αντισταθμίζουν την μεγάλη μείωση της υδραυλικής αγωγιμότητας λόγω μείωσης της υγρασίας. Έτσι κατά το διάστημα λίγων ημερών η ένταση της εξάτμισης είναι πολύ μεγάλη. Το φαινόμενο είναι ιδιαίτερα έντονο κατά την πρώτη ημέρα όπου η επιφανειακή υγρασία μειώνεται από $0.55 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ σε $0.18 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ περίπου. Η μείωση της υγρασίας λόγω επίδρασης της εξάτμισης αλλά και της στράγγισης είναι έντονη μέχρι το βάθος περίπου των 30 cm. Είναι προφανές ότι από μια χρονική στιγμή και μετά ανάλογα με την αποξηραντική ικανότητα της ατμόσφαιρας καθώς και τις υδραυλικές ιδιότητες του πορώδους μέσου το μέγεθος της κλίσης του φορτίου πίεσης (αρνητικές τιμές) δεν μπορεί να μεγαλώσει

περαιτέρω. Αυτό σε συνδυασμό με την μείωση της υδραυλικής αγωγιμότητας λόγω μείωσης της εδαφικής υγρασίας στην ανώτερη εδαφική επιφάνεια οδηγεί στην μείωση της ταχύτητας εξάτμισης. Σε ένα ορισμένο βάθος Z_0 (περίπου 30 cm) η κλίση του φορτίου πίεσης τείνει προς την τιμή -1 με αποτέλεσμα η ροή να είναι μηδενική αφού μηδενίζεται η κλίση του υδραυλικού φορτίου. Κάτω από το βάθος Z_0 η κίνηση του νερού γίνεται κυρίως με την επίδραση της βαρύτητας αφού οι κλίσεις του φορτίου πίεσης είναι σχετικά μικρές.

Στο πειραματικό τεμάχιο 2 (Σχήμα 1.2) είναι εμφανής η μείωση της υγρασίας σε όλο το βάθος της κατατομής μέχρι τα 60 cm ιδιαίτερα κατά την πρώτη ημέρα μετά την διακοπή της άρδευσης. Μάλιστα η μείωση στα βάθη 20,30 και 40 cm είναι σχεδόν ίδιου μεγέθους (περίπου $0.10 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ κατά την πρώτη ημέρα). Στην περίπτωση απουσίας εξάτμισης η κίνηση του νερού γίνεται κυρίως κάτω από την επίδραση της βαρύτητας αφού οι κλίσεις του φορτίου πίεσης είναι πολύ μικρές. Έτσι η ταχύτητα κίνησης του νερού προς τα βαθύτερα στρώματα είναι σχεδόν ίση με την τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας και μειώνεται στο χρόνο λόγω μείωσης της υγρασίας σε κάθε βάθος.



Σχήμα 2. Αθροιστικές απώλειες νερού από ένα αρχικά κορεσμένο εδαφικό προφίλ. 2.1. Ταυτόχρονη εξάτμιση και στράγγιση 22.. Μόνο στράγγιση.

Στο σχήμα 2 παρουσιάζονται συγκριτικά οι απώλειες νερού μεταξύ των δύο διαφορετικών μεταχειρίσεων. Οι υπολογισμοί του αρχικού ύψους νερού που είχε η εδαφική κατατομή μετά την διακοπή της άρδευσης καθώς και οι απώλειες μέχρι το βάθος των 60 cm υπολογίστηκαν με την μέθοδο του τραπέζιου (Κάργας κ.α 2011). Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι οι απώλειες είναι μεγαλύτερες στην περίπτωση στράγγισης με απουσία εξάτμισης. Οι απώλειες αυτές αποδίδονται κυρίως στις διαφορές των απωλειών κατά την πρώτη ημέρα μετά την διακοπή της άρδευσης. Ανάλογα αποτελέσματα για πηλώδες έδαφος είχαν παρατηρήσει και οι Hillel and van Bavel (1976).

4.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα παραπάνω αποτελέσματα δείχνουν ότι η έννοια του «σημείου υδατοικανότητας» του εδάφους είναι γενικά αυθαίρετη αφού απώλειες νερού συνεχίζουν να υπάρχουν και μετά την 2-3 ημέρα από ένα γεγονός άρδευσης ή βροχοπτώσης (Veihmeyer and Hendrickson, 1950). Δεν μπορεί μια δυναμική

διαδικασία και μάλιστα συνεχής όπως είναι η ανακατανομή του νερού να περιγραφεί από μια στατική ιδιότητα. Ειδικά σε λεπτόκοκκα εδάφη η διαδικασία της ανακατανομής μπορεί να διαρκέσει αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Veihmeyer F.J and Hendrickson A.H. 1950. Soil moisture in relation to plant growth. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 1:285-304.
- Hillel D. and Talpaz H. 1977. Simulation of soil water dynamics in layered soils *Soil Sci.* 123:54-62.
- Hillel D. and van Bavel C.H.M. 1976. Dependence of profile water storage on soil hydraulic properties: A simulation model. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 40:807-815.
- Hillel D. 1998. *Environmental soil physics*. San Diego, USA, Academic press.
- Γ. Κάργας, Σουλάι Μ, Παπασωτηρίου Μ.,, Κερκίδης. 2011. Η Επίδραση των καλλιεργητικών φροντίδων στην διήθηση του νερού της βροχής στις ημίξηρες περιοχές. 7^ο συνέδριο ΕΓΜΕ. Αθήνα 5-7/10/2011

Η ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΚΑΜΠΥΛΗ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΣΑΝ ΜΕΤΡΟ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΣΥΣΣΩΜΑΤΩΜΑΤΩΝ

Κάργας Γ., Αλτιναλμάζης Α., Μητροσύλης Δ., Λόντρα Π.

Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών

Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων & Γεωργ. Μηχανικής

Τομέας Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, Ιερά Οδός 75, 118 55 Αθήνα

kargas@aua.gr

Η διατήρηση της συσσωμάτωσης στα εδάφη είναι μεγάλης σημασίας γιατί τους προσδίδει ιδιότητες που επιτρέπουν την δημιουργία ευνοϊκών συνθηκών για την κίνηση του νερού και τον ικανοποιητικό αερισμό τους. Η σταθερότητα των συσσωματωμάτων είναι μεγαλύτερης σημασίας από ότι η απλή ύπαρξή τους. Η κατάσταση συσσωμάτωσης ενός εδάφους και η σταθερότητα των συσσωματωμάτων στο νερό μπορεί να εκτιμηθεί με τον προσδιορισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης συγκράτησης της υγρασίας. Ο προσδιορισμός των αλλαγών της κατανομής του μεγέθους των μεταξύ των συσσωματωμάτων πόρων σ' ένα κλάσμα συσσωματωμάτων ορισμένου μεγέθους, μετά από διαδοχικές διαβροχές του, μας δίνει ένα μέτρο εκτίμησης της σταθερότητας αυτών. Στην παρούσα εργασία εξετάζονται δύο εδάφη (Αμμοπηλώδες και αργιλοπηλώδες) από τα οποία ελήφθησαν τρία κλάσματα συσσωματωμάτων με διαμέτρους, 2-1.2mm, 1.2-0.5mm και 0.5-0.25mm. Σε κάθε κλάσμα μεγέθους συσσωματωμάτων έγιναν δύο έως τρεις διαβροχές και μετά από κάθε διαβροχή επακολούθησε προσδιορισμός της χαρακτηριστικής καμπύλης. Από κάθε χαρακτηριστική καμπύλη υπολογίστηκε η μεταβολή της κατανομής του μεγέθους των πόρων και διαμέσου αυτής εκτιμήθηκε η σταθερότητα των συσσωματωμάτων. Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι οι χαρακτηριστικές καμπύλες και η κατανομή μεγέθους των πόρων στο αμμοπηλώδες έδαφος μοιάζουν και στις τρεις κατηγορίες συσσωματωμάτων με αυτές της άμμου για ίδιες διαστάσεις κόκκων. Στο αργιλοπηλώδες έδαφος οι επαναδιαβροχές προκαλούν μια συνεχή μεταβολή του πορώδους που εκδηλώνεται με μείωση των πόρων μεγάλης ακτίνας και αύξηση των πόρων μικρής ακτίνας. Η χαρακτηριστική καμπύλη συγκράτησης της υγρασίας και η κατανομή μεγέθους των πόρων για το κλάσμα συσσωματωμάτων 0.25-0.5 mm στο αργιλοπηλώδες διαφέρει σημαντικά από τις λοιπές καμπύλες και κατανομές πόρων. Αυτό θα πρέπει να αποδοθεί στην αυξημένη καταστροφή αυτών των συσσωματωμάτων κατά την διαβροχή τους.

Λέξεις κλειδιά: Συσσωματώματα, χαρακτηριστική καμπύλη υγρασίας

SOIL MOISTURE RETENTION CURVE AS AN INDEX TO ASSESS THE AGGREGATES STABILITY

Kargas G., Altinmazis A., Mitrosilis D., and P. Londra

Agricultural University of Athens

Dep. of Natural Resources Development & Agricultural Engineering

Sector of water resources management

kargas@aua.gr

Aggregate stability and size distribution are important properties of soils which affect the aeration and water movement. The aggregate stability is of more importance than there presence. This soil property can be appreciated from soil moisture retention curve (MRC). The changes of pore size distribution in one size fraction of aggregates after successive cycles of wetting and drainage is considered to indicate stability. In the present work we examined two soils and three fractions of aggregates (2-1.2, 0.5-1.2 and 0.25-0.5mm). Each fraction of aggregates was submitted to three successive cycles of wetting and drainage and after each wetting the MRC was determined. From the results it was found that in the three fractions of aggregates of sandy loam soil the MRCs and pore size distribution were similar to MRC and pore size distribution of sand with the same particle size distribution. In the clay loam soil the wetting entailed a change of porosity. More specifically caused the reduction of pores with large radius and increased microporosity.

In addition in the fraction of aggregates (0.25-0.5 mm) of the clay loam soil the MRC and pore size distribution were different from the others MRCs. This may due to the destruction of this size fraction of aggregates during the wetting.

Key words: Aggregates, soil moisture retention curve

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ύπαρξη των εδαφικών συσσωματωμάτων και ιδιαίτερα η σταθερότητά τους αποτελούν κρίσιμες παραμέτρους σε ένα μεγάλο εύρος γεωργικών εφαρμογών. Η εκτίμηση αυτών των παραμέτρων μπορεί να βοηθήσει στην πρόβλεψη της διάβρωσης των εδαφών από την δράση του νερού και του αέρα. Υπάρχουν αρκετοί τρόποι και μέθοδοι για να εκτιμηθεί η σταθερότητα των συσσωματωμάτων. Η κατανομή του μεγέθους των ξηρών συσσωματωμάτων μπορεί να βοηθήσει στην πρόβλεψη της διάβρωσης λόγω του αέρα ενώ ο προσδιορισμός της σταθερότητας στη διαβροχή ίσως είναι καταλληλότερος για την πρόβλεψη της διάβρωσης λόγω της βροχόπτωσης και της επιφανειακής απορροής. Επίσης η μελέτη των συσσωματωμάτων μπορεί να βοηθήσει στην κατανόηση πληθώρας διεργασιών που αφορούν τον σχηματισμό επιφανειακής κρούστας στο έδαφος, την διήθηση και ανακατανομή του εδαφικού νερού, τον αερισμό του εδάφους κ.λ.π.

Η σταθερότητα των συσσωματωμάτων εξαρτάται από φυσικούς, χημικούς και βιολογικούς παράγοντες. Για την αξιολόγηση της σταθερότητας τους έχουν χρησιμοποιηθεί διάφοροι δείκτες οι οποίοι ενσωματώνουν όλους τους παραπάνω παράγοντες. (Bissonnais Y. LE., 1996; Dimoyiannis et.al. 1998)

Οι δυνάμεις που συνδέουν τα εδαφικά τεμαχίδια προς συσσωματώματα εξαρτώνται σε σημαντικό βαθμό από την περιεκτικότητα τους σε νερό. Όμως σημαντικό ρόλο παίζει και ο τρόπος διαβροχής τους (Kemper and Cheril, 1965; Kemper and Koch, 1966).

Για τον προσδιορισμό της σταθερότητας των συσσωματωμάτων οι συνηθέστερες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται είναι: 1) Η μέθοδος του υγρού κοσκινίσματος. Κατά την μέθοδο αυτή ένα δείγμα συσσωματωμάτων συγκεκριμένου μεγέθους τοποθετείται στο ανώτερο μιας σειράς κοσκίνων με φθίνουσα διάμετρο οπών τα οποία κινούνται παλινδρομικά μέσα στο νερό. Με το τέλος της διαδικασίας αυτής υπολογίζεται η εναπομένουσα ποσότητα σε κάθε κόσκινο και εκτιμάται έτσι η σταθερότητα των συσσωματωμάτων στη διαβροχή (Nimmo J.R. and Perkins K.S. 2002). 2) Η μέθοδος του ξηρού κοσκινίσματος. Κατ' αυτήν την μέθοδο αεροξηρανθέντα δείγματα τοποθετούνται σε σύστημα περιστροφικών κοσκίνων διαφορετικών ανοιγμάτων όπου στο τέλος της διαδικασίας ζυγίζεται σε κάθε κόσκινο το βάρος κάθε κλάσματος συσσωματωμάτων. Αρχικά χρησιμοποιήθηκε το κλάσμα των συσσωματωμάτων σε κάθε κόσκινο σαν δείκτης της μηχανικής σταθερότητας (Cheril, 1953) αλλά σχετικά πρόσφατα οι (Perfect et.al., (1998) πρόσθεσαν σαν δείκτη της σταθερότητας την ενέργεια που απαιτείται για το σπάσιμο των συσσωματωμάτων. 3) Η μέθοδος της τεχνητής βροχής. Ο Fares (1980) διερεύνησε την επίδραση των χαρακτηριστικών της τεχνητής βροχής (μέγεθος

σταγόνων, διάρκεια βροχής) στην σταθερότητα των συσσωματωμάτων.

Η χαρακτηριστική καμπύλη υγρασίας (ΧΚΥ) και ειδικά η περιοχή των φορτίων πίεσης κοντά στο κορεσμό έχει χρησιμοποιηθεί από την δεκαετία του 1940 για την εκτίμηση της σταθερότητας των συσσωματωμάτων στη διαβροχή (Childs 1940, 1942). Κατά την μέθοδο αυτή οι αλλαγές που παρατηρούνται σε αυτή την περιοχή της ΧΚΥ μεταξύ δύο διαφορετικών μεταχειρίσεων των συσσωματωμάτων μπορεί να αποτελέσουν δείκτη της σταθερότητας των συσσωματωμάτων. Πιο συγκεκριμένα στην μία περίπτωση η διαβροχή των συσσωματωμάτων έγινε αργά διαμέσου της πορώδους κάψας μιας συσκευής Haines ενώ στην άλλη περίπτωση η ίδια ποσότητα συσσωματωμάτων πριν προσδιοριστεί η ΧΚΥ είχε εμβαπτιστεί απότομα σε νερό. Έτσι μελετώντας τις αλλαγές στην κατανομή του μεγέθους των πόρων μεταξύ των δύο μεταχειρίσεων, όπως αποκαλύπτονται από την ΧΚΥ, μπορεί να εξαχθούν συμπεράσματα για τα συσσωματώματα. Ο αδιάστατος δείκτης προσδιορισμού της σταθερότητας είναι ο λόγος h_1/h_0 , όπου h_0 η τιμή της μέγιστης κλίσης της ΧΚΥ κατά την πρώτη στράγγιση και h_1 κατά την δεύτερη στράγγιση, και κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 0 και 1.

Με την ίδια μέθοδο μπορεί να εκτιμηθεί η σταθερότητα των συσσωματωμάτων μετά από διαδοχικούς κύκλους διαβροχής και ξήρανσης τους. Ο προσδιορισμός των αλλαγών της κατανομής του μεγέθους των πόρων σ' ένα δείγμα κλάσματος συσσωματωμάτων μετά από διαδοχικές διαβροχές του μας δίνει ένα μέτρο εκτιμήσεως της σταθερότητας των συσσωματωμάτων γιατί μετά από κάθε διαβροχή ένα μέρος από τα συσσωματώματα καταστρέφεται και δίνει μικρότερα συσσωματώματα και απλούς εδαφικούς κόκκους.

Οι Collis-George and Figueroa (1984) στηριγμένοι στην εργασία του Childs εισήγαγαν την έννοια του δείκτη δομής (Structural index). Ο δείκτης αυτός μπορεί να αποκτηθεί από την ΧΚΥ και είναι ο λόγος του όγκου του νερού που στραγγίζει μεταξύ του φορτίου πίεσης $H=0$ και του μικρότερου φορτίου H προς την απόλυτη τιμή του φορτίου πίεσης στο σημείο αντιστροφής της ΧΚΥ (inflection point). Ο δείκτης δομής μπορεί να συγκριθεί με τον δείκτη δομής ο οποίος αποκτήθηκε για το ίδιο κλάσμα συσσωματωμάτων αλλά με διαφορετική μεταχείριση π.χ γρήγορη διαβροχή. Επίσης για σύγκριση μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ο δείκτης δομής ενός υλικού με σταθερή δομή π.χ άμμος ίδιου κλάσματος κόκκων. Η σταθερότητα των συσσωματωμάτων μπορεί να υπολογιστεί από τον λόγο των δύο δεικτών δομής για τις δύο μεταχειρίσεις των συσσωματωμάτων και ο λόγος αυτός καλείται σχέση σταθερότητας (stability ratio). Οι τιμές της σχέσης σταθερότητας κυμαίνονται μεταξύ του 0 και του 1. Τιμές της σχέσης σταθερότητας κοντά στην μονάδα υποδηλώνουν μέγιστη σταθερότητα των συσσωματωμάτων.

Στην παρούσα εργασία θα εξεταστούν οι μέθοδοι του Childs και Collis-George and Figueroa ως προς τα αποτελέσματα που δίνουν για την σταθερότητα των συσσωματωμάτων σε ένα αμμοπηλώδες και ένα αργιλοπηλώδες έδαφος.

2. Υλικά και Μέθοδοι

2.1. Περιγραφή εδαφών

Η πειραματική εργασία έγινε σε δύο εδάφη και μία άμμο. Στον πίνακα 1 δίνονται η μηχανική σύστασή τους, η οργανική ουσία, η περιεκτικότητα σε ανθρακικό ασβέστιο, το pH και η ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων (IAK).

Πίνακας 1. Μηχανική ανάλυση, IAK, CaCO₃, pH και οργανική ουσία των δύο εδαφών.

Τύπος εδάφους	Άμμος %	Ιλύς %	Αργίλος %	CaCO ₃ %	Οργανική ουσία (κ.β)%	IAK (meq/100gr)	pH
Αμμοπηλώδες	51.4	30.3	19.3	25.6	2.06	26.3	7.95
Αργιλοπηλώδες	44.4	24.6	31	0	1.48	26.3	6.87

2.2 Πειραματική διαδικασία

Για τον διαχωρισμό των συσσωματωμάτων σε κατηγορίες μεγέθους τα εδάφη αφέθηκαν να αεροξηρανθούν. Στην συνέχεια τα εδάφη τοποθετήθηκαν στην επάνω επιφάνεια μιας στήλης από κόσκινα που είχαν άνοιγμα οπών 2 mm, 1.2 mm, 0.5mm και 0.25mm. Έτσι από κάθε έδαφος ελήφθησαν τρεις κατηγορίες μεγέθους συσσωματωμάτων: i) Από 1.2 mm έως 2 mm ii) Από 0.5 mm έως 1.2 mm και iii) Από 0.25 mm έως 0.5 mm.

Επίσης τα ίδια κλάσματα σε διαστάσεις κόκκων ελήφθησαν και από άμμο.

Για τον προσδιορισμό των ΧΚΥ κάθε κλάσματος χρησιμοποιήθηκε η συσκευή Haines. Κάθε κλάσμα συσσωματωμάτων τοποθετήθηκε και πακεταρίστηκε σε μια συσκευή Haines. Η διαβροχή των συσσωματωμάτων έγινε με την βοήθεια μιας στήλης Mariotte. Στην συνέχεια επακολούθησε η πρώτη αποστράγγιση μέχρι φορτίο πίεσης 45 cm. Μετά έγινε η δεύτερη διαβροχή και επακολούθησε η δεύτερη στράγγιση. Ακολούθως έγινε η τρίτη διαβροχή και στράγγιση. Έτσι για κάθε κλάσμα συσσωματωμάτων πραγματοποιήθηκαν τρεις διαβροχές και στραγγίσεις.

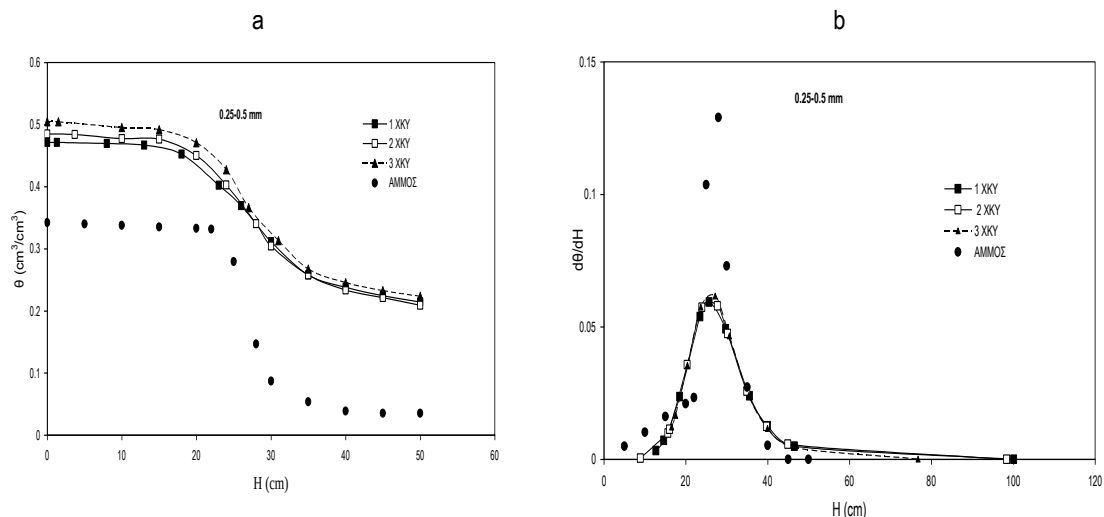
Στα αντίστοιχα κλάσματα της άμμου πραγματοποιήθηκε ένας κορεσμός και μία στράγγιση.

Μετά τον προσδιορισμό των τριών ΧΚΥ για κάθε κλάσμα έγινε προσαρμογή των πειραματικών δεδομένων στην εξίσωση van Genuchten (1980) με την βοήθεια του προγράμματος RETC (Van Genuchten et. al., 1991). Από την σύγκριση των κλίσεων των τριών ΧΚΥ κάθε κλάσματος μπορούν να εξαχθούν άμεσα συμπεράσματα για την κατανομή του μεγέθους των πόρων και την ανθεκτικότητα των συσσωματωμάτων στη διαβροχή.

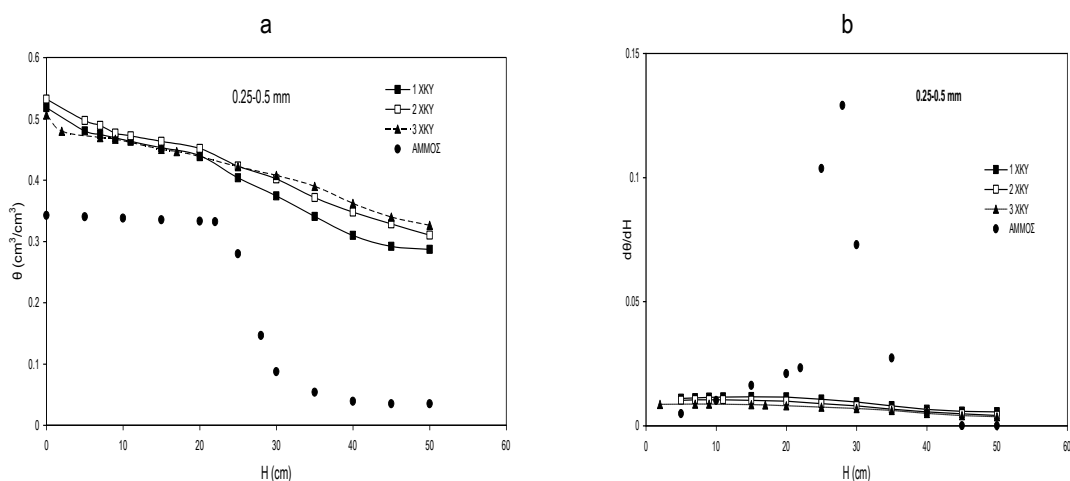
Επίσης η εκτίμηση της σταθερότητας των συσσωματωμάτων έγινε και με την μέθοδο των Collis George and Figueroa (1984). Για κάθε κλάσμα εδάφους βρήκαμε από την ΧΚΥ τον δείκτη δομής (structural index). Στην συνέχεια ο δείκτης δομής διαιρέθηκε με τον δείκτη δομής του ίδιου κλάσματος της άμμου. Από τον λόγο αυτόν προκύπτει η σχέση σταθερότητας (stability ratio) κάθε κλάσματος συσσωματωμάτων ενός εδάφους ως προς την άμμο.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στο σχήμα 1a παρουσιάζονται οι τρεις ΧΚΥ για το κλάσμα 0.25-0.5 mm στο αμμοπηλώδες έδαφος και η ΧΚΥ για το ίδιο κλάσμα της άμμου. Όπως φαίνεται οι τρεις ΧΚΥ των διαδοχικών διαβροχών-στραγγίσεων στο έδαφος δεν παρουσιάζουν κάποια σημαντική διαφορά και οι κλίσεις των ΧΚΥ είναι σχεδόν ίδιες (σχήμα 1b). Επίσης οι ΧΚΥ και οι κατανομές των πόρων μοιάζουν με της άμμου, παρά το γεγονός ότι το έδαφος συγκρατεί πολύ μεγαλύτερο ποσοστό υγρασίας. Συνεπώς αυτό το κλάσμα συσσωματωμάτων στο συγκεκριμένο έδαφος παρουσιάζει μεγάλη σταθερότητα. Τα ίδια αποτελέσματα προκύπτουν και από την εφαρμογή της μεθόδου των Collis George and Figueroa όπου ο stability ratio είναι περίπου 1. Ο αντίστοιχος structural index για το έδαφος είναι 0.010 ενώ για την άμμο 0.011. Ιδια σχεδόν αποτελέσματα προκύπτουν και για τα υπόλοιπα κλάσματα συσσωματωμάτων του ίδιου εδάφους.



Σχήμα 1. α.Οι τρεις ΧΚΥ των διαδοχικών αποστραγγίσεων του κλάσματος 0.25-0.5 mm καθώς και η ΧΚΥ του αντίστοιχου κλάσματος της άμμου β.Οι κατανομές των πόρων των ΧΚΥ του αμμοπηλώδους εδάφους και της άμμου.



Σχήμα 2. α.Οι τρεις ΧΚΥ των διαδοχικών αποστραγγίσεων του κλάσματος 0.25-0.5 mm καθώς και η ΧΚΥ του αντίστοιχου κλάσματος της άμμου β.Οι κατανομές των πόρων των ΧΚΥ του αργιλοπηλώδους εδάφους και της άμμου.

Στο σχήμα 2α παρουσιάζονται οι ΧΚΥ για το ίδιο κλάσμα συσσωματωμάτων για το αργιλοπηλώδες έδαφος και την άμμο. Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι η ΧΚΥ του συγκεκριμένου κλάσματος συσσωματωμάτων διαφέρει σημαντικά από αυτήν της άμμου. Αντίθετα οι άλλες δύο κατηγορίες συσσωματωμάτων (1.2-2 και 0.5-1.2 mm) παρουσιάζουν ίδιας μορφής ΧΚΥ με αυτές της άμμου. Το γεγονός αυτό μπορεί να υποδηλώνει ότι η σταθερότητα των συσσωματωμάτων του συγκεκριμένου εδάφους μπορεί να αυξάνει όσο αυξάνει το μέγεθος των συσσωματωμάτων. Από το σχήμα 2α φαίνεται ότι οι επαναδιαβροχές προκαλούν μια συνεχή μεταβολή του πορώδους που εκδηλώνεται με την μείωση των πόρων μεγάλης

ακτίνας και αύξηση των πόρων μικρής ακτίνας. Οι μεταβολές αυτές έχουν σαν αποτέλεσμα την βαθμιαία αύξηση της περιεκτικότητας των δειγμάτων σε νερό στην πίεση των 50 cm. Στο σχήμα 2b παρουσιάζονται οι κατανομές των πόρων των ΧΚΥ του εδάφους και της άμμου. Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι η κατανομή των πόρων είναι τελείως διαφορετική μεταξύ του εδάφους και της άμμου. Μάλιστα τα αποτελέσματα είναι διαφορετικά συγκριτικά με αυτά στο αμμοπηλώδες έδαφος. Η τιμή του stability ratio γι' αυτό το κλάσμα συσσωματωμάτων του αργιλοπηλώδους εδάφους είναι 0,88-0,9 Έτσι φαίνεται ότι τα συσσωματώματα αυτά έχουν μικρότερη σταθερότητα συγκριτικά από αυτά της ίδιας κλάσης του αμμοπηλώδους εδάφους.

Από τα πειραματικά αποτελέσματα φαίνεται ότι η εφαρμογή διαδοχικών κύκλων διαβροχής και στράγγισης μπορεί να αποτελέσει μέτρο της εκτίμησης της σταθερότητας των συσσωματωμάτων.

Πρέπει να υπογραμμισθεί όμως ότι στην εργασία αυτή η διαβροχή των συσσωματωμάτων στον κορεσμό δεν διήρκεσε μεγάλο χρονικό διάστημα (περίπου μισή ώρα κάθε φορά). Έτσι είναι αναγκαίο να εξεταστεί και η περίπτωση κατά την οποία τα συσσωματώματα θα εκτεθούν στην δράση του νερού μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα. Επίσης είναι αναγκαίο στα εδάφη τα οποία έχουν μεγάλη περιεκτικότητα σε άμμο να υπάρχει εκτίμηση του μεγέθους των κόκκων της άμμου για πιο εμπειρισταμένη εκτίμηση των αποτελεσμάτων.

4. Βιβλιογραφία

Περιοδικά

- Bissonais Y. LE. 1996. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *European J. of Soil Sci.* 425-437.
- Chepil, W.S. 1953. Field structure of cultivated soils with special reference to erodibility by wind. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 17:185-190.
- Childs E.C. 1940. The use of soil moisture characteristics in soil studies. *Soil Sci.* 50:239-252.
- Childs E.C. 1942. Stability of clay soils. *Soil Sci.* 53:79-92.
- Collis-George N. And B.S. Figueroa. 1984. The use of high energy moisture characteristic to assess soil stability. *Aust. J. Soil Res.* 22:349-356.

Dimoyiannis D.G., Tsadilas C.D. and Valmis S. 1998. Factors affecting aggregate instability of Greek agricultural soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 1239-1251.

Farres P.J. 1980. Some observations on the stability of soil aggregates to raindrop impact. *Catena* 7:223-231.

Kemper W.D. and W.S. Chepil 1965. Size distribution of aggregates p.499-510. In C.A.Black (ed) *Methods of soil analysis. Part 1. Agron. Monogr.* 9. ASA Madison, WI.

Kemper W.D. and E.J. Koch. 1966. Aggregate stability of soils from the western portions of the United States and Canada. *USDA Tech. Bull.* 1355. U.S. Gov. Print. Office, Washington, DC.

Perfect E., Q. Zhai and R.L. Blevins. 1998. Estimation of Weibull brittle fracture parameters for heterogeneous materials *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62:1212-1219.

van Genuchten M. Th., 1980. *A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils.* *Soil Sci. Soc. Am. Journal* 44, 892-898.

van Genuchten MT, Leij FJ, Yates SR. 1991. *The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils.* U.S.D.A., Riverside, California.

Κεφάλαια βιβλίων

- Nimmo J.R and Perkins K.S. 2002. Aggregate stability and size distribution In: Dane J. and Topp G.C (Co-editors). *Methods of Soil Analysis, Part 4, Physical Methods*, Soil Science Society of America, Inc., pp317-328.

ΟΡΙΟΘΕΤΗΣΗ ΥΔΑΤΟΡΕΜΑΤΟΣ ΜΙΚΡΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΧΩΡΙΣ ΥΔΡΟΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΕ ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ

Σταύρος Γιαννόπουλος¹, Ευαγγελία Πουρναρά¹, Χρήστος Τζιμόπουλος¹, Χρήστος Ευαγγελίδης¹

¹Εργαστήριο Υδραυλικών Έργων και Διαχείρισης Περιβάλλοντος, Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τ.Κ. 54124 Θεσσαλονίκη

Η οριοθέτηση των υδατορεμάτων στην Ελλάδα πραγματοποιείται σύμφωνα με το νόμο 3010/2002. Οι σχετικές μελέτες απαιτούν λεπτομερείς υδρολογικούς και υδραυλικούς υπολογισμούς. Κρίσιμη παράμετρο του προβλήματος αποτελεί ο καθορισμός της παροχής σχεδιασμού (παροχή αιχμής), καθώς στις περισσότερες περιπτώσεις στα υδατορέματα (μόνιμης και εφήμερης ροής) υπάρχει έλλειψη υδρομετρήσεων, οπότε η βαθμονόμηση ενός μοντέλου για τις υφιστάμενες συνθήκες δεν είναι εφικτή. Για τον καλύτερο προσδιορισμό των σχετικών παραμέτρων πρέπει να χρησιμοποιούνται προηγμένες υπολογιστικές μέθοδοι. Η χρήση των Ψηφιακών Μοντέλων Εδάφους (DEM) και των GIS διευκολύνουν τον καθορισμό των μορφολογικών χαρακτηριστικών και των τιμών των κατανεμημένων παραμέτρων για την εκτίμηση της παροχής σχεδιασμού. Τα λογισμικά ArcGIS και RMS for AUTOCAD της BOSS είναι ιδιαίτερα χρήσιμα σε μελέτες οριοθέτησης υδατορεμάτων.

Λέξεις κλειδιά: υδατόρεμα, λεκάνη απορροής, οριοθέτηση, Γ.Σ.Π., παροχή σχεδιασμού, συνθετικά υδρογραφήματα

WATERCOURSE DEMARCATION IN A SMALL UNGAUGED WATERSHED WITH MODERN METHODS

Stavros Yannopoulos¹, Evaggelia Pournara¹, Christos Tzimopoulos¹, Christos Evaggelidis¹

¹Laboratory of Hydraulic Works and Environmental Management, Department of Rural and Surveying Engineering, Aristotle University of Thessaloniki, GR-54124 Thessaloniki, Greece

giann@vergina.eng.auth.gr; evag_pournara@hotmail.com; tzimop@eng.auth.gr; evan@vergina.eng.auth.gr

Stream demarcation in Greece is realized in accordance to Law 3010/2002. Relevant studies require detailed hydrological and hydraulic calculations. Critical parameter of the problem is the determination of the design discharge. It is a difficult problem, since in most cases there is a lack of hydrometric measurements for both permanent and ephemeral flow streams. As a result the calibration of any model for the existing conditions is not feasible. In order to identify better the relevant parameters, advanced computational methods should be used. The use of Digital Elevation Models (DEM) and G.I.S. facilitate the determination of the morphological characteristics and the values of distributed parameters for the estimation of design discharge. The ArcGIS software and RMS for AUTOCAD of BOSS is particularly useful in studies of stream demarcation.

Key words: watercourse, watershed, demarcation, G.I.S., design discharge, synthetic hydrographs

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα υδατορέματα (μη πλεύσιμοι ποταμοί, χείμαρροι, ρέματα και ρυάκια) που βρίσκονται εντός ή εκτός ρυμοτομικού σχεδίου ή εντός οικισμών που δεν έχουν ρυμοτομικό σχέδιο οριοθετούνται σύμφωνα με το ν. 3010/2002 (άρθρο 5). Η οριοθέτηση συνίσταται στον καθορισμό και στην επικύρωση των πολυγωνικών γραμμών εκατέρωθεν της βαθιάς γραμμής του υδατορέματος, οι οποίες περιβάλλουν τις γραμμές της πλημμύρας, τις όχθες, καθώς και τα τυχόν φυσικά και τεχνητά στοιχεία, που αποτελούν μέρος του ρέματος. Η οριοθέτηση ενός υδατορέματος είναι καθοριστικής σημασίας θέμα και για την αντιπλημμυρική προστασία μιας περιοχής, εφόσον προστατεύει την περιοχή του υδατορέματος από εξωτερικές επεμβάσεις.

Η μελέτη οριοθέτησης ενός υδατορέματος απαιτεί λεπτομερείς υδρολογικούς και υδραυλικούς υπολογισμούς. Για τη γενική διάταξη των έργων κρίσιμη παράμετρο αποτελεί ο καθορισμός της παροχής σχεδιασμού (παροχή αιχμής). Στην περίπτωση των λεκανών απορροής χωρίς υδρομετρήσεις ο καθορισμός της παροχής αυτής είναι ένα δύσκολο πρόβλημα, καθώς στις

περισσότερες περιπτώσεις στα υδατορέματα, μόνιμης και εφήμερης ροής, υπάρχει έλλειψη υδρομετρήσεων, οπότε η βαθμονόμηση ενός μοντέλου για τις υφιστάμενες συνθήκες δεν είναι εφικτή.

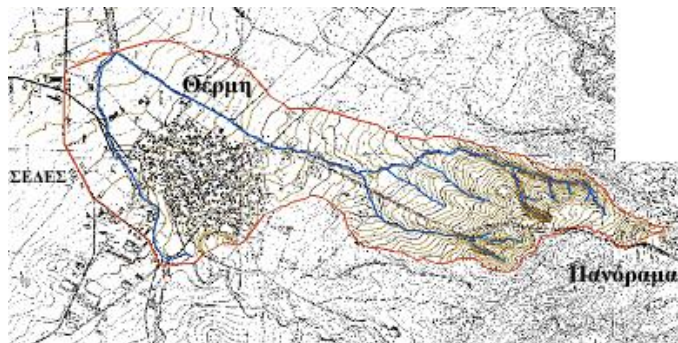
Οι απαραίτητες μελέτες απαιτούν εκτεταμένη και προσεκτική εξέταση των περιβαλλοντικών και υδραυλικών συνθηκών, υφιστάμενων και προβλεπόμενων, τόσο της κοίτης, όσο και της λεκάνης απορροής του υδατορέματος. Για τον καλύτερο προσδιορισμό των παραμέτρων θα πρέπει να χρησιμοποιούνται προηγμένες υπολογιστικές μέθοδοι.

Στις μελέτες οριοθέτησης των υδατορεμάτων η χρήση Ψηφιακών Μοντέλων Εδάφους (Ψ.Μ.Ε., D.E.M.) και G.I.S. μπορούν να διευκολύνουν στον καθορισμό των μορφολογικών χαρακτηριστικών και των κατανεμημένων τιμών των παραμέτρων για την εκτίμηση των παροχών σχεδιασμού. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν τα λογισμικά ArcGIS v.9.2 της ESRI και RMS (River Modeling System) for AUTOCAD της BOSS. Ο υπολογισμός της πλημμύρας σχεδιασμού έγινε με τη βοήθεια συνθετικών υδρογραφημάτων για βροχές σχε-

διασμού διάρκειας 3, 6, 12 και 24 hrs. Η εφαρμογή πραγματοποιήθηκε στο υδατόρεμα Βαθύλακος στο τμήμα του που βρίσκεται στα διοικητικά όρια του Δήμου Θέρμης και το οποίο ανήκει στη λεκάνη απορροής του ποταμού Ανθεμόντα. Τα λογισμικά ArcGIS v.9.2 της ESRI και RMS for AUTOCAD της BOSS είναι ιδιαίτερα χρήσιμα σε μελέτες οριοθέτησης υδατορεμάτων.

2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η περιοχή μελέτης ανήκει στα διοικητικά όρια

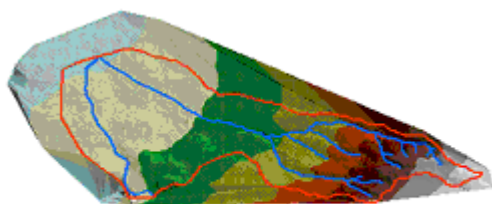


Σχήμα 1. Η περιοχή μελέτης σε τοπογραφικό διάγραμμα κλίμακας 1:5000 της Γ.Υ.Σ.

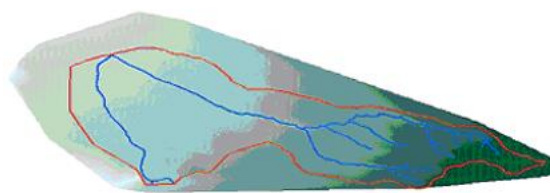
3. ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΑΠΟ ΙΣΟΨΕΙΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ

Στην παρούσα εργασία ως τοπογραφικό υπόβαθρο χρησιμοποιήθηκαν τοπογραφικά διαγράμματα κλίμακας 1:5.000 της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού (Γ.Υ.Σ.). Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε είναι το ArcMap v. 9.2 της ESRI, που μπορεί να δημιουργήσει και να διαχειριστεί Ψηφιακά Μοντέλα Εδάφους μορφής TIN και GRID. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι (Πουρναρά, 2011, Γιαννόπουλος κ.α., 2011): (α) Γεωαναφορά διαγραμμάτων στο προβολικό σύστημα ΕΓΣΑ '87. (β) Ψηφιοποίηση των κύριων και δευτερευουσών ισούψων καμπυλών (ισοδιάσταση 20 m και 4 m, αντιστοίχως) και σχεδίαση των χαρακτηριστικών γραμμών αλλαγής κλίσης (breaklines), που στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι οι κλάδοι του

υδρογραφικού δικτύου. Στις περιοχές με έντονο ανάγλυφο, όπως είναι π.χ. οι χαράδρες έγινε πυκνωση των υψομετρικών σημείων. Για την ψηφιοποίηση ελήφθη υπόψη η διακριτική ικανότητα του ανθρώπινου ματιού ($\pm 0,25 \text{ mm}$) (Παπαδοπούλου, 2010). Κατ' αυτό τον τρόπο δημιουργήθηκε το Ψ.Μ.Ε. μορφής TIN, το οποίο διορθώθηκε στις θέσεις των βυθίσεων (pits) και των οριζόντιων τριγώνων (flat triangles). (γ) Δημιουργία Ψ.Μ.Ε. μορφής TIN. (δ) Δημιουργία Ψ.Μ.Ε. μορφής GRID. Για τις περιοχές, που υπήρξε αδυναμία των Ψ.Μ.Ε. να περιγράψουν τη μορφή του εδάφους, ελήφθησαν επιπλέον στοιχεία με μετρήσεις στο ύπαιθρο. Στα Σχήματα 2 (α) και (β) απεικονίζονται τα Ψ.Μ.Ε. της λεκάνης απορροής σε μορφή TIN και GRID, αντιστοίχως.



(α)



(β)

Σχήμα 2. Ψηφιακά Μοντέλα Εδάφους της λεκάνης απορροής σε μορφή: (α) TIN και (β) GRID, στα οποία απεικονίζονται ο υδροκρίτης και το υδρογραφικό δίκτυο.

4. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΟΧΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Η παροχή σχεδιασμού (παροχή αιχμής) ενός υδραυλικού έργου είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος για τον υδραυλικό μηχανικό και μπορεί να υπολογιστεί, εφόσον υπάρχουν μετρήσεις βροχής-απορροής. Το πρόβλημα καθίσταται δύσκολο, όταν πρόκειται για λεκάνες απορροής χωρίς τέτοιες μετρήσεις, αφού η βαθμονόμηση ενός μοντέλου βροχής-απορροής δεν είναι δυνατή. Για τις

περιπτώσεις αυτές έχουν παρουσιαστεί στη διεθνή βιβλιογραφία διάφορα συνθετικά μοναδιαία υδρογραφήματα (Snyder, SCS, Clark, κ.λπ.), που βασίζονται σε σχέσεις, οι οποίες συσχετίζουν τις παραμέτρους του μοναδιαίου υδρογραφήματος με τα φυσικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής. Οι εμπειρικές αυτές σχέσεις ισχύουν για συγκεκριμένες συνθήκες.

Στην Ελλάδα οι τεχνικές προδιαγραφές εκπόνησης υδρολογικών μελετών (άρθρα 177-194, Π. Δ. 696/1974, ΦΕΚ 301/τ.Α/8.10.1974) αφορούν στα εγγειοβελτιωτικά έργα (άρθρο 177, παρ. 1), αλλά μπορούν να εφαρμοστούν γενικά με εξειδικεύσεις, συμπληρώσεις και περικοπές και σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση υπό προϋποθέσεις (άρθρο 194). Για τις πλημμυρικές παροχές (άρθρο 186) ορίζουν ότι υπολογίζονται με μεθόδους που μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατά περίπτωση και ανταποκρίνονται στη φύση και στη σημασία των έργων που μελετούνται κάθε φορά και συγκεκριμένα, γίνεται αναφορά: (α) σε εμπειρικές μεθόδους, (β) σε στατιστικές μεθόδους, (γ) στην ορθολογική μέθοδο, (δ) στη μέθοδο χάραξης των ισόχρονων καμπυλών και (ε) σε υδρομετεωρολογικές μεθόδους. Σε γενικές γραμμές, τα ανωτέρω δημιουργούν αβεβαιότητες, τόσο ως προς τις μεθόδους που πρέπει να εφαρμοστούν κάθε φορά, όσο και λόγω της έλλειψης, στις περισσότερες περιπτώσεις, υδρομετρικών και βροχομετρικών δεδομένων.

Κατά την άποψη μας τα σύνθετα υδρολογικά συστήματα πρέπει να αναλύονται με τη χρήση υδρογραφημάτων και όχι απλώς με τη χρήση εμπειρικών σχέσεων (ορθολογική μέθοδο, κ.λπ.). Στην παρούσα εργασία προτιμήθηκε ο υπολογισμός των υδρογραφημάτων σχεδιασμού από όμβριες καμπύλες και το συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα της SCS.

4.1. Περίοδος επαναφοράς πλημμύρας και βροχής σχεδιασμού

Με τον όρο βροχή/πλημμύρα σχεδιασμού νοείται συνήθως η βροχή/παροχή εκείνη της οποίας το συνολικό ύψος/παροχή αιχμής έχει μια συγκεκριμένη περίοδο επαναφοράς, T . Αυτό σημαίνει ότι θα παρουσιαστεί ύψος βροχής/παροχής μεγαλύτερο από εκείνο της βροχής/παροχής σχεδιασμού κατά μέσο όρο μια φορά στα T χρόνια της ζωής του έργου. Έτσι, λοιπόν, η πιθανότητα υπέρβασης, p , του ύψους της βροχής σχεδιασμού σε ένα δεδομένο έτος θα είναι $1/T$. Σημειώνεται ότι το μέγεθος της περιόδου επαναφοράς είναι απλά και μόνο ένα στατιστικό μέγεθος. Στη διεθνή και στην ελληνική βιβλιογραφία υπάρχει διχογνωμία ως προς την ταύτιση ή όχι των περιόδων επαναφοράς βροχής και πλημμύρας σχεδιασμού. Συγκεκριμένα, οι Sutcliffe (1978), Παπαμιχαήλ (2001), Γεωργίου κ.α. (2003), κ.λπ. θεωρούν ότι υπάρχει αντιστοιχία ανάμεσα στις δύο περιόδους επαναφοράς, ενώ οι Larson and Reich (1973), Κουτσογιάννης (2004), κ.λπ. θεωρούν ότι η ανωτέρω διαφοροποίηση δεν είναι σωστή και ότι κατά μέσο όρο οι δύο περίοδοι επαναφοράς συμπίπτουν. Στην παρούσα εργασία ακολουθήθηκε η άποψη του Sutcliffe (1978). Η περίοδος επαναφοράς της πλημμύρας σχεδιασμού δεν καθορίζεται από το ν.3010/2002, τις ισχύουσες ελληνικές προδιαγραφές κ.λπ. Υπάρχει, όμως μια τάση στις σχετικές μελέτες για πραγματοποίηση των υπολογισμών για περίοδο επαναφοράς 50 ετών, που αντιστοιχεί (Sutcliffe, 1978) σε περίοδο επαναφοράς 81 ετών της βροχής σχεδιασμού.

4.2. Χρόνος συγκέντρωσης, t_c

Ο χρόνος συγκέντρωσης είναι η πιο κρίσιμη παράμετρος για τον καθορισμό της παροχής σχεδιασμού. Με τον όρο χρόνος συγκέντρωσης θεωρείται ο χρόνος που χρειάζεται το νερό για να κινηθεί από το υδραυλικά πιο απομακρυσμένο σημείο μιας λεκάνης μέχρι το στόμιο αυτής (Westphal, 2001). Στον ορισμό αυτό το πιο απομακρυσμένο σημείο σχετίζεται με το χρόνο ροής και όχι με την απόσταση. Σύμφωνα με τους Pilgrim and Cordery (1993), πιθανώς ένας καλύτερος ορισμός είναι ότι χρόνος συγκέντρωσης είναι ο χρόνος μετά την έναρξη της περίσσειας βροχής μέχρις ότου όλα τα τμήματα της λεκάνης απορροής συμβάλλουν ταυτόχρονα στη ροή στο στόμιο αυτής. Αν και οι ορισμοί αυτοί είναι ελκυστικοί και απλοί, στην πραγματικότητα αποτελούν εξιδανικευμένες έννοιες, αφού δεν υπάρχει ένας πρακτικός τρόπος μέτρησης του χρόνου συγκέντρωσης.

Για την εκτίμηση του χρόνου συγκέντρωσης έχει παρουσιαστεί στη διεθνή βιβλιογραφία ένας σημαντικός αριθμός εμπειρικών σχέσεων, που έχουν προκύψει για συγκεκριμένες λεκάνες απορροής και υδρολογικές συνθήκες. Μια συγκέντρωση τέτοιων σχέσεων δίνεται από τους Chow et al. (1988). Στην Ελλάδα οι πιο δημοφιλείς σχέσεις για τον προσδιορισμό του χρόνου συγκέντρωσης είναι οι τύποι του Kirpich και του Giandotti, οι οποίοι προβλέπονται και από τις ισχύουσες προδιαγραφές (Π.Δ. 696/1974). Από τους τύπους αυτούς, ο πρώτος πρέπει να εφαρμόζεται μόνο σε απλές λεκάνες ή σε λεκάνες που εμφανίζουν μόνο μία κύρια μισγάνγεια και δεν αποτελούνται από περισσότερες της μίας σημαντικές υπολεκάνες (άρθρο 187 §3), ενώ ο δεύτερος μπορεί να εφαρμοστεί σε πεδινές περιοχές έκτασης μέχρι το πολύ 13km² μέχρι την εξεταζόμενη διατομή του υδατορεύματος, για απλές λεκάνες και φυσική κοίτη ακανόνιστης διατομής (άρθρο 187 §4). Ο τύπος Giandotti δίνει υψηλότερες τιμές για το χρόνο συγκέντρωσης σε σχέση με τον τύπο Kirpich, αλλά χρησιμοποιείται εκτενώς στην Ελλάδα. Στην παρούσα εργασία για τον υπολογισμό του χρόνου συγκέντρωσης, t_c , χρησιμοποιήθηκε ο τύπος του Giandotti:

$$t_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{0.8\sqrt{\Delta H}} \quad (1)$$

όπου A = το εμβαδόν της λεκάνης απορροής (km²), L = το μήκος της κύριας κοίτης [km] και ΔH = υψομετρική διαφορά του μέσου υψόμετρου της λεκάνης από το υψόμετρο του στομίου εξόδου αυτής [m].

4.3. Διάρκεια βροχής σχεδιασμού

Η επιλογή της διάρκειας βροχής σχεδιασμού είναι ιδιαίτερα σημαντική και, σε γενικές γραμμές, πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση με το χρόνο απορροής της λεκάνης, ώστε να μπορεί να υπολογιστεί η πλημμυρική παροχή. Οι Levy and McCuen (1999) απέδειξαν ότι βροχή 24 hrs είναι ικανοποιητικής διάρκειας για λεκάνες απορροής στο Maryland των Η.Π.Α. επιφάνειας από 5-130 km². Για

τον ελληνικό χώρο οι Γιακουμάκης και Γεωργιάδου (2005) μελέτησαν τα πλημμυρικά μεγέθη λεκανών απορροής της Ν. Άνδρου χρησιμοποιώντας βροχή σχεδιασμού διάρκειας 12 hrs. Ο Κουτσογιάννης (2004) για τη μελέτη του ρέματος της Φιλοθέης χρησιμοποίησε διάρκεια βροχής 9 hrs, οι Γεωργίου κ. ά. (2003) για τη μελέτη των αιχμών απορροής σε 4 λεκάνες της Χαλκιδικής θεώρησαν διάρκειες βροχής 3.00 hrs, 3.50 hrs, 4.50 hrs και 5.00 hrs.

Για την επιλογή της βροχής σχεδιασμού πρέπει να ελέγχονται διάφορες διάρκειες και να επιλέγεται αυτή που οδηγεί στην δυσμενέστερη περίπτωση. Σύμφωνα με τον Τσακίρη (1995) για τον ελληνικό χώρο αντί για διάρκεια βροχής 24 hrs μπορεί ο έλεγχος να γίνεται για βροχή 12 hrs, γιατί συνήθως οι λεκάνες είναι μικρές και το ανάγλυφο αρκετά έντονο. Το ΥΠΕΧΩΔΕ (2002) θεωρεί ότι βροχοπτώσεις διάρκειας 24 hrs είναι μια λογική επιλογή για λεκάνες απορροής των οποίων η διάρκεια βροχής είναι μεγαλύτερες από το χρόνο συγκέντρωσης. Σημειώνεται, ότι κατά τη μέθοδο της κατάρτισης της βροχής σχεδιασμού, η διάρκεια της βροχής θα πρέπει να λαμβάνεται σημαντικό πολλαπλάσιο (αρκετά μεγαλύτερο του διπλασίου) του χρόνου υστέρησης της λεκάνης.

4.4. Το υετογράφημα σχεδιασμού

Η χρονική κατανομή της βροχής σχεδιασμού είναι σημαντική για το παραγόμενο υδρογράφημα πλημμύρας. Πράγματι, δυο βροχοπτώσεις με ίδιο ύψος βροχής αλλά με διαφορετική κατανομή στην ίδια διάρκεια δίνουν διαφορετικά υδρογραφήματα πλημμύρας. Η χρονική κατανομή της βροχής σχεδιασμού μπορεί να γίνει με δυο μεθόδους δηλαδή με: (α) τις καταιγίδες σχεδιασμού (καμπύλες Huff, συνθετικά υετογραφήματα της SCS, κ.λπ.) (Chow et al., 1988) και (β) τις όμβριες καμπύλες. Τα υετογραφήματα σχεδιασμού που προκύπτουν από τις όμβριες καμπύλες υπερτερούν σε σχέση με τις τυποποιημένες βροχές σχεδιασμού, γιατί βασίζονται αποκλειστικά σε δεδομένα της περιοχής μελέτης και όχι σε δεδομένα άλλων περιοχών με διαφορετικό υδρολογικό καθεστώς.

Μεταξύ των διαφόρων μεθόδων κατανομής της βροχής σχεδιασμού οι πιο δημοφιλείς είναι η μέθοδος των εναλλασσόμενων υψών (alternating block method) (Chow et al., 1988) και της δυσμενέστερης διάταξης του υετογραφήματος σχεδιασμού (worst profile distribution) (USDI, 1977). Η μέθοδος των εναλλασσόμενων υψών βροχής τοποθετεί την αιχμή του υετογραφήματος στο κέντρο της βροχόπτωσης, ενώ η μέθοδος της δυσμενέστερης διάταξης συνδυάζει μαθηματικά την κατανομή της βροχής με το μοναδιαίο υδρογράφημα, ώστε να παράγει μέγιστη αιχμή του πλημμυρογραφήματος. Σύμφωνα με τον Westphal (2001) στη μέθοδο των εναλλασσόμενων υψών η

επιλογή του χρονικού βήματος Δt πρέπει να γίνεται με βάση τη σχέση:

$$\frac{t_c}{5} \leq \Delta t \leq \frac{t_c}{3} \quad (2)$$

όπου t_c είναι ο χρόνος συγκέντρωσης.

4.5. Μοναδιαίο Υδρογράφημα

Όταν είναι απαραίτητο το Μοναδιαίο Υδρογράφημα (Μ.Υ.) σε μια λεκάνη απορροής χωρίς υδρομετρήσεις, τότε για τον υπολογισμό του χρησιμοποιείται μια από τις μεθόδους των Συνθετικών Μοναδιαίων Υδρογραφημάτων (Σ.Μ.Υ.), όπως π.χ. είναι του Nash, Dooge, Snyder, Clark, SCS, κ.λπ. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το αδιάστατο Μοναδιαίο Υδρογράφημα της Soil Conservation Service (SCS), το οποίο είναι ένα από τα συνηθέστερα εφαρμοζόμενα για τον υπολογισμό Συνθετικών Μοναδιαίων Υδρογραφημάτων (Σ.Μ.Υ.), που εφαρμόζεται γενικά σε μικρές λεκάνες απορροής εκτάσεως μέχρι 50 km² (20mi²) (SCS, 1972). Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, η παροχή αιχμής, Q_p [m³/s/cm] ενός μοναδιαίου υδρογραφήματος για διάρκεια βροχής t_r (hr) δίνεται από τη σχέση $Q_p = 2.08 A/t_p$, όπου A = το εμβαδό της λεκάνης απορροής [km²], t_c = ο χρόνος συγκέντρωσης [hr] και t_p = ο χρόνος αιχμής [hr], που υπολογίζεται με τη σχέση $t_p = 0.6 t_c + 0.5 t_r$. Οι τεταγμένες του Μοναδιαίου Υδρογραφήματος υπολογίζονται με τις σχέσεις $Q = Q_d Q_p$ και $t = t_d t_p$ όπου Q = παροχή του Μ.Υ. [m³/s], Q_p = παροχή αιχμής [m³/s], t = χρόνος του μοναδιαίου υδρογραφήματος, t_p = χρόνος αιχμής, Q_d και t_d = αδιάστατη παροχή και αδιάστατος χρόνος που λαμβάνονται από πίνακα (Brass, 1990).

4.6. Εφαρμογή

Ο υπολογισμός της παροχής σχεδιασμού έγινε με βάση τα υδρογραφήματα πλημμύρας σχεδιασμού. Συγκεκριμένα, για βροχές σχεδιασμού διάρκειας 3, 6, 12 και 24 hrs υπολογίστηκαν τα ύψη βροχής με βάση την εξίσωση:

$$i = \frac{16.510168 T^{0.1919}}{(t + 0.07461)^{0.7621}}, \quad R^2 = 0.9979$$

όπου i = ένταση βροχής [mm/hr], T = περίοδος επαναφοράς [yr], t = διάρκεια της βροχής [hr] και R^2 = συντελεστής προσδιορισμού.

Ο υπολογισμός του πλημμυρογραφήματος σχεδιασμού στο στόμιο της λεκάνης απορροής έγινε για δύο περιπτώσεις δηλαδή για: (α) το σύνολο της λεκάνης απορροής (Περίπτωση Ι) και (β) καθεμία υπολεκάνη (Σχήμα 3) ξεχωριστά και στη συνέχεια, υπολογισμό του πλημμυρογραφήματος απορροής με βάση τα πλημμυρογραφήματα απορροής που προέκυψαν για τις Υπολεκάνες 1 και 2 και την εφαρμογή της αρχής της επαλληλίας (Περίπτωση ΙΙ).



Σχήμα 3. Υπολεκάνες απορροής της περιοχής μελέτης

Και στις δύο περιπτώσεις, έγινε η κατανομή της βροχής σχεδιασμού με τη μέθοδο των εναλλασσομένων υψών βροχής, για τις διάρκειες βροχής που εξετάστηκαν και υπολογίστηκε η καθαρή (περίσσεια) βροχής με βάση τη μέθοδο του συντελεστή απορροής CN της S.C.S. (Chow et al., 1988). Ο υπολογισμός του CN έγινε με βάση τις χρήσεις γης της περιοχής μελέτης και τη χρήση του λογισμικού ArcGIS της ESRI, στο οποίο έγινε η εισαγωγή του shapefile corine land cover (<http://geodata.gov.gr/geodata/>) και συγκεκριμένα, του Φύλλου Χάρτη «Θεσσαλονίκη». Η περίοδος επαναφοράς της πλημμύρας σχεδιασμού ελήφθη ίση με 50 έτη, που αντιστοιχεί σε περίοδο επαναφοράς της βροχής σχεδιασμού 81 έτη (Sutcliffe, 1978). Ο χρόνος συγκέντρωσης, t_c , σύμφωνα με την εξίσωση (1) είναι για ολόκληρη τη λεκάνη απορροής 2.326 hrs, ενώ για τις υπολεκάνες 1 και 2 είναι 1.979 και 2.151 hrs αντιστοίχως. Ο συντελεστής απορροής CN εκτιμήθηκε σε 67, 66 και 68 για ολόκληρη τη λεκάνη και τις υπολεκάνες 1 και 2 αντιστοίχως. Το χρονικό βήμα Δt για όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν ελήφθη ίσο με 0.50 hr, σύμφωνα με την εξίσωση (2).

Σύμφωνα με την ανάλυση που έγινε, η παροχή σχεδιασμού ελήφθη ίση με 4.50 m³/s, που αντιστοιχεί σε διάρκεια βροχής 24 hrs και προέκυψε από την περίπτωση II. Οι υδραυλικοί υπολογισμοί έγιναν με τη βοήθεια του λογισμικού RMS for Autocad της BOSS.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η οριοθέτηση ενός υδατορέματος αποτελεί ένα σύνθετο πρόβλημα, που συνίσταται στον καθορισμό και στην επικύρωση των πολυγωνικών γραμμών εκατέρωθεν της βαθιάς γραμμής του υδατορέματος, οι οποίες περιβάλλουν τις γραμμές πλημμύρας, τις όχθες, καθώς και τα τυχόν φυσικά ή τεχνητά στοιχεία, που αποτελούν αναπόσπαστο μέρος του υδατορέματος. Κατ' αυτή την έννοια, λοιπόν, η οριοθέτηση ενός υδατορέματος είναι καθοριστικής σημασίας για την αντιπλημμυρική προστασία μιας περιοχής, εφόσον προστατεύει την περιοχή του υδατορέματος από εξωτερικές επεμβάσεις και γι' αυτό με την οριοθέτηση θα πρέπει να προστατεύεται θεσμικά η καθορισμένη ζώνη και να λαμβάνεται υπόψη στις πολεοδομικές και χωροταξικές μελέτες.

Στην παρούσα περίπτωση διαπιστώθηκε ανεπάρκεια παροχευτικότητας του υδατορέματος που εξετάστηκε σε ορισμένες διατομές αυτού, γι αυτό προτάθηκαν βελτιώσεις και διευθετήσεις σε συγκεκριμένες θέσεις αυτού. Οι προτάσεις που έγιναν είναι φιλικές επεμβάσεις προς το περιβάλλον, που έχουν στόχο την απρόσκοπτη ροή των υδάτων, τη διατήρηση της φυσικής κοίτης, την προστασία του

φυσικού περιβάλλοντος και του μικροκλίματος της περιοχής (Πουρναρά, 2011).

Διαπιστώθηκε ότι απαιτείται αναθεώρηση του ν. 3010/2002, ώστε να λαμβάνονται υπόψη στη μελέτη οριοθέτησης τα μέτρα, οι όροι, οι περιορισμοί και οι δεσμεύσεις που τυχόν προβλέπονται: (α) στο σχέδιο διαχείρισης της λεκάνης απορροής ποταμού, στην οποία υπάγεται το προς οριοθέτηση υδατόρεμα και (β) στο σχέδιο διαχείρισης των κινδύνων πλημμύρας της λεκάνης απορροής της περιοχής ενδιαφέροντος και στους χάρτες κινδύνου και επικινδυνότητας πλημμύρας (άρθρα 5 και 6, Κ.Υ.Α 31822/1542/2010), σε συνδυασμό με τις γενικότερες αρχές περιβαλλοντικού σχεδιασμού. Επίσης, απαιτείται αναθεώρηση των τεχνικών προδιαγραφών εκπόνησης υδρολογικών μελετών (άρθρα 177-194, Π. Δ. 696/1974 Π. Δ.), οι οποίες αφορούν σε εγγειοβελτιωτικά έργα (άρθρο 177, παρ. 1), γεγονός που, κατά κάποιον τρόπο, συνεπάγεται ένα βαθμό αβεβαιότητας στους σχετικούς υπολογισμούς, τόσο ως προς τις μεθόδους που πρέπει να εφαρμοστούν κάθε φορά, όσο και λόγω της έλλειψης υδρομετρικών και βροχομετρικών δεδομένων. Τέλος, διαπιστώθηκε, ότι τα λογισμικά ArcGIS v.9.2 της ESRI και RMS for AUTOCAD της BOSS είναι ιδιαίτερα χρήσιμα σε μελέτες οριοθέτησης υδατορεμάτων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Γεωργίου, Π. Ε., Παπαμιχαήλ, Δ. Μ., Καραμούζης, Δ. Ν., 2003. Συγκριτική ανάλυση των εκτιμήσεων των αιχμών απορροής με συνθετικά μοναδιαία υδρογραφήματα και με εμπειρικές σχέσεις. Πρακτικά 3ου Πανελληνίου Συνεδρίου Γεωργικής Μηχανικής, σελ. 11-19, 29-31 Μαΐου 2003, Θεσσαλονίκη.
- Γιακουμάκης, Σ., Γεωργιάδου, Κ., 2005. Πλημμυρικά μεγέθη σε λεκάνες απορροής της Ν. Ανδρου με σημαντικούς οικισμούς. Πρακτικά 5ου Συνεδρίου Ε.Ε.Δ.Υ.Π., σελ. 147-152, 6-9 Απριλίου 2005, Ξάνθη.
- Γιαννόπουλος, Σ., Χρηστίδης, Χ., Λουκάς, Α., 2011. Διερεύνηση της Ακρίβειας των Ψηφιακών Μοντέλων Εδάφους (DEM) – Συγκριτική Αξιολόγηση Μεθόδων. Πρακτικά 7^{ου} Εθνικού Συνεδρίου Ε.Γ.Μ.Ε., 24-27 Νοεμβρίου, Αθήνα.
- Κουτσογιάννης, Δ., 2004. Ερευνητικό Έργο: «Διερεύνηση και αντιμετώπιση προβλημάτων ευστάθειας των πρηνών και του πυθμένα του ρέματος της Φιλοθέης με τη χρήση μαθηματικών μοντέλων και σύγχρονων περιβαλλοντικών τεχνικών» (Επιστ. Υπεύθ. Α. Στάμου). Τεύχος «Υδρολογική Μελέτη Πλημμυρών». Ε.Μ.Π., Αθήνα.

- Παπαδοπούλου, Μ., 2010. Εισαγωγή στη Χαρτογραφία. Πανεπιστημιακές Παραδόσεις, Τμήμα Εκδόσεων Α.Π.Θ.
- Παπαμιχαήλ, Δ., 2001. Τεχνική Υδρολογία Επιφανειακών Υδάτων. Εκδόσεις Γιαχούδη-Γιαπούλη. Θεσσαλονίκη.
- Πουρναρά, Ε., 2011. Οριοθέτηση Υδατορέματος Μικρής Λεκάνης Απορροής χωρίς Υδρομετρήσεις με τη χρήση Σύγχρονων Μεθόδων. Μεταπτυχιακή Διατριβή. Τ.Α.Τ.Μ./Α.Π.Θ., Π.Μ.Σ. «Γεωπληροφορική», Ειδίκευση «Υδατικοί Πόροι».
- Τσακίρης Γ., 1995. Πλημμυρικές Απορροές. Υδατικοί Πόροι: Ι. Τεχνική Υδρολογία (Υπεύθυνος Έκδοσης: Γ. Τσακίρης). Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα, 393-423.
- ΥΠΕΧΩΔΕ, 2002. Οδηγίες Μελετών Οδικών Έργων (ΟΜΟΕ). Τεύχος 8: Αποχέτευση-Στράγγιση. Υδραυλικά Έργα Οδών (ΟΜΟΕ-ΑΣΥΕΟ). Αθήνα.
- Brass, R.L., 1990. Hydrology: An Introduction to Hydrologic Science. Addison-Wesley Pub. Co.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., Mays, L. W., 1988. Applied Hydrology. McGraw-Hill.
- Larson, C. L., Reich, B. M., 1973. Relationship of observed rainfall and runoff recurrence intervals. Proceedings of 2nd International Symposium in Hydrology, September 11-13, 1972, Fort Collins, Colorado, U.S.A.
- Levy, B., McCuen, R., 1999. Assessment of storm duration for hydrologic design. J. of Hydrol. Engin., 4(3): 209-213.
- Pilgrim, D.H., Cordery, I., 1993. Flood Runoff. In: Maidment, D.R. (editor in Chief) Handbook of Hydrology. McGraw-Hill, Inc., pp. 9.1-9.42.
- SCS (Soil Conservation Service), 1972. National Engineering Handbook, Section 4, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C.
- Sutcliffe, J. V., 1978. Methods of Flood Estimation. A Guide to the Flood Studies. Report. No. 49. Institute of Hydrology. Wallingford. Oxon. U.K.
- USDI, 1977. Design of Arch Dams. Design Manual for Concrete Arc Dams. A Water Resources Technical Publication. U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Denver, CO
- Wetsphal, D. A., 2001. Hydrology for Drainage System Design and Analysis. In: L. W. Mays (Editor) Stormwater Collection Systems Design Handbook. McGraw-Hill, pp. 4.1-4.44.

ΔΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΚΑΙ ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ

Ιωάννης Γράβαλος¹, Θεόδωρος Γιαλαμάς¹, Σπύρος Λουτρίδης², Δημήτριος Κατέρης¹, Ζήσης Τσιρόπουλος¹,
Ευάγγελος Μπόμπολας¹, Παναγιώτης Ξυραδάκης¹, Αυγουστίνος Αυγουστή¹, Αναστάσιος Γεωργιάδης¹

¹Τμήμα Μηχανικής Βιοσυστημάτων, Σχολή Τεχνολογίας Γεωπονίας,
Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Λάρισας, Λάρισα, Τ.Κ. 41110

²Τμήμα Ηλεκτρολογίας, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών,
Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Λάρισας, Λάρισα, Τ.Κ. 41110

Στην εργασία αυτή, παρουσιάζεται ένα πρωτότυπο σύστημα μέτρησης της εδαφικής υγρασίας, που επιτρέπει τη σύνθεση διδιάστατων (2D) και τριδιάστατων (3D) εδαφικών τομών μεγάλης ακρίβειας. Πρόκειται για μία κινούμενη πλατφόρμα, η οποία αποτελείται από δύο τροχοφόρες βάσεις και έναν αισθητήρα εδαφικής υγρασίας. Οι τροχοφόρες βάσεις και ο αισθητήρας συνδέονται μεταξύ τους μέσω αρθρώσεων. Η κινούμενη πλατφόρμα φέρει τον αισθητήρα εδαφικής υγρασίας, Diviner 2000 της εταιρείας Sentek Pty Ltd., ο οποίος τροποποιήθηκε κατάλληλα για να γίνει η ζεύξη. Η πλατφόρμα κινούμενη εντός ενός δικτύου υπόγειων αγωγών καταγράφει σε πραγματικό χρόνο τις μεταβολές της εδαφικής υγρασίας κατά μήκος, κατά πλάτος και σε διαφορετικά βάθη. Τα δεδομένα αυτά, με την κατάλληλη ανάλυση και επεξεργασία παρέχουν διδιάστατους και τριδιάστατους χάρτες με την χωρική και χρονική κατανομή της εδαφικής υγρασίας. Η αξιολόγηση της νέας αυτής μεθόδου καθώς και η ικανότητα της πλατφόρμας να κινείται και να συλλέγει δεδομένα εντός δικτύου υπόγειων αγωγών, πραγματοποιήθηκε σε συνθήκες εργαστηρίου.

Λέξεις κλειδιά: εδαφική υγρασία, διδιάστατη και τριδιάστατη απεικόνιση, αισθητήρας, γεωργία ακριβείας

TWO-DIMENSIONAL AND THREE-DIMENSIONAL SOIL WATER IMAGING

Ioannis Gravalos¹, Theodoros Gialamas¹, Spyros Loutridis², Dimitrios Kateris¹, Zisis Tsiropoulos¹,
Evangelos Bompolas¹, Panagiotis Xyradakis¹, Augoustinos Augousti¹, Anastasios Georgiadis¹

¹Department of Biosystems Engineering, School of Agricultural Technology,
Technological Educational Institute of Larissa, GR-41110, Larissa, Greece

²Department of Electrical Engineering, School of Technological Applications,
Technological Educational Institute of Larissa, GR-41110, Larissa, Greece
gravalos@teilar.gr

In this study, a prototype soil water measurement system is presented, that allows the creation of two-dimensional (2D) and three dimensional (3D) images with high accuracy. It is a mobile platform, which comprises of two wheeled bases and a soil water sensor. The wheeled bases and the sensor are linked via universal joints. The mobile platform bears the modified commercial soil water sensor Diviner 2000 (Sentek Pty Ltd.). The mobile platform travels through a subsurface piping network and records soil water content variations in length, width and at different depths in real-time. These data, after the proper processing and analysis can provide two-dimensional and three-dimensional maps of the spatial and temporal distribution of soil water content. Experiments were carried out in laboratory conditions.

Key words: soil water, two-dimensional and tree-dimensional imaging, sensor, precision agriculture

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μέτρηση της εδαφικής υγρασίας και η παρακολούθηση της κατανομής της στο χώρο και στο χρόνο, αποτελούν βασική μέθοδο στην πρακτική των αρδεύσεων, διασφαλίζοντας τη διατήρηση της υγρασίας του εδάφους σε ένα εύρος τιμών και αναπληρώνοντας την κατανάλωση του νερού από τα φυτά, με άρδευση. Για τη μέτρηση της εδαφικής υγρασίας χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι, που διακρίνονται σε άμεσες και έμμεσες. Η κυριότερη μέθοδος άμεσου προσδιορισμού της εδαφικής υγρασίας είναι η θερμοβαρυμετρική.

Οι έμμεσες μέθοδοι προσδιορισμού της εδαφικής υγρασίας βασίζονται στη μέτρηση διαφορετικών ιδιοτήτων του εδάφους, οι οποίες συναρτώνται με την εδαφική υγρασία. Σ' αυτές περιλαμβάνονται: η μέθοδος νετρονίων και οι διηλεκτρικές μέθοδοι (Muñoz-Carpena, 2004; Hanumantha Rao and Singh, 2011).

Με την κατηγορία των μεθόδων, που βασίζονται σε διηλεκτρικές τεχνικές, εκτιμάται η περιεχόμενη εδαφική υγρασία, μετρώντας τη διηλεκτρική σταθερά του εδάφους. Οι μέθοδοι αυτές έτυχαν γρήγορα ευρείας αποδοχής επειδή παρουσιάζουν καλό χρόνο απόκρισης, δεν απαιτούν συντήρηση και δίνουν συνεχείς αναγνώσεις. Μεταξύ αυτών περιλαμβάνονται: η μέθοδος ανακρομέτρησης χρόνου (TDR), η μέθοδος ανακρομέτρησης συχνότητας (FDR), η μέθοδος μέτρησης μετατόπισης φάσης (PT) κ.ά. (Evelt et al., 2006; Gravalos et al., 2007).

Το σημαντικό μειονέκτημα των προαναφερθέντων μεθόδων και οργάνων μέτρησης της εδαφικής υγρασίας είναι ο πολύ μικρός όγκος (κλίμακα μερικών εκατοστών) της περιοχής παρατήρησης, δηλαδή πρόκειται για σημειακές μεθόδους παρακολούθησης της εδαφικής υγρασίας (Γράβαλος κ.ά., 2006). Με τις μεθόδους αυτές, η

διαδικασία χαρτογράφησης της περιεχόμενης εδαφικής υγρασίας μεγαλύτερων περιοχών είναι δύσκολη και ιδιαίτερος χρονοβόρα. Επομένως, είναι απαραίτητο να αναπτυχθούν νέες τεχνικές που να προσδιορίζουν επιτυχώς την εδαφική υγρασία σε μεγάλη κλίμακα (δεκαμετρική ή εκατομετρική). Μια τέτοια τεχνική συνδέεται με τη χρήση δικτύων αισθητήρων εδαφικής υγρασίας για υψηλή χωρική κάλυψη. Σημαντικό μειονέκτημα ενός δικτύου αισθητήρων είναι η πολυπλοκότητα και το υψηλό κόστος εγκατάστασης και συντήρησης (Cardell-Oliver et al., 2005).

Τα τελευταία χρόνια, για τη χαρτογράφηση και απεικόνιση της εδαφικής υγρασίας χρησιμοποιήθηκαν διάφορες γεωφυσικές μέθοδοι, όπως είναι: τα ραντάρ υπεδάφους (ground penetrating radar, GPR), της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής (electromagnetic induction, EMI) και της γεωηλεκτρικής τομογραφίας (electrical resistivity tomography, ERT). Οι δύο πρώτες μέθοδοι είναι μη επεμβατικές, που όμως έχουν υψηλό κόστος και επιπλέον οι χάρτες που προκύπτουν απεικονίζουν την χωρική κατανομή της εδαφικής υγρασίας τη δεδομένη χρονική στιγμή που πραγματοποιήθηκαν (Grote et al., 2003; Abdu et al., 2007). Από τις γεωφυσικές μεθόδους που χρησιμοποιείται ευρύτερα είναι η ERT, η οποία είναι επίσης γνωστή και ως "μέθοδος συνεχούς ρεύματος" (Loke and Barker, 1996; Schwartz et al., 2008; Besson et al., 2010). Τέλος, η τεχνολογία της τηλεπισκόπησης έχει τη δυνατότητα να παρέχει χωροχρονικά δεδομένα για τις μεταβολές της εδαφικής υγρασίας. Υπάρχουν δύο μέθοδοι τηλεπισκόπησης που εφαρμόζονταν για το σκοπό αυτό, η παθητική ραδιομετρική τηλεπισκόπηση και η ενεργή τηλεπισκόπηση. Όμως, οι τιμές των μοντέλων προσομοίωσης, που χρησιμοποιούνται, μπορεί να μην είναι αντιπροσωπευτικές σε μεγάλες περιφερειακές κλίμακες (Moran, et al., 2004).

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η ανάπτυξη ενός συστήματος (πλατφόρμας και αισθητήρα), το οποίο κινούμενο εντός ενός δικτύου υπόγειων αγωγών να καταγράφει σε πραγματικό χρόνο τις μεταβολές της εδαφικής υγρασίας κατά μήκος, κατά πλάτος και σε διαφορετικά βάθη της καλλιεργούμενης έκτασης. Τα δεδομένα αυτά, με την κατάλληλη ανάλυση και επεξεργασία παρέχουν διδιάστατους και τριδιάστατους χάρτες με την χωρική και χρονική κατανομή της εδαφικής υγρασίας (διδιάστατη & τριδιάστατη τομογραφία εδαφικής υγρασίας).

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1. Το σχέδιο της κινούμενης πλατφόρμας

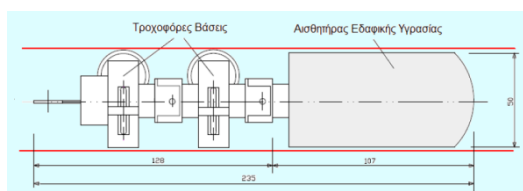
Η ανάπτυξη της κινούμενης πλατφόρμας περιλάμβανε τρία διαφορετικά στάδια: α) τη σχεδίαση των τροχοφόρων βάσεων, β) τη σχεδίαση των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, που επιτρέπουν την οδήγηση της πλατφόρμας με εντολές, που δίνονται από έναν επίγειο σταθμό και γ) τη σχεδίαση του λογισμικού, που επιτρέπει τη γραφική διασύνδεση

μεταξύ χρήστη και κινούμενης πλατφόρμας (Gravalos et al., 2010).

Το μήκος της κινούμενης πλατφόρμας είναι 235 mm και η εξωτερική διάμετρος μπορεί να μεταβάλλεται από 48 mm μέχρι 54 mm (Εικόνα 1). Η κινούμενη πλατφόρμα αποτελείται από δύο τροχοφόρες βάσεις και έναν αισθητήρα εδαφικής υγρασίας. Οι τροχοφόρες βάσεις και ο αισθητήρας συνδέονται μεταξύ τους μέσω αρθρώσεων Hooke. Προκειμένου οι αρθρώσεις να λειτουργούν σωστά, πρέπει να εμφανίζουν ισοδύναμες γωνίες εισόδου και εξόδου. Επίσης, τα δίκρανα των αρθρώσεων πρέπει να συναρμολογηθούν με τρόπο που να βρίσκονται πάντα στο ίδιο επίπεδο. Το σώμα των τροχοφόρων βάσεων είναι κυκλικό, ώστε η πλατφόρμα να κινείται με ευελιξία εντός των αγωγών. Οι κινητήριες τροχοί στηρίζονται με τη βοήθεια ελατηριωτής ανάρτησης. Αυτό το σύστημα ανάρτησης επιτρέπει την κίνηση των τροχών μόνο ως προς την κάθετη διεύθυνση. Η εκτροπή της ελατηριωτής ανάρτησης επιτρέπει τη δημιουργία πτυσσόμενων χαρακτηριστικών στους κινητήριους τροχούς, ώστε να βρίσκονται σε διαρκή επαφή με τα τοιχώματα του αγωγού. Στα ευθύγραμμα τμήματα των αγωγών, η κινούμενη πλατφόρμα καθοδηγείται από τα τοιχώματα των αγωγών. Η οδήγηση στις διακλαδώσεις γίνεται με τη διαφορική δράση των αποσβεστήρων και της ταχύτητας περιστροφής των κινητήριων τροχών. Δύο ηλεκτρικοί κινητήρες, που είναι τοποθετημένοι επί των κινητήριων τροχών, θέτουν σε κίνηση την πλατφόρμα. Οι τροχοί φέρουν ελαστικούς δακτυλίους με υψηλό συντελεστή τριβής, με αποτέλεσμα η προσκόλληση μεταξύ των κινητήριων τροχών της πλατφόρμας και τοιχωμάτων των αγωγών να βελτιώνεται σημαντικά. Με τον τρόπο αυτό, η κινούμενη πλατφόρμα είναι σε θέση να συγκρατείται σταθερά και να κινείται ομαλά πάνω στη εσωτερική επιφάνεια των αγωγών. Επίσης, η κατανομή του φορτίου στους τροχούς είναι πιο ομοιόμορφη. Για την επανάκτηση της πλατφόρμας από το δίκτυο των αγωγών, προβλέπεται ένας μηχανισμός περιελίξεως καλωδίου εγκαταστημένος επί της εισόδου των αγωγών προκειμένου να έλκουμε την πλατφόρμα προς τα έξω σε ασυνήθιστες καταστάσεις. Η κίνηση της πλατφόρμας, σε διακλαδώσεις ορθής γωνίας είναι δύσκολο να πραγματοποιηθεί, με την υπάρχουσα σχέση του μήκους ως προς το πλάτος. Επομένως, η καμπυλότητα στο τέλος των αγωγών είναι μία πολύ σημαντική τεχνική παράμετρος, που πρέπει να λάβουμε υπόψη μας κατά την σχεδίαση του δικτύου των υπόγειων αγωγών, ώστε τα επιμέρους στοιχεία που συνθέτουν την κινούμενη πλατφόρμα (τροχοφόρες βάσεις και αισθητήρας εδαφικής υγρασίας) να μπορούν να περάσουν τις διακλαδώσεις με επιτυχία. Η μαθηματική ανάλυση της κινηματικής των κινητήριων τροχών και της ακτίνας περιστροφής της κινούμενης πλατφόρμας περιγράφονται διεξοδικά στην εργασία Gravalos et al. (2012).

Η κινούμενη πλατφόρμα φέρει τον αισθητήρα εδαφικής υγρασίας, Diviner 2000 της εταιρείας

Sentek Pty Ltd. (2007), ο οποίος τροποποιήθηκε κατάλληλα για να γίνει η ζεύξη. Τα κριτήρια επιλογής του συγκεκριμένου αισθητήρα εδαφικής υγρασίας ήταν η ικανοποιητική ακρίβεια και επαναληψιμότητα των μετρήσεων, το σχήμα και οι μικρές διαστάσεις που του επιτρέπουν να κινείται εύκολα εντός των πλαστικών αγωγών. Σύμφωνα με την εταιρεία κατασκευής, ο αισθητήρας μπορεί να ανιχνεύσει την εδαφική υγρασία έξω από τον πλαστικό σωλήνα πρόσβασης, σε μήκος 100 mm και ακτίνα 50-100 mm. Ωστόσο, υπάρχουν νεώτερες μελέτες, που δείχνουν ότι η χωρική ευαισθησία του συγκεκριμένου αισθητήρα περιορίζεται σε ακτίνα 40 mm γύρω από το σωλήνα πρόσβασης (Muñoz-Carpena, 2004). Για τη βαθμονόμηση του αισθητήρα χρησιμοποιήθηκαν οι σχέσεις: $SF = (F_a - F_s) / (F_a - F_w)$ και $\theta_v = aSF^b$ όπου, SF η ανηγμένη συχνότητα, Fs, Fw και Fa είναι οι τιμές της συχνότητας στο έδαφος, σε μη αλατούχο νερό και στον αέρα αντιστοίχως.



Εικόνα 1. Το σχέδιο της κινούμενης πλατφόρμας και του αισθητήρα εδαφικής υγρασίας (Gravalos et al., 2012).

Προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι διαστάσεις της κινούμενης πλατφόρμας, τα ηλεκτρονικά κυκλώματα τοποθετήθηκαν στον επίγειο σταθμό. Τα ηλεκτρονικά κυκλώματα περιέχουν τους απαραίτητους οδηγούς των ηλεκτρικών κινητήρων. Πρόκειται για τα ολοκληρωμένα κυκλώματα L297 και L298 (SGS-Thomson). Η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα ρυθμίζεται από ένα απλό ποτενσιόμετρο. Η κατεύθυνση κίνησης ελέγχεται από ένα μονοπολικό διακόπτη δύο δρόμων (SPDT). Μία σειρά οπτικών ενδείξεων παρέχουν πληροφόρηση σχετικά με την εκτελούμενη διαδικασία.

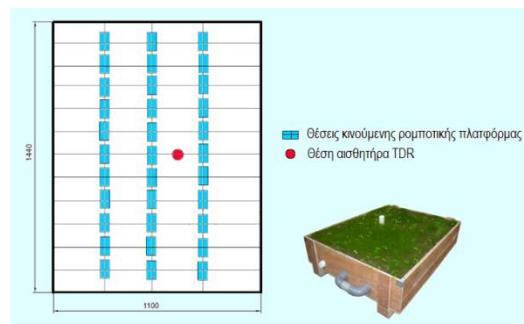
2.2. Πειραματική διάταξη

Για τα πειράματα, χρησιμοποιήθηκαν δύο εδαφολεκάνες διαφορετικών διαστάσεων, σειρά άκαμπτων πλαστικών (PVC) αγωγών πρόσβασης, η κινούμενη πλατφόρμα με τον αισθητήρα εδαφικής υγρασίας Diviner 2000 και ο αισθητήρας TRIME-T3 (IMKO Micromoduletechnik GmbH, 2000) ως αισθητήρας αναφοράς. Στην πρώτη εδαφολεκάνη (Εικόνα 2) όλοι οι αγωγοί τοποθετήθηκαν στο ίδιο βάθος (15 cm), ενώ στη δεύτερη εδαφολεκάνη (Εικόνα 3) οι αγωγοί τοποθετήθηκαν σε διαφορετικά βάθη (9 cm και 26 cm) κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Το έδαφος που χρησιμοποιήθηκε για όλα τα πειράματα ήταν μέσης μηχανικής σύστασης (Gravalos et al., 2012).

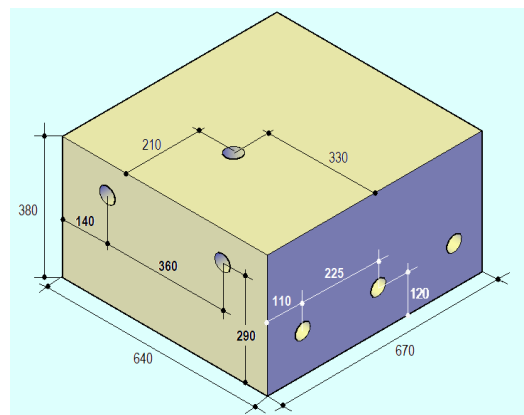
Στο εργαστήριο εξετάστηκαν περισσότερες περιπτώσεις μελέτης από τις οποίες αναφέρουμε ενδεικτικά μόνο δύο. Στην περίπτωση μελέτης I, αρδεύτηκε ολόκληρη η επιφάνεια της πρώτης

εδαφολεκάνης με τη μέθοδο της κατάκλυσης. Συνολικά εφαρμόστηκαν 40 l νερού. Η εφαρμογή του νερού έγινε με ομοιόμορφο τρόπο τις πρώτες πέντε ημέρες (δηλαδή 8 l ανά ημέρα). Ακολούθησε η μέτρηση και καταγραφή της εδαφικής υγρασίας για διάστημα εννέα εβδομάδων. Στη περίπτωση μελέτης II, έγινε καταγραφή της εδαφικής υγρασίας στη δεύτερη εδαφολεκάνη, σε διαφορετικά επίπεδα και για διάστημα ενός μήνα. Σε αυτήν την περίπτωση II δεν είχαμε κανέναν αρδευτικό χειρισμό. Αρχική υγρασία ήταν η υγρασία κατά τη φάση της λήψης του εδάφους από τον αγρό.

Για την τελική γραφική επεξεργασία των διδιάστατων και τριδιάστατων τομογραφιών χρησιμοποιήθηκαν τα ακόλουθα λογισμικά πακέτα: ArcGIS (ESRI Inc., 2006) και Blender.



Εικόνα 2. Πειραματική διάταξη περίπτωσης μελέτης I

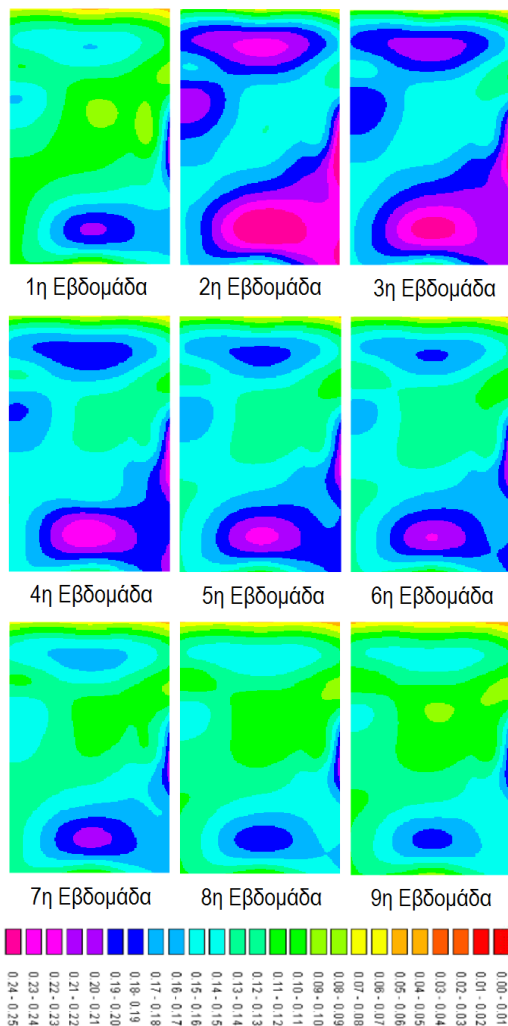


Εικόνα 3. Πειραματική διάταξη περίπτωσης μελέτης II.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στην Εικόνα 4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των διδιάστατων απεικονίσεων, της περίπτωσης μελέτης I. Κάθε απεικόνιση αντιπροσωπεύει την χωρική κατανομή της εδαφικής υγρασίας, σε βάθος 15 cm κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, για διάστημα μίας εβδομάδας. Σύμφωνα με τη χωρική κατανομή της εδαφικής υγρασίας, το νερό της άρδευσης δεν διείσδυσε ομοιόμορφα προς τα βαθύτερα στρώματα, αποδεικνύοντας πως στην εδαφολεκάνη υπάρχουν περιοχές με καλή και κακή διήθηση. Στο μέσον της εδαφολεκάνης φαίνεται να υπάρχει μία περιοχή με μειωμένη διηθητική ικανότητα, η οποία παρουσιάζει τις χαμηλότερες τιμές εδαφικής υγρασίας. Από τη σύγκριση των απεικονίσεων αυτών μεταξύ τους, προκύπτει η χρονική κατανομή της εδαφικής υγρασίας. Επίσης,

σύμφωνα με τη χρονική κατανομή χρειάστηκαν πάνω από 48 ώρες για να φτάσει το νερό της άρδευσης σε βάθος 15 cm από την επιφάνεια του εδάφους. Αυτές οι πληροφορίες είναι πολύ χρήσιμες για τον ακριβή σχεδιασμό των αρδεύσεων.



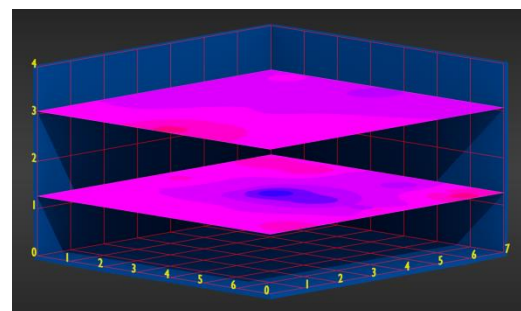
Εικόνα 4. Περίπτωση μελέτης I: Διδιάστατες (2-D) απεικονίσεις της υγρασίας (m^3m^{-3}) σε βάθος 15 cm από την επιφάνεια του εδάφους για διάστημα εννέα εβδομάδων (Gravalos et al., 2013).

Στην Εικόνα 5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της τριδιάστατης απεικόνισης, της περίπτωσης μελέτης II. Κάθε απεικόνιση αντιπροσωπεύει την χωρική κατανομή της εδαφικής υγρασίας, σε βάθος 9 cm και 26 cm από την επιφάνεια του εδάφους. Από τη σύγκριση των απεικονίσεων αυτών μεταξύ τους, προκύπτει η χωρική και χρονική κατανομή της εδαφικής υγρασίας. Η χωρική παραλλακτικότητα στο βάθος των 9 cm είναι σχετικά περιορισμένη, ενώ αυξάνεται σημαντικά στο βάθος των 26 cm. Αντιθέτως, η χρονική παραλλακτικότητα είναι αυξημένη στο βάθος των 9 cm και περιορισμένη στο βάθος των 26 cm.

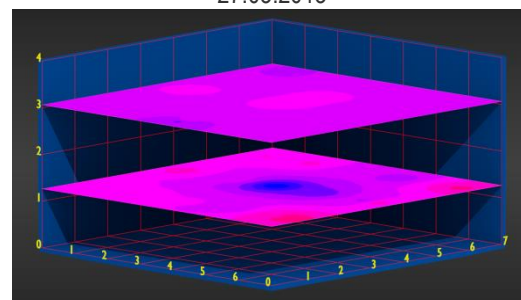
4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Η συμβολή της μεθόδου αυτής στον προσδιορισμό της χωρικής και χρονικής κατανομής της εδαφικής υγρασίας είναι σημαντική, με την

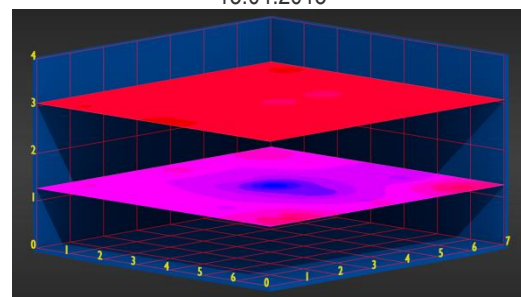
παραγωγή διδιάστατων και τριδιάστατων απεικονίσεων μεγάλης ακρίβειας. Η λεπτομερής απεικόνιση της κατανομής του νερού στο έδαφος παρέχει πολύτιμες πληροφορίες για το ισοζύγιο μεταξύ της απώλειας νερού προς την ατμόσφαιρα και της πρόσληψης νερού από το έδαφος, σε συνάρτηση με τις υδραυλικές και φυσικές ιδιότητες του εδάφους. Οι πληροφορίες αυτές θα μπορούν να αξιοποιηθούν με τρόπο που να μεγιστοποιείται η αποδοτικότητα των υδατικών εισροών και να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες τους, στα πλαίσια της "άρδευσης ακριβείας". Η "άρδευση ακριβείας" μπορεί πλέον να υλοποιηθεί διά της διαφορικής λειτουργίας των αρδευτικών συστημάτων, χάριν των παραγόμενων χαρτών μεγάλης ακρίβειας, που απεικονίζουν τη χωρική και χρονική παραλλακτικότητα της εδαφικής υγρασίας.



27.03.2013



13.04.2013



24.04.2013



Εικόνα 5. Περίπτωση μελέτης II: Τριδιάστατη (3-D) απεικόνιση της υγρασίας (m^3m^{-3}) σε δύο διαφορετικά βάθη των 9 cm και 26 cm από την επιφάνεια του εδάφους για διάστημα ενός μήνα.

Επίσης, η μέθοδος αυτή θα συμβάλλει ουσιαστικά στην γρήγορη αξιολόγηση και αποδοχή των μαθηματικών μοντέλων, που προορίζονται για την ορθή διαχείριση των υδατικών πόρων.

Τέλος, η μέθοδος αυτή μπορεί να βοηθήσει στην αξιολόγηση της αποδοτικότητας των συστημάτων άρδευσης και στην ανίχνευση των τεχνικών βλαβών (για παράδειγμα στα συστήματα στάγδην άρδευσης) με άμεσο και αποτελεσματικό τρόπο (Gravalos et al., 2012).

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρακολούθηση και η καταγραφή της εδαφικής υγρασίας με τη χρήση της ανωτέρω κινούμενης πλατφόρμας εντός δικτύου υπόγειων αγωγών είναι μία νέα προσέγγιση, με την οποία μπορούμε να συνθέσουμε διδιάστατες και τριδιάστατες απεικονίσεις της εδαφικής υγρασίας.

Ενδιαφέροντα ευρήματα της εργασίας αποτελούν: α) στην περίπτωση μελέτης Ι, η χωρική κατανομή της εδαφικής υγρασίας της 1ης εβδομάδας και της 8ης εβδομάδας παρουσιάζει παρόμοιο πρότυπο και β) στην περίπτωση μελέτης ΙΙ, η χωρική παραλλακτικότητα στο βάθος των 9 cm είναι σχετικά περιορισμένη, ενώ αυξάνεται σημαντικά στο βάθος των 26 cm.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Abdu, H., Robinson, D.A., Jones, S.B., 2007. Comparing Bulk Soil Electrical Conductivity Determination Using the DUALEM-1S and EM38-DD Electromagnetic Induction Instruments. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71: 189-196.
- Besson, A., Cousin, I., Bourennane, H., Nicoulaud, B., Pasquier, C., Richard, G., Dorigny, A., King, D., 2010. The spatial and temporal organization of soil water at field scale as described by electrical resistivity measurements. *European Journal of Soil Science* 61: 120-132.
- Cardell-Oliver, Smettem, R.K., Kranz, M., Mayer, K., 2005. A reactive soil moisture sensor network: design and field evaluation. *Int. J. Distrib. Sens. Networks* 1: 149-162.
- Γράβαλος, Ι., Ντιούδης, Π., Φιλίντας, Αγ., Κατέρης, Δ., Μόλλα, Α., 2006. Πειραματικός προσδιορισμός της θέσης των αισθητήρων εδαφικής υγρασίας σε συνθήκες στάγδην άρδευσης. Πρακτικά 10^{ου} Πανελληνίου Επιστημονικού Συνεδρίου Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης (Ε.Υ.Ε.), Τόμος Β', σελ.: 769-776, 13-16 Δεκεμβρίου 2006, Ξάνθη.
- Gravalos, I., Gialamas, T., Kateris, D., Xyradakis, P., Tsiropoulos, Z., Ralli, M., 2007. *A control system to achieve optimum soil water conditions for plant growth*. International Conference on Trends in Agricultural Engineering (TAE 2007), Prague, Czech Republic, 12-14 of September 2007.
- Gravalos, I., Loutridis, S., Moshou, D., Gialamas, Th., Kateris, D., Tsiropoulos, Z., Xyradakis, P., Savoulidis, M., Koutsofitis, Z., 2010. An underground experimental mobile platform for soil moisture monitoring. *International Conference on Agricultural Engineering (AgEng 2010)*, Clermont-Ferrand, France, 6 - 8 of September, 2010.
- Gravalos, I., Moshou, D., Gialamas, Th., Kateris, D., Tsiropoulos, Z., Augousti, A., 2012. A study on spatial and temporal soil water distribution using an underground sensor-based platform. *International Conference of Agricultural Engineering (CIGR-Ageng 2012)*, Valencia, Spain, 8-12 of July, 2012.
- Gravalos, I., Moshou, D., Loutridis, S., Gialamas, Th., Kateris, D., Tsiropoulos, Z., Xyradakis, P., 2012. Design of a pipeline sensor-based platform for soil water content monitoring. *Biosystems Engineering* 113:1-10.
- Gravalos, I., Moshou, D., Loutridis, S., Gialamas, Th., Kateris, D., Bompalas, E., Tsiropoulos, Z., Xyradakis, P., Fountas, S., 2013. 2D and 3D soil moisture imaging using a sensor-based platform moving inside a subsurface network of pipes. *Journal of Hydrology* 499:146-153.
- Grote, K., Hubbard, S., Rubin, Y., 2003. Field-scale estimation of volumetric water content using ground-penetrating radar ground wave techniques. *Water Resources Research* 39: 1321-1335.
- ESRI Inc., 2006. *ArcGIS 3D Analyst Tutorial*. USA: CA, Redlands.
- Evelt, S.R., Tolk, J.A., Howell, T.A., 2006. Soil profile water content determination: sensor accuracy, axial response, calibration, temperature dependence, and precision. *Vadose Zone Journal* 5: 894-907.
- Hanumantha Rao, B., Singh, D.N., 2011. Moisture Content Determination by TDR and Capacitance Techniques: A Comparative Study. *International Journal of Earth Sciences and Engineering* 4: 132-137.
- IMKO Micromodultechnik GmbH., 2000. *Operating manual TRIME-FM*. Germany: Ettlingen.
- Loke, M.H., Barker, R.D., 1996. Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion. *Geophysical Prospecting* 44: 499-523.
- Moran, M.S., Peters-Lidard, C.D., Watts, J.M., McElroy, S., 2004. Estimating soil moisture at watershed scale with satellite-based radar and land surface models. *Can. J. Remote Sensing* 30: 805-826.
- Muñoz-Carpena, R., 2004. *Field devices for monitoring soil water*. USA: Agricultural and Biological Engineering Department, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agriculture Sciences, University of Florida.
- Sentek Pty Ltd., 2007. *Diviner 2000 user guide version 1.4*. South Australia: Stepney.
- Schwartz, B.F., Schreiber, M.E., Yan, T., 2008. Quantifying field-scale soil moisture using electrical resistivity imaging. *J. of Hydrology* 362: 234-246.

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΣΕ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ

Μαρία Σακελλαρίου – Μακραντωνάκη¹, Ειρήνη Καρατάσιου¹, Χρήστος Τζιμόπουλος², Χρήστος Νάκας¹,
Χρήστος Παπανικολάου¹, Βασιλική Μπότα¹, Κυριάκος Μπακιρτζής¹, Νικόλαος Μπεγλόπουλος¹

¹Εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος, Τ.Κ. 384446

²Εργαστήριο Υδραυλικών Έργων και Διαχείρισης Περιβάλλοντος, Τομέας Συγκοινωνιακών και Υδραυλικών Έργων,
Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Πανεπιστημιούπολη
Θεσσαλονίκης, Τ.Κ. 54124

Τα τελευταία χρόνια, το επιστημονικό ενδιαφέρον επικεντρώνεται στην εξοικονόμηση αρδευτικού νερού και στην παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, όπως η βιομάζα που παράγεται από τις ενεργειακές καλλιέργειες. Στο πλαίσιο αυτό στο Εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, πραγματοποιήθηκε έρευνα με στόχο τη μελέτη αφενός της επίδρασης διαφορετικών μεθόδων προγραμματισμού των αρδεύσεων με αυτοματισμούς στην παραγωγή ενέργειας από την καλλιέργεια του ηλίανθου και αφετέρου στην εξοικονόμηση αρδευτικού νερού. Πραγματοποιήθηκε έρευνα Πλήρως Τυχαιοποιημένων Ομάδων που περιελάμβανε τέσσερις μεταχειρίσεις, με τέσσερις επαναλήψεις για κάθε μία από αυτές. Οι μεταχειρίσεις ήταν οι εξής: επιφανειακή στάγδην άρδευση στην οποία εφαρμόστηκε η μέθοδος του εξατμισιμέτρου τύπου A για τον προγραμματισμό των αρδεύσεων (A.E.) (μάρτυρας), η επιφανειακή στάγδην άρδευση στην οποία εφαρμόστηκε η μέθοδος Penman – Monteith (P-M.), η επιφανειακή (AUTO(E)) και η υπόγεια (AUTO(Y)) στάγδην άρδευση, στις οποίες η άρδευση προγραμματίστηκε με αυτόματο εξατμισόμετρο. Η οικονομική μελέτη έδειξε ότι, στη μεταχείριση AUTO(Y) πραγματοποιήθηκε η μεγαλύτερη εξοικονόμηση νερού καθώς και το μεγαλύτερο κέρδος.

Λέξεις κλειδιά: άρδευση, αυτοματισμοί, ενεργειακά φυτά, βιοκαύσιμα

COMPARATIVE STUDY OF THE IRRIGATION METHODS IN AN BIOENERGY CROP

Maria Sakellariou-Makrantonaki¹, Eirini Karatasiou¹, Christos Tzimopoulos², Christos Nakas¹, Christos Papanikolaou¹, Vasiliki Bota¹, Kiriakos Bakirtzis¹, Nikolaos Beglopoulos¹

¹Laboratory of Agricultural Hydraulics, Dept. of Agriculture, Crop Production and Rural Environment, University of Thessaly, Volos, e-mail: msak@uth.gr and kareilar@yahoo.gr, Tel: 2421093059 and 6978544394

²Laboratory of Hydraulic Engineering and Environmental Management, Department of Transportation and Hydraulic Works, Dept. of Rural and Surveying Engineering, Aristotle University of Thessaloniki, Salonika, e-mail: tzimop@eng.auth.gr, Tel: 2310996141

In recent years, scientific interest focused on saving irrigation water and energy production from renewable sources such as biomass produced from energy crops. In this context to the Laboratory of Agricultural Hydraulics of University of Thessaly, a comparative evaluation of four irrigation methods is presented in order to study both the effect of different automated irrigation methods scheduling on energy production from cultivating sunflower and the irrigation water-saving. A randomized Complete Block experiment was conducted with four treatments in four replications. The treatments were recognized as follows: surface drip irrigation by using the evaporation pan class A (A.E.) (control) method of irrigation scheduling, surface drip irrigation using the Penman-Monteith method of irrigation scheduling, surface (AUTO(E)) and subsurface (AUTO(Y)) drip irrigation, where the irrigation was scheduled by automated evaporation pan. The economic study showed that the treatment AUTO(Y) was the largest water conservation and the most profitable.

Keywords: irrigation, automation, energy crops, biofuels

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια, το ενεργειακό ζήτημα του πλανήτη γίνεται ολοένα και πιο έντονο. Ενδεικτικά αναφέρεται πως οι ειδικοί προβλέπουν ότι θα χρησιμοποιούμε περίπου 60% περισσότερη ενέργεια το 2030 απ' ότι χρησιμοποιούμε σήμερα (Raum E., 2008). Έτσι μεγάλο μέρος της παγκόσμιας επιστημονικής κοινότητας στράφηκε στη μελέτη παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) είναι η πρώτη μορφή ενέργειας που χρησιμοποίησε ο άνθρωπος και η σχεδόν αποκλειστική πηγή ενέργειας μέχρι

πρακτικά τις αρχές του προηγούμενου αιώνα, πριν στραφεί έντονα στη χρήση του άνθρακα και των υδρογονανθράκων (Υπουργείο Βιομηχανίας Ενέργειας και Τεχνολογίας, 1989). Ερέθισμα για τη μελέτη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αποτέλεσε η συνεχόμενη αύξηση του κόστους χρήσης των ορυκτών καυσίμων, η εξάντληση των αποθεμάτων τους και η ρύπανση του περιβάλλοντος, που προκαλείται από την καύση τους. Σήμερα οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας καλούνται να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στο συνεχώς μεταβαλλόμενο γεωπολιτικό χάρτη της ενέργειας,

καθώς δεν εμφανίζουν τον κίνδυνο εξάντλησης και είναι φιλικές προς το περιβάλλον. Στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας συγκαταλέγεται και η βιομάζα, που παράγεται από ενεργειακές καλλιέργειες.

Οι «ενεργειακές καλλιέργειες» είναι καλλιεργούμενα ή αυτοφυή είδη, παραδοσιακά ή νέα, τα οποία παράγουν βιομάζα ως κύριο προϊόν που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για διάφορους ενεργειακούς σκοπούς (Κούγιας Π., 2010). Με τον όρο βιομάζα χαρακτηρίζεται κάθε υλικό που προέρχεται από ζώντες ή πρόσφατα αποθανόντες φυτικούς και ζωικούς οργανισμούς (Biomass Energy Center, 2007). Η βιομάζα χρησιμοποιείται για ενεργειακούς σκοπούς όπως η παραγωγή βιοαερίου, βιοντίζελ, αιθανόλης, κ.λ.π.

Για την παραγωγή βιομάζας χρησιμοποιούνται διάφορα φυτικά είδη (Danalatos et al., 2008). Σύμφωνα με το Τμήμα Βιομάζας του Κέντρου Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, αυτή τη στιγμή στην Ελλάδα καλλιεργούνται πέντε προϊόντα για παραγωγή βιοντίζελ: ηλιάνθος, ελαιοκράμβη, σόγια, ατρακτυλίδα και αγριαγκινάρα (Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, www.agrotikabook.gr), Β. Λυχναράς, 2006). Ο ηλιάνθος ο ετήσιος (*Helianthus annuus* L.) ανήκει στην οικογένεια Compositae (Φ.Θ. Μουσταφέρη, 2010) και τις μεγαλύτερες απαιτήσεις σε νερό έχει από την έκφυση των ταξιανθιών ως την άνθηση (Σφήκας, 1988). Η μέση απόδοση του ηλιάνθου στην Ελλάδα είναι της τάξης των 380kg/στρ. σπόρου για μονοετή καλλιέργεια σε αρδεύσιμη έκταση (www.agroenergy.gr/content). Τα τελευταία χρόνια και μετά την έκδοση της οδηγίας 2003/30/EC της Ευρωπαϊκής Ένωσης σχετικά με την προώθηση των βιοκαυσίμων και άλλων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για τις μεταφορές, σκοπός της καλλιέργειας του ηλιάνθου είναι και η παραγωγή βιοντίζελ (Κούντριας, 2011, Συρμαλής, 2010). Σύμφωνα με την οδηγία 30/2003 της Ευρωπαϊκής Επιτροπής μέχρι το έτος 2020 το 10% των καυσίμων που καταναλώνονται στις μεταφορές θα πρέπει να παράγονται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Sakellariou – Makrantonaki et al., 2007).

Την τελευταία δεκαετία, το επιστημονικό ενδιαφέρον επικεντρώνεται στη μελέτη γνωστών μεθόδων προγραμματισμού των αρδεύσεων σε συνδυασμό με νέες τεχνολογίες, με στόχο την εξοικονόμηση αρδευτικού νερού. Επιπλέον, η καλλιέργεια του ηλιάνθου πλέον θεωρείται μία από τις πολλά υποσχόμενες ενεργειακές καλλιέργειες για μελλοντική χρήση υπό τις ελληνικές συνθήκες. Γι' αυτούς τους λόγους κρίθηκε αναγκαία η μελέτη της επίδρασης διαφορετικών μεθόδων άρδευσης, επιφανειακής και υπόγειας στάγδην άρδευσης, στην ανάπτυξη και παραγωγή του ηλιάνθου, καθώς και στην εξοικονόμηση αρδευτικού νερού. Επιπροσθέτως μελετήθηκε η εφαρμογή αυτοματοποιημένων συστημάτων άρδευσης στον αγρό. Σκοπός της καλλιέργειας αυτής αποτελεί η μεγιστοποίηση της ενεργειακής ωφέλειας από την

καλλιέργεια του ενεργειακού φυτού ηλιάνθου, με σύγχρονα αρδευτικά συστήματα.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΤΜΗΜΑ

Η έρευνα για την επίτευξη του παραπάνω στόχου πραγματοποιήθηκε στο Αγρόκτημα του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στο Βελεστίνο Μαγνησίας, κατά το έτος 2011. Το πειραματικό σχέδιο που χρησιμοποιήθηκε ήταν Πλήρων Τυχαιοποιημένων Ομάδων και περιελάμβανε τέσσερις μεταχειρίσεις με τέσσερις επαναλήψεις για την κάθε μία από αυτές. Οργανώθηκαν οι εξής 4 μεταχειρίσεις: α) η επιφανειακή στάγδην άρδευση, στην οποία εφαρμόστηκε η μέθοδος του εξαμισιμέτρου τύπου Α για τον προγραμματισμό των αρδεύσεων (Α.Ε.), β) η επιφανειακή στάγδην άρδευση στην οποία για τον προγραμματισμό της άρδευσης εφαρμόστηκε η μέθοδος Penman-Monteith (P-M.), γ) η επιφανειακή στάγδην άρδευση στην οποία ο προγραμματισμός των αρδεύσεων έγινε βάσει του αυτόματου εξαμισιμέτρου τύπου Α (ΑΥΤΟ(Ε)) και δ) η υπόγεια στάγδην άρδευση στην οποία ο προγραμματισμός των αρδεύσεων έγινε βάσει του αυτόματου εξαμισιμέτρου τύπου Α (ΑΥΤΟ(Υ)). Σε όλες τις μεταχειρίσεις οι μέθοδοι άρδευσης, που χρησιμοποιήθηκαν, ήταν αυτοματοποιημένες, εκτός της μεταχείρισης Α.Ε. Οι μέθοδοι στις οποίες χρησιμοποιήθηκε το αυτόματο εξαμισίμετρο ήταν μέθοδοι άρδευσης από απόσταση. Η δόση άρδευσης που εφαρμόστηκε σε όλες τις μεταχειρίσεις ήταν ίση με το 100% των αναγκών σε νερό της καλλιέργειας.

Η μηχανική σύσταση του εδάφους του αγρού, όπως προέκυψε από τη σχετική ανάλυση είναι: άμμος 48%, άργιλος 23% και ιλύς 29%. Το PH του εδάφους είναι 7,8 και η οργανική ουσία 0,97% (Μήτσιος κ.α., 2000). Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται οι εδαφολογικές παράμετροι του πειραματικού αγροτεμαχίου.

Πίνακας 1: Εδαφολογικοί παράμετροι του πειραματικού αγροτεμαχίου.

Σημείο Δειγ/ψίας	Βάθος Δειγ/ψίας cm	Υδατοϊκα νότητα (% v/v)	Σημείο Μόνιμης Μάρανσης (% v/v)
1	0 - 30	38,8	21,9
1	30 - 60	40,2	22
2	0 - 30	38,8	21,1
2	30 - 60	40,9	21,7
M.O.		39,7	21,7

2.2. ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ

Κάθε πειραματικό τεμάχιο (plot) είχε συνολική έκταση 56 m² και περιελάμβανε 6 γραμμές, με αποστάσεις φυτών επί της γραμμής 12 cm περίπου και μεταξύ των γραμμών 80 cm. Το επιφανειακό δίκτυο εφαρμογής περιελάμβανε σταλακτηφόρους

σωλήνες από πολυαιθυλένιο διαμέτρου 20 mm, οι οποίοι απείχαν μεταξύ τους 1,60 m. Κάθε σταλακτηφόρος αγωγός περιελάμβανε αυτοκαθαριζόμενους και αυτορυθμιζόμενους σταλακτήρες με ισαποχή 80 cm και η παροχή κάθε σταλάκτη ήταν 2,3 l/h. Στο υπόγειο σύστημα στάγδην άρδευσης χρησιμοποιήθηκε ο ίδιος τύπος σταλακτηφόρου σωλήνα και τοποθετήθηκε σε βάθος 45 cm από την επιφάνεια του εδάφους, με ειδικό υπεδαφοθέτη. Επιπλέον, περιελάμβανε και φίλτρο δίσκων εμβάπτισμένων στην ουσία trifluralin για την προστασία του συστήματος από την εισχώρηση ριζών κατά τη διακοπή της άρδευσης.

Οι καλλιεργητικές τεχνικές ήταν ίδιες για όλες τις μεταχειρίσεις και σύμφωνα με τη γενικότερη καλλιεργητική πρακτική που εφαρμόζεται στην περιοχή. Η σπορά πραγματοποιήθηκε στις 12 Απριλίου 2011, με σπαρτική μηχανή γραμμικών καλλιεργειών τεσσάρων σπαρτικών μονάδων. Η ποικιλία ηλιάνθου που χρησιμοποιήθηκε ήταν η PR64A63 της PIONEER, σε ποσότητα 0,89 kg/στρ. Κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου 2011 πραγματοποιήθηκε μετασπαρτική και προφυτρωτική χημική ζιζανιοκτονία, με την εφαρμογή του ζιζανιοκτόνου STOMP σε ποσότητα 350 cc/στρ., ενώ δεν πραγματοποιήθηκε λίπανση.

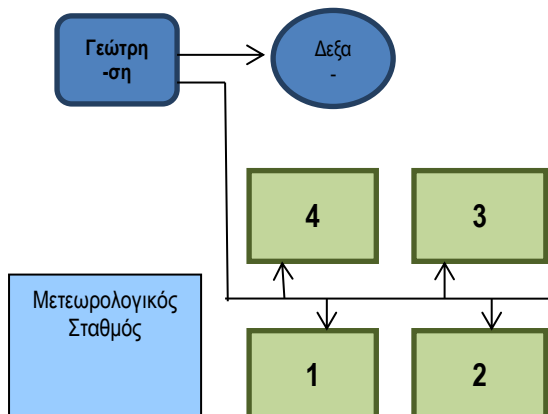
2.3. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Στην επιφανειακή στάγδην άρδευση, στην οποία ο προγραμματισμός της άρδευσης βασίστηκε στο αυτόματο εξατμισιμέτρο χρησιμοποιήθηκε ένας αισθητήρας μέτρησης στάθμης νερού. Από τον συγκεκριμένο αισθητήρα λαμβάνονταν οι ημερήσιες τιμές εξατμίσιας αυτόματα. Επίσης, χρησιμοποιήθηκε ένας Data logger, ο οποίος κατέγραφε την εξατμισμό από το εξατμισιμέτρο. Με data logger καθορίζονταν η έναρξη και η λήξη της άρδευσης, μέσω ηλεκτροβάνας. Η άρδευση πραγματοποιούνταν όταν συγκεντρώνονταν συνολικά 30 mm εξατμίσιας.

Για τη συλλογή των μετεωρολογικών στοιχείων της περιοχής (βροχόπτωση, σχετική υγρασία, ηλιοφάνεια, θερμοκρασία αέρα, κ.λ.π.) χρησιμοποιήθηκε αυτόματος μετεωρολογικός σταθμός, που βρίσκεται τοποθετημένος σε απόσταση 50 m από τον πειραματικό αγρό (Εικόνα 1). Για την επεξεργασία των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε το στατιστικό πακέτο SPSS version 18. Η στατιστική επεξεργασία πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο ανάλυσης της παραλλακτικότητας (ANOVA) για επίπεδο σημαντικότητας 5 % και η κατάταξη των μέσων όρων έγινε με την εφαρμογή του πολλαπλού τεστ Duncan (Montgomery, 1999, Α.Κ. Φασούλας, 1992).

Κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου 2011 διενεργήθηκαν μετρήσεις της εξέλιξης της διαμέτρου των κεφαλών, ύψους των φυτών και του δείκτη φυλλικής επιφάνειας. Οι μετρήσεις ήταν εβδομαδιαίες και λαμβάνονταν από τις δύο μεσαίες γραμμές σποράς κάθε πειραματικού τεμαχίου (plot), για την αποφυγή αλληλεπιδράσεων από γειτονικές γραμμές σποράς και γειτονικά πειραματικά τεμάχια.

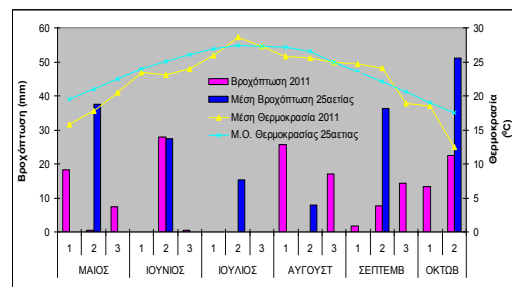
Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν για τη μελέτη παραγωγής στερεών βιοκαυσίμων από τα φύλλα και τα στελέχη των φυτών. Τέλος από την τελική παραγωγή σπόρου, έπεται από κατάλληλη εργαστηριακή ανάλυση, προέκυψε η παραγωγή ηλιελαίου και συνεπώς ενέργειας (βιοντίζελ), που αποτελεί και τον κύριο στόχο της παρούσας έρευνας.



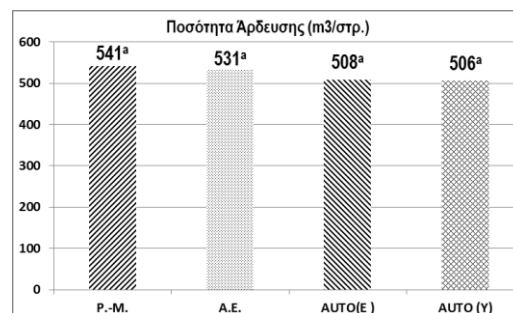
Εικόνα 1: Διάταξη επαναλήψεων των μεταχειρίσεων στον πειραματικό αγρό.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο Σχήμα 1 παρουσιάζονται κλιματικά δεδομένα της καλλιεργητικής περιόδου 2011. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται η μέση θερμοκρασία και η ωφέλιμη βροχόπτωση κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου 2011, καθώς και οι μέσες τιμές θερμοκρασίας και βροχοπτώσεων των τελευταίων 25 ετών.



Σχήμα 1. Κλιματικά δεδομένα καλλιεργητικής περιόδου 2011.

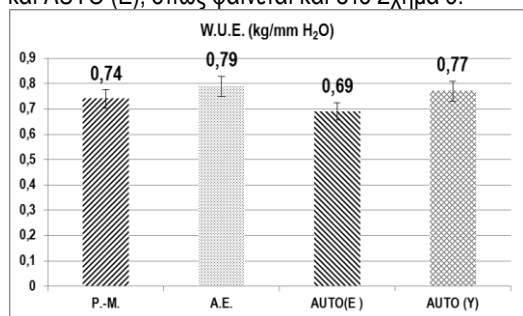


Σχήμα 2. Ποσότητα νερού που εφαρμόστηκε κατά την άρδευση για κάθε μεταχείριση.

Ως προς τη ποσότητα νερού που εφαρμόστηκε για άρδευση δεν υπήρχαν διαφορές σε επίπεδο

σημαντικότητας 5 % μεταξύ των μεταχειρίσεων σύμφωνα με το Σχήμα 2. Η σχεδόν ίδια ποσότητα αρδευτικού νερού που εφαρμόστηκε στις μεταχειρίσεις P. – M. και A.E. ίσως οφείλεται στο γεγονός ότι οι φυτικοί συντελεστές k_c (0,35 για το αρχικό και το τελικό στάδιο ανάπτυξης της καλλιέργειας και 1,15 για το στάδιο πλήρους ανάπτυξης) που χρησιμοποιήθηκαν στο πρόγραμμα άρδευσης και ήταν ίδιοι για όλες τις μεθόδους, καθώς και η τιμή του συντελεστή εξατμισιμέτρου k_p (0,7) ήταν αρκετά καλά εναρμονισμένες με τις κλιματολογικές παραμέτρους της περιοχής διεξαγωγής της έρευνας. Η μεταχείριση όμως στην οποία εφαρμόστηκε η μεγαλύτερη ποσότητα αρδευτικού νερού ήταν εκείνη, στην οποία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Penman-Monteith για τον προγραμματισμό των αρδεύσεων. Αντιθέτως, η μικρότερη ποσότητα αρδευτικού νερού εφαρμόστηκε στην υπόγεια στάγδην άρδευση στην οποία ο προγραμματισμός των αρδεύσεων πραγματοποιήθηκε βάσει του αυτόματου εξατμισιμέτρου και παράλληλα εμφάνισε την υψηλότερη εξοικονόμηση νερού (6,5 %). Πιθανόν το γεγονός αυτό να οφείλεται στις μειωμένες απώλειες από εξάτμιση. Στο ίδιο σχήμα εκτός της ποσότητας του αρδευτικού νερού που εφαρμόστηκε καθ' όλη τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου με στάγδην άρδευση, συμπεριλαμβάνεται και η άρδευση με καταιονισμό (30 mm) που πραγματοποιήθηκε μετά τη σπορά και τη χημική ζιζανιοκτονία.

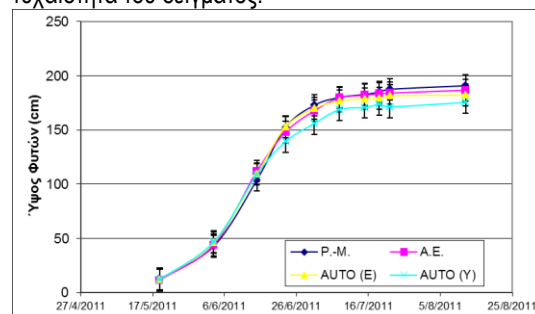
Κατά τους Howell et al. (1990) η αποδοτικότητα της χρήσης νερού άρδευσης (W.U.E.) είναι ο λόγος της συνολικής παραγωγής προς το συνολικό νερό άρδευσης. Την υψηλότερη αποδοτικότητα χρήσης αρδευτικού νερού (0,79 kg/mm H₂O) παρουσίασε η επιφανειακή στάγδην άρδευση, στην οποία ο προγραμματισμός των αρδεύσεων πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του εξατμισιμέτρου τύπου A. Ως προς την αποδοτικότητα της χρήσης του νερού άρδευσης υπήρχαν διαφορές σε επίπεδο σημαντικότητας 5% μεταξύ των μεταχειρίσεων A.E. και AUTO (E), όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.



Σχήμα 3. Αποδοτικότητα χρήσης νερού άρδευσης.

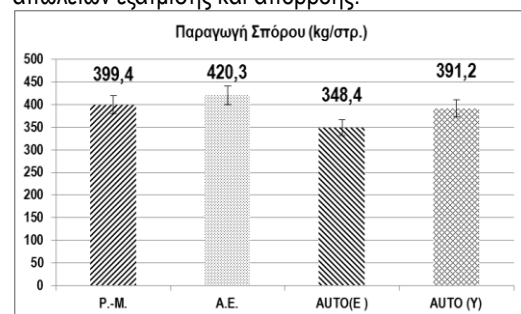
Παρατηρήθηκε μία τάση υπεροχής της P. – M. ως προς το ύψος της καλλιέργειας. Ως προς το ύψος της καλλιέργειας, μεταξύ των μεταχειρίσεων P. – M. και AUTO(Y) υπήρχαν διαφορές σε επίπεδο σημαντικότητας 5% σύμφωνα με το Σχήμα 4, που πιθανόν οφείλεται είτε στη μεγαλύτερη ποσότητα

νερού που εφαρμόστηκε στην P. – M., είτε στην τυχαιότητα του δείγματος.

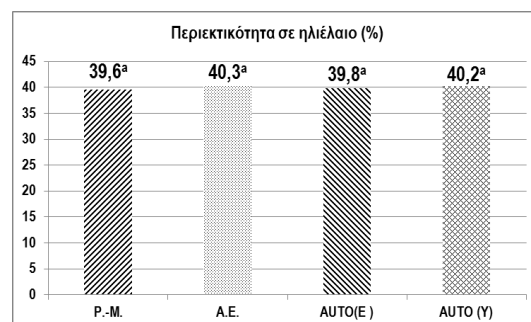


Σχήμα 4. Εξέλιξη του ύψους φυτών ηλιάνθου (cm) ανά μεταχείριση.

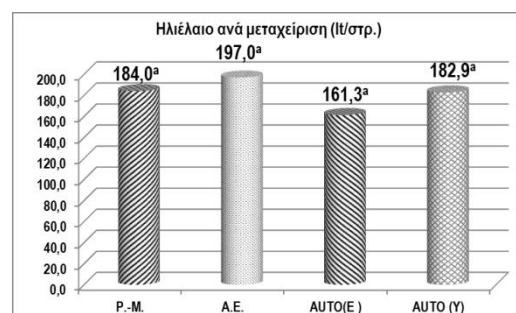
Η υψηλότερη παραγωγή σπόρου (420,3 kg/στρ.) παρατηρήθηκε στην A.E. Η μεταχείριση AUTO(E) παρουσίασε διαφορά σε επίπεδο σημαντικότητας 5% σε σχέση με τις υπόλοιπες, σύμφωνα με το Σχήμα 5. Ενώ, μεταξύ των μεθόδων άρδευσης στις οποίες χρησιμοποιήθηκε το αυτόματο εξατμισίμετρο, η AUTO(Y) ήταν εκείνη που παρουσίασε την υψηλότερη παραγωγή, ίσως λόγω των μειωμένων απωλειών εξάτμισης και απορροής.



Σχήμα 5. Παραγωγή σπόρου ανά μεταχείριση.



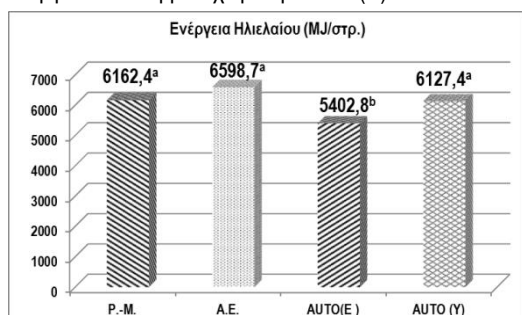
Σχήμα 6. Περιεκτικότητα σε ηλιέλαιο των σπόρων ανά μεταχείριση.



Σχήμα 7. Ποσότητα ηλιελαίου (kg/στρ) ανά μεταχείριση.

Ως προς την περιεκτικότητα του σπόρου σε ηλιέλαιο επί τοις εκατό και την ποσότητα ηλιέλαιου (lt/στρ.) δεν υπήρχαν διαφορές σε επίπεδο σημαντικότητας 5%, όπως φαίνεται και στα Σχήματα 6 και 7. Η μεταχείριση Α.Ε. όμως, παρουσίασε μια τάση υπεροχής και στις δύο περιπτώσεις. Να σημειωθεί ότι, κάθε λίτρο πετρελαίου αναλογεί σε 1,13 lt ηλιέλαιου, ενώ η θερμογόνος δύναμη του πετρελαίου είναι 44 MJ/lt και του ηλιέλαιου 33,5 MJ/lt..

Επίσης, η μεταχείριση Α.Ε. παρουσιάζει μια τάση υπεροχής και ως προς την παραγόμενη ενέργεια από το ηλιέλαιο, σύμφωνα με το Σχήμα 8. Παρατηρήθηκε διαφορά σε επίπεδο σημαντικότητας 5% ως προς την παραγόμενη από το ηλιέλαιο ενέργεια από τη μεταχείριση AUTO (E).



Σχήμα 8. Παραγόμενη ενέργεια από ηλιέλαιο (MJ/στρ.)

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα έρευνα μελετήθηκαν τρεις διαφορετικές μέθοδοι στάγδην άρδευσης με αυτοματισμούς (P. – M., AUTO(E) και AUTO(Y)). Οι μέθοδοι αυτές άρδευσης με αυτοματισμούς παρουσίασαν εξοικονόμηση νερού (5 %) σε σχέση με τη συμβατική Α.Ε. Με τη χρήση των μεθόδων κατέστη δυνατή η άρδευση των αντίστοιχων πειραματικών τεμαχίων εξ αποστάσεως. Να σημειωθεί το γεγονός ότι δεν παρατηρήθηκαν προβλήματα αξιοπιστίας στον εξοπλισμό που υποστήριζε την άρδευση από απόσταση. Κατά συνέπεια μπορεί να ισχυριστεί κανείς ότι με τη χρήση των μεθόδων AUTO(E) και AUTO(Y) μειώνονται οι μετακινήσεις των παραγωγών από και προς τα αγροτεμάχια τους. Αποτέλεσμα των μειωμένων μετακινήσεων αποτελούν οι λιγότερες εργατοώρες για την άρδευση της εκάστοτε καλλιέργειας. Επιπλέον, βελτιστοποιούν τη χρήση του νερού, καθώς παρέχεται στην καλλιέργεια τόσο ποσότητα νερού, όση ακριβώς απαιτείται για την κάλυψη των αναγκών της. Οπότε, περιορίζεται η σπατάλη νερού. Επιπροσθέτως, αποφεύγεται η κατασπατάληση ενέργειας για άρδευση, καθώς δεν πραγματοποιούνται αποκλειστικά και μόνο οι απαιτούμενες αρδεύσεις.

Το φυτό του ηλιάνθου αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη ενεργειακή καλλιέργεια, καθώς από το στέλεχος και τα φύλλα του μπορούν να παραχθούν στερεά καύσιμα, ενώ από το σπόρο του υγρά βιοκαύσιμα. Έτσι, προτείνεται στους παραγωγούς

ως εναλλακτική καλλιέργεια έναντι των παραδοσιακών. Όπως προαναφέρθηκε, ως προς την περιεκτικότητα σε ηλιέλαιο και κατ' επέκταση παραγωγή ηλιέλαιου δεν υπήρχαν διαφορές σε επίπεδο σημαντικότητας 5%. Το γεγονός όμως ότι υπήρξε διαφορά σε επίπεδο σημαντικότητας 5% ως προς την παραγωγή σπόρου, πιθανόν να οφείλεται στην υγρασία των σπόρων (τυχαίοτητα δειγμάτων).

Έτσι, προτείνεται η καλλιέργεια ηλιάνθου για ενεργειακούς σκοπούς, ως εναλλακτική καλλιέργεια, όταν μάλιστα χρησιμοποιείται για τον προγραμματισμό της άρδευσης αυτόματο εξατμισόμετρο σε συνδυασμό με σύστημα υπόγειας στάγδην άρδευσης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Biomass Energy Center, 2007. www.biomassenergycentre.org.uk
- Danalatos N.G., Archontoulis S.V., Ciannoulis K.D., Pasxonis K., Tsalikis D., Pazaros B., Papadoulis N., Zaintoudis D., 2008. Cynara, sunflower, sweet and fiber sorghum on-farm yields in north, central and south Greece in 2007. Proceedings of the International conference on agricultural Engineering, Crete, Greece pp 1-13.
- Howell, T.A., Cuenca, R.H. and Solomon, K.H. 1990. Crop yield response. In: Hoffman (ED), Management of Farm Irrigation Systems. ASAE. pp.312s.
- Κούγιας Π., 2010. Ενεργειακές Καλλιέργειες. Ηλεκτρονικό άρθρο www.agri.gr
- Κούντριας Γ., 2011. Ελλειμματική άρδευση του ηλιάνθου για τη βέλτιστη αξιοποίηση αρδευτικού νερού. Πτυχιακή Διατριβή. Βόλος.
- Λυχναράς Β., 2006. Ενεργειακές καλλιέργειες. Τμήμα Βιομάζας. Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Διαθέσιμο: www.agrotikabook.gr
- Montgomery D.C. and Runger G.C., 1999. Applied Statistics and Probability for Engineers, John Wiley and Sons, New York, 430-530 p.p.
- Μήτσιος Ι., Τούλιος Μ., Χαρούλης Α., Γάτσιος Φ. και Φλωράς Σ., 2000. Εδαφολογική μελέτη και εδαφολογικός χάρτης του αγροκτήματος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στην περιοχή του Βελεστίου. Εκδόσεις Zymel. Αθήνα, 21-41 σελ.
- Μουσταφέρη Φ.Θ., 2010. Αξιολόγηση της ανάπτυξης και των αποδόσεων τεσσάρων υβριδίων ηλιάνθου (*Helianthus annuus* L.) (δύο συμβατικών και δύο με υψηλή περιεκτικότητα σε ελαιικό οξύ υπό τις εδαφολογικές συνθήκες της Αττικής. Αθήνα.
- Raum E., 2008. Fueling the future. Fossil Fuels and Biofuels. Heinemann Library – Chicago, Illinois.
- Sakellariou – Makrantonaki M., Papalexis D., Nakos N., Kalavrouziotis I.K., 2007. Effect of modern irrigation methods on growth and energy production of sweet sorghum (var. Keller) on a dry year in Central Greece. Agricultural Water Management 90: 181-189 p.p.
- Σύρμαλης Γ., 2010. Ελλειμματική άρδευση του ηλιάνθου, έτος 2008. Βόλος.

Σφήκας Α.Γ., 1988. Ειδική Γεωργία ΙΙ, Βιομηχανικά Φυτά. Έκδοση Υπηρεσία Δημοσιευμάτων Α.Π.Θ. Θεσσαλονίκη.

Υπουργείο Βιομηχανίας Ενέργειας και Τεχνολογίας, 1989. Ανανεώσιμες πηγές Ενέργειας στην Ελλάδα. Πρόταση Εθνικής Πολιτικής.

Φασούλας Α.Κ., 1992. Στοιχεία πειραματικής Στατιστικής. Θεσσαλονίκη.

Διαδικτυακές Πηγές:

www.agroenergy.gr/content/

ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΡΔΕΥΤΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΤΗΣ ΠΕΔΙΑΔΑΣ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ VIKOR

Χ. Τζιμόπουλος², Δ. Ζορμπά¹, Χ. Ευαγγελίδης³

Εργαστήριο Υδραυλικών Έργων και Διαχείρισης Περιβάλλοντος, Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Α.Π.Θ., 54124, Θεσσαλονίκη

Στο παρόν άρθρο εφαρμόζεται η θεωρία της πολυκριτηριακής ανάλυσης με τη χρήση της μεθόδου VIKOR που ανήκει στις μεθόδους του συμβιβαστικού προγραμματισμού, με κύριο σκοπό την επιλογή του βέλτιστου αρδευτικού δικτύου στη πεδιάδα Θεσσαλονίκης. Ο κύριος στόχος της έρευνας είναι η κατάταξη και επιλογή ενός αρδευτικού δικτύου της πεδιάδας Θεσσαλονίκης από το σύνολο των αρδευτικών δικτύων που την απαρτίζουν, και όπου υπάρχουν αντιμαχόμενα κριτήρια. Τα κριτήρια αυτά είναι οικονομικά, περιβαλλοντικά και κοινωνικά, και υπάρχουν μεταξύ αυτών κάποιες προτιμήσεις (βάρη) του λήπτη απόφασης. Η μέθοδος VIKOR αναπτύχθηκε από τον Opricovic στο Πολυτεχνείο του Βελιγραδίου (Opricovic, 1998) και βασίζεται στις L_1 και L_∞ νόρμες, με εισαγωγή μιας ενδιάμεσης Q νόρμας, γραμμικού συνδυασμού των L_1 και L_∞ . Η συμβιβαστική λύση που απορρέει, παρέχει μια μέγιστη ωφέλεια του συνόλου της «πλειοψηφίας» (maximum group utility of majority) και μια ελάχιστη ατομική διαφορά του «αντιπάλου» (minimum individual regret of the opponent). Το παρόν άρθρο αποτελεί ένα τμήμα της αρχικής επεξεργασίας των δεδομένων που συλλέχθηκαν για τις ανάγκες της έρευνας σε όλη την πεδιάδα Θεσσαλονίκης. Η επιλογή των αρδευτικών δικτύων έγινε με γνώμονα την μελλοντική ενσωμάτωση των αποτελεσμάτων στον οικονομικό χρονικό προγραμματισμό του ΓΟΕΒ Θεσσαλονίκης – Λαγκαδά. Ως βέλτιστο αρδευτικό δίκτυο θεωρήθηκε εκείνο το δίκτυο της ομάδας που ικανοποιεί περισσότερο ορισμένα προεπιλεγμένα κριτήρια. Η ομάδα των αρδευτικών δικτύων αποτελεί τις εναλλακτικές λύσεις ή προτάσεις οι οποίες βαθμολογήθηκαν σε σχέση με τα κριτήρια αυτά, με την βοήθεια της μεθόδου A.H.P. (Analytic Hierarchy Process).

Λέξεις κλειδιά: Πολυκριτηριακή ανάλυση, μέθοδος VIKOR (συμβιβαστικός προγραμματισμός), πεδιάδα Θεσσαλονίκης, αρδευτικά δίκτυα.

MANAGEMENT OF IRRIGATION NETWORKS IN THE THESSALONIKI PLAIN USING THE THEORY OF THE VIKOR METHOD

C. Tzimopoulos², D. Zormpa¹, C. Evangelides³

Laboratory of Hydraulics and Environmental Management, Faculty of Rural and Surveying Engineering, AUTH., 54124, Thessaloniki

E-mails: ¹dzormpa@yahoo.gr, ²tzimop@vergina.auth.gr, ³evan@topo.auth.gr

In the present paper the theory of multi-criteria analysis using the method VIKOR is applied, in order to obtain the optimal irrigation network in Thessaloniki plain. Moreover, the research is focused on the classification of a finite number of irrigation networks belonging to Thessaloniki plain. Certain criteria have been selected for the application, which are economical, environmental and social, with some preferences (weights) between them. The VIKOR method was developed by Opricovic at the University of Belgrade (Opricovic, 1998) and it is based on L_1 and L_∞ norms, by inserting an intermediate Q norm as a linear combination of L_1 and L_∞ . The compromise follows, providing a maximum benefit of all "majority" (maximum group utility of majority) and a minimum individual difference "opponent" (minimum individual regret of the opponent). This article is only one part of the initial processing of the data collected for the purposes of research throughout the Thessaloniki plain. The selection of irrigation systems will drive to the integration results concerning economic scheduling of GOEV Thessaloniki - Lagadas.

Key words: Multi-criteria analysis, Vikor method (compromise programming), Thessaloniki plain, irrigation networks.

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα οργανωμένα συλλογικά δίκτυα άρδευσης στον Ελλαδικό χώρο έχουν κατασκευαστεί κυρίως κατά την διάρκεια της δεκαετίας του 1960 (Κωνσταντινίδης, 1989; Μπαλιώτη, 2009). Χαρακτηρίζονται από παλαιότητα αλλά και από μια ξεπερασμένη τεχνολογία και κατά το σχεδιασμό τους δεν λήφθηκαν υπόψη οι παράγοντες που αφορούν την οικονομία του νερού και την προστασία του περιβάλλοντος. Για τη διαχείριση του αρδευτικού νερού και την επισκευή των αρδευτικών δικτύων απαιτείται η γνώση ενός συνόλου κριτηρίων, τα

οποία θα βοηθήσουν στην αιεφόρο διάθεση του νερού.

Ο σχεδιασμός της διαχείρισης ενός αρδευτικού δικτύου χαρακτηρίζεται από: α) μεγάλο βαθμό αβεβαιότητας, β) περίπλοκο υποκείμενο σχεδιασμού με πολλές φορές πολυδιάστατους στόχους, γ) δυσκολία στον καθορισμό των ατόμων ή ομάδων που συμβάλλουν στη λήψη της απόφασης και δ) εξεζητημένη δομή των εναλλακτικών λύσεων οι οποίες συνδυάζουν αρκετές στοιχειώδεις δράσεις και χρονικούς ορίζοντες σχεδιασμού (Netto et al., 1996).

Για την επίλυση ενός προβλήματος πολυκριτηριακής ανάλυσης, αναπτύχθηκαν πολλές μέθοδοι συμβιβαστικού προγραμματισμού (Zeleny, 1982 και Yu, 1985). Εδώ χρησιμοποιείται η μέθοδος VIKOR που είναι μια μορφή συμβιβαστικού προγραμματισμού που αναπτύχθηκε από τον Opricovic (1998). Με ανάλογα προβλήματα διαχείρισης έχουν ασχοληθεί οι Duckstein and Opricovic (1980); Opricovic (1993); Μαραβέα (1998); Καρασαββίδης (2003); Μπάκα (2006); Zarghami (2006); Schiau and Wu (2006); Καρασαββίδης κ.ά. (2009); Ζορμπά κ.α. (2010, 2011).

2. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Η μέθοδος VIKOR (Opricovic, 2002, 2007, 2009; Opricovic and Zeng, 2004, 2006) θέτει προς επίλυση το εξής πρόβλημα:

$$\min_i \{ (f_{ij}(F_i), i = 1, \dots, m), j = 1, \dots, n \}$$

όπου:

mco= ο τελεστής της διαδικασίας MCDM (Multiple Criteria Decision Making) για την επιλογή της καλύτερης (συμβιβαστικής) εναλλακτικής δραστηριότητας.

m= ο αριθμός των δυνατών εναλλακτικών δραστηριοτήτων,

F_i= είναι η i-τή εναλλακτική δραστηριότητα,

f_{ij}= η τιμή του j-ου κριτηρίου για την εναλλακτική F_i,

n= ο αριθμός των κριτηρίων,

Με βάση τα παραπάνω καθορίζεται το μητρώο απόφασης:

$$\begin{matrix} & x_1 & x_2 & \dots & x_n \\ \begin{matrix} F_1 \\ F_2 \\ \dots \\ F_m \end{matrix} & \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & \dots & f_{1n} \\ f_{21} & f_{22} & \dots & f_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ f_{m1} & f_{m2} & \dots & f_{mn} \end{bmatrix} \end{matrix}$$

και ο αλγόριθμος συμβιβαστικής κατάταξης VIKOR ακολουθεί τα εξής βήματα:

1. Προσδιορίζεται η καλύτερη και η χειρότερη τιμή από όλες τις τιμές που αντιστοιχούν στα κριτήρια x_j, j=1,2,...,n

$$f_j^* = \max_i f_{ij}, \quad f_j^- = \min_i f_{ij}, \quad j = 1, 2, \dots, n.$$

Οι άνω τιμές καθορίζονται για την περίπτωση οφέλους. Για την περίπτωση κόστους υπάρχει η δυνατότητα να αντιστρέψουμε τη φορά της κλίμακας και να έχουμε τους ίδιους συμβολισμούς.

2. Υπολογίζονται οι τιμές $S_i = L_1$

$$S_i = \sum_{j=1}^n w_j \frac{f_j^* - f_{ij}}{f_j^* - f_j^-}$$

και $R_i = L_\infty$, $i = 1, 2, \dots, m$

$$R_i = \max_j \left[w_j \frac{f_j^* - f_{ij}}{f_j^* - f_j^-} \right],$$

όπου w_j είναι τα βάρη των κριτηρίων που εκφράζουν τις προτιμήσεις των ληπτών (DM) της απόφασης.

3. Υπολογίζονται οι τιμές Q_i , $i = 1, 2, \dots, m$,

από τη σχέση:

$$Q_i = v \frac{S_i - S^*}{S^- - S^*} + (1-v) \frac{R_i - R^*}{R^- - S^*},$$

όπου, $S^* = \min_i S_i$, $S^- = \max_i S_i$,

$R^* = \min_i R_i$, $R^- = \max_i R_i$, και v αποτελεί ένα

βάρος της στρατηγικής της μέγιστης ωφέλειας του συνόλου, ενώ 1-v αποτελεί το βάρος της ελάχιστης ατομικής διαφοράς.

4. Κατατάσσονται οι εναλλακτικές δραστηριότητες, ταξινομώντας τις τιμές των S, R, και Q κατά φθίνουσα σειρά. Τα αποτελέσματα συνιστούν τρεις στήλες κατάταξης.

5. Προτείνεται ως συμβιβαστική λύση η εναλλακτική δραστηριότητα F⁽¹⁾, η οποία είναι η καλύτερη κατατασόμενη ως προς το μέτρο της Q (ελάχιστο), εφόσον ικανοποιούνται οι ακόλουθες δύο συνθήκες:

5.1. Αποδεκτό όφελος,

$Q(F^{(2)} - F^{(1)}) \geq DQ$, όπου F⁽²⁾ είναι η εναλλακτική με δεύτερη κατάταξη στη στήλη της Q, και $DQ = 1/(m-1)$.

5.2. Αποδεκτή ευστάθεια στη λήψη απόφασης

Η εναλλακτική δραστηριότητα F⁽¹⁾ πρέπει επίσης να είναι καλύτερα καταταγμένη και ως προς τα μέτρα S και R. Αυτή η συμβιβαστική λύση είναι ευσταθής στη διαδικασία της λήψης απόφασης που έχει ως στρατηγική τη μέγιστη ωφέλεια του συνόλου (για $v > 0.5$), ή την συναίνεση ($v \approx 0.5$), ή την άρνηση ($v < 0.5$). Το v είναι το βάρος της στρατηγικής της λήψης απόφασης της μέγιστης ωφέλειας του συνόλου.

3. ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΑΡΔΕΥΤΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ

3.1 Περιγραφή του προβλήματος

Η περιοχή μελέτης αποτελείται από 16 αρδευτικά δίκτυα της πεδιάδας Θεσσαλονίκης όπου παρακάτω παρουσιάζονται με το όνομα του Τ.Ο.Ε.Β., και συγκεκριμένα: A₁= το αρδευτικό δίκτυο του Αγ.Αθανασίου, A₂= το αρδευτικό δίκτυο της Ακρολήμνης, A₃=το αρδευτικό δίκτυο της Βραχιάς, A₄= το αρδευτικό δίκτυο του Βρυσακίου, A₅= το αρδευτικό δίκτυο του Ζερβοχωρίου, A₆= το αρδευτικό δίκτυο του Κλειδίου, A₇= το αρδευτικό δίκτυο της Κορυφής, A₈= το αρδευτικό δίκτυο των Μαλγάρων, A₉= το αρδευτικό δίκτυο του Νησίου (Α'), A₁₀= το αρδευτικό δίκτυο της Ξεχασμένης, A₁₁= το αρδευτικό δίκτυο της Πρασινάδας, A₁₂= το αρδευτικό δίκτυο του Σταυρού, A₁₃= το αρδευτικό δίκτυο των Τρικάλων, A₁₄= το αρδευτικό δίκτυο της Χαλάστρας, A₁₅= το αρδευτικό δίκτυο της Χαλκηδόνας και A₁₆= το αρδευτικό δίκτυο της Τέως Λίμνη Γιαννιτσών (όπου περιλαμβάνει τους ακόλουθους Τ.Ο.Ε.Β: Αλεξάνδρειας, Γιαννιτσών, Καρυώτισσας, Κρ.Βρύσης, Μ.Μοναστηρίου, Νησίου (Β'), Π.Σκυλιτσίου και Σχοινά).

Για τη εύρεση της ιδανικής λύσης του προβλήματος, είναι αναγκαία η θέσπιση κριτηρίων

τα οποία θα καλύπτουν τόσο το οικονομικό-περιβαλλοντικό όσο και το παραγωγικό - κοινωνικό σκέλος της αξιολόγησης του κάθε σεναρίου. Έτσι, χρησιμοποιούνται τα παρακάτω βασικά κριτήρια: C_1 = οι ανάγκες των καλλιεργειών σε νερό ανά καλλιεργητική περίοδο και ανά στρέμμα, C_2 = το νερό που παροχετεύεται στα αρδευτικά δίκτυα από τον ΓΟΕΒ Θεσσαλονίκης – Λαγκαδά ανά καλλιεργητική περίοδο και ανά στρέμμα, C_3 = το πλεονάζον νερό που παροχετεύεται στα αρδευτικά δίκτυα ανά καλλιεργητική περίοδο και ανά στρέμμα, C_4 = η μέση παραγωγικότητα ανά καλλιεργητική περίοδο και ανά στρέμμα, C_5 = το παραγωγικό κόστος καλλιέργειας ανά καλλιεργητική περίοδο και ανά στρέμμα, C_6 = ο προϋπολογισμός έργων συντήρησης ανά έτος και ανά στρέμμα, C_7 = οι δαπάνες εκτελεσθέντων έργων ανά έτος και ανά στρέμμα, C_8 = η μηχανική σύσταση του εδάφους.

Η βαθμονόμηση των κριτηρίων έγινε μερικώς με τη μέθοδο A.H.P. (Analytic Hierarchy Process) που εισήχθη το 1980 από τον Saaty, τόσο για τα σενάρια όσο και για τα βάρη και παρουσιάζεται στον πίνακα 1. Ο χειρίστος βαθμός είναι το 1 ενώ ο μέγιστος το 9. Ο κύριος λόγος που χρησιμοποιήθηκε αυτή η βαθμονόμηση ήταν για να επιτευχθεί κατά το δυνατό η αντικειμενοποίηση των σταθμιστικών βαρών και των κριτηρίων.

Πίνακας 1. Βαθμονόμηση με τη μέθοδο A.H.P. (Analytic Hierarchy Process)

Αριθμητική βαθμονόμηση	Λογική βαθμονόμηση
9	εξαιρετικής προτίμησης
8	σθεναρά εξαιρετική προτίμηση
7	πολύ δυνατή προτίμηση
6	έντονα σε πολύ μεγάλο βαθμό προτίμηση
5	δυνατή προτίμηση
4	μέτρια έντονα προτίμηση
3	μέτρια προτίμηση
2	σχεδόν μέτρια προτίμηση
1	σχεδόν προτιμητέο

3.2 Αξιολόγηση προβλήματος

Ο $A(I,J)$ είναι ο πίνακας του οποίου τα στοιχεία δείχνουν την αξία των διαφορετικών σεναρίων για τα διαφορετικά κριτήρια. Ο δείκτης I είναι για τα διαφορετικά σενάρια (εναλλακτικές προτάσεις), ενώ ο δείκτης J για τα διαφορετικά κριτήρια. Δείχνει δηλαδή ο $A(I,J)$ την «βαθμονόμηση» ή την αξιολόγηση του κάθε σεναρίου με βάση τα διάφορα κριτήρια.

Στον Πίνακα 2 παρουσιάζεται η αριθμητική βαθμονόμηση για την περιοχή μελέτης σε μορφή ιδιοδιανυσμάτων. Θα πρέπει να επισημανθεί ότι στα κριτήρια C_2 , C_3 , C_5 , C_6 , και C_7 ισχύει η αντίστροφη κλίμακα αξιολόγησης της μεθόδου A.H.P..

Σχετικά με την διαδικασία βαθμονόμησης των κριτηρίων που πραγματοποιήθηκε μερικώς με τη μέθοδο A.H.P., η ιεράρχηση των εναλλακτικών προτάσεων έγινε κατόπιν υποδείξεων του λήπτη απόφασης, ο οποίος καθορίζει την προτίμηση ή

προτεραιότητα της κάθε εναλλακτικής πρότασης σε σχέση με τα εναλλακτικά κριτήρια.

Για να δημιουργηθεί ο πίνακας 2 όπου παρουσιάζει την αριθμητική αξιολόγηση του προβλήματος, πρέπει να υπολογισθούν τα ιδιοδιανύσματα του κάθε κριτηρίου σε σχέση με τις εναλλακτικές προτάσεις με κύριο στόχο την αντικειμενοποίηση του προβλήματος.

Αναλυτικότερα, ο πίνακας 3 που ακολουθεί παρουσιάζει για το κριτήριο C_1 = οι ανάγκες των καλλιεργειών, την διαδικασία αξιολόγησης αυτού ως προς τα διαφορετικά σενάρια (εναλλακτικές προτάσεις), με την χρήση της μεθόδου A.H.P. (Analytic Hierarchy Process), με την δημιουργία ενός αναστροφοαντίστροφου πίνακα. Με την βοήθεια του πίνακα 3 υπολογίζονται τα ιδιοδιανύσματα του πρώτου κριτηρίου, ως προς τα διάφορα σενάρια (εναλλακτικές προτάσεις), τα αποτελέσματα αυτών παρουσιάζονται στον πίνακα 2 και συγκεκριμένα στην δεύτερη στήλη. Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται 8 φορές, όσα είναι και τα κριτήρια.

3.3 Αριθμητικό παράδειγμα μεθόδου (Ζορμπά, 2010)

Το παρακάτω αριθμητικό παράδειγμα είναι μια σύντομη εφαρμογή της μεθόδου VIKOR, λόγο του περιορισμένου διαθέσιμου χώρου. Επιγραμματικά, έχουμε πέντε διαφορετικά σενάρια (εναλλακτικές προτάσεις) και πέντε κριτήρια. Η βαθμολόγηση των εναλλακτικών ως προς τα κριτήρια αλλά και η σπουδαιότητα (βάρος) του κάθε κριτηρίου αξιολογήθηκε με τη μέθοδο βαθμονόμησης ανάλογη της μεθόδου Saaty.

Στον πίνακα 4 παρουσιάζεται η αριθμητική αξιολόγηση του προβλήματος, χωρίς την χρήση ιδιοδιανυσμάτων και στον πίνακα 5 παρουσιάζονται η σπουδαιότητα (βάρη) του κάθε κριτηρίου.

Με βάση τους τύπους που αναφέρονται στο κεφάλαιο 2, πραγματοποιείτε ο υπολογισμός των $S_i = L_1$, $R_i = L_\infty$ και Q_i , $i = 1, 2, \dots, m$, για $v=0.5$, για κάθε εναλλακτική πρόταση

Σύμφωνα με τον πίνακα 6 όπου δείχνει την κατάταξη κατά VIKOR η σειρά κατάταξης έχει ως εξής: $A_1 > A_2 > A_4 > A_5 > A_3$, δηλαδή η πρώτη εναλλακτική πρόταση είναι η καλύτερη σε σχέση με τις υπόλοιπες ενώ η τρίτη εναλλακτική πρόταση είναι η χειρότερη.

Οι δύο συνθήκες της μεθόδου, αποδεκτό όφελος και αποδεκτή ευστάθεια στη λήψη απόφασης είναι αληθής και πληρούν τις προϋποθέσεις αφού $Q(F^{(2)} - F^{(1)}) \geq DQ \Rightarrow (0,276-0)/1/(5-1)=0.25$ και επιπρόσθετα σύμφωνα με τη δεύτερη συνθήκη οι κατατάξεις των S , R συμπίπτουν με την κατάταξη της Q .

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Θα πρέπει να επισημανθεί ότι η παραπάνω έρευνα αποτελεί τμήμα μιας ερευνητικής εργασίας που υλοποιείται στο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (Εργαστήριο Υδραυλικών Έργων και Διαχείρισης Περιβάλλοντος) στα πλαίσια μιας διδακτορικής διατριβής.

Αναλύοντας τον πίνακα 2 και υπολογίζοντας τα ιδιοδιανύσματα προτεραιότητας, ένα πρώτο ασφαλές συμπέρασμα είναι πως τα αρδευτικά δίκτυα της Τέως λίμνης Γιαννιτσών αποτελούν την εναλλακτική πρόταση που εκπληρώνει τα περισσότερα κριτήρια.

Επιπρόσθετα, τα αρδευτικά δίκτυα της Τέως Λίμνης Γιαννιτσών είναι τα πιο αποδοτικά όταν εξετάζονται ως συνάρτηση της κατανάλωσης αρδευτικού νερού, της συντήρησης και

παραγωγικότητας. Επιπρόσθετα τα αρδευτικά δίκτυα που αρδεύονται από τον Αξιό ποταμό παρουσιάζουν μεγάλη κατασπατάληση υδάτων, αφενός διότι αποτελούν δίκτυα βαρύτητας και αφετέρου λόγω παλαιότητας. Ταυτόχρονα τα αρδευτικά δίκτυα που είναι στο παραθαλάσσιο μέτωπο παρουσιάζουν αυξημένο κόστος παραγωγής σε σχέση με τα υπόλοιπα αρδευτικά δίκτυα, κυρίως διότι πρόκειται περί ορυζώνων.

Πίνακας 2. Αριθμητική αξιολόγηση προβλήματος

	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈
A ₁	0.0153	0.0106	0.0091	0.0276	0.0494	0.1921	0.1916	0.1564
A ₂	0.0375	0.0646	0.1220	0.1096	0.0096	0.0236	0.0165	0.0220
A ₃	0.0177	0.0140	0.0133	0.0202	0.0709	0.1212	0.1247	0.0909
A ₄	0.0589	0.0375	0.0408	0.0903	0.0355	0.0527	0.0537	0.0377
A ₅	0.0897	0.1768	0.1767	0.1528	0.0139	0.0206	0.0144	0.0195
A ₆	0.0094	0.0186	0.0199	0.0093	0.0273	0.0475	0.0488	0.0335
A ₇	0.1582	0.0910	0.0585	0.0382	0.1137	0.0439	0.0452	0.0810
A ₈	0.0109	0.0125	0.0152	0.0130	0.0317	0.1037	0.1072	0.1260
A ₉	0.0815	0.0467	0.0671	0.0653	0.0903	0.0402	0.0414	0.0172
A ₁₀	0.1355	0.0300	0.0246	0.1259	0.0121	0.0371	0.0383	0.0293
A ₁₁	0.0674	0.1051	0.0880	0.0461	0.0603	0.0342	0.0353	0.0711
A ₁₂	0.1263	0.0530	0.0456	0.1957	0.0176	0.0313	0.0325	0.0151
A ₁₃	0.1066	0.1340	0.1066	0.0112	0.1823	0.0287	0.0297	0.0460
A ₁₄	0.0082	0.0083	0.0102	0.0241	0.0241	0.1441	0.1393	0.1159
A ₁₅	0.0273	0.0248	0.0296	0.0170	0.1318	0.0172	0.0203	0.0957
A ₁₆	0.0496	0.1727	0.1729	0.0538	0.1294	0.0619	0.0612	0.0427

Πίνακας 3. Αναστροφoαντίστροφoς πίνακας πρώτου κριτηρίου

C ₁	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	A ₇	A ₈	A ₉	A ₁₀	A ₁₁	A ₁₂	A ₁₃	A ₁₄	A ₁₅	A ₁₆
A ₁	1	1/4	1/2	1/5	1/6	3	1/8	2	1/6	1/8	1/6	1/9	1/8	4	1/3	1/5
A ₂	4	1	3	1/2	1/3	7	1/8	6	1/3	1/4	1/3	1/5	1/4	8	2	1/2
A ₃	2	1/3	1	1/5	1/7	4	1/9	3	1/7	1/8	1/6	1/9	1/8	4	1/3	1/5
A ₄	5	2	5	1	1/2	8	1/3	8	1/2	1/3	1/2	1/3	1/3	9	4	2
A ₅	6	3	7	2	1	9	1/2	7	2	1/2	2	1/2	1/2	9	5	3
A ₆	1/3	1/7	1/4	1/8	1/9	1	1/9	1/2	1/8	1/9	1/8	1/8	1/9	2	1/5	1/7
A ₇	8	8	9	3	2	9	1	8	3	2	3	2	2	9	5	3
A ₈	1/2	1/6	1/3	1/8	1/7	2	1/8	1	1/8	1/9	1/8	1/9	1/9	2	1/5	1/7
A ₉	6	3	7	2	1/2	8	1/3	8	1	1/2	2	1/2	1/2	8	6	3
A ₁₀	8	4	8	3	2	9	1/2	9	2	1	3	2	2	9	6	4
A ₁₁	6	3	6	2	1/2	8	1/3	8	1/2	1/3	1	1/3	1/2	8	4	2
A ₁₂	9	5	9	3	2	8	1/2	9	2	1/2	3	1	2	9	6	4
A ₁₃	8	4	8	3	2	9	1/2	9	2	1/2	2	1/2	1	9	5	3
A ₁₄	1/4	1/8	1/4	1/9	1/9	1/2	1/9	1/2	1/8	1/9	1/8	1/9	1/9	1	1/5	1/7
A ₁₅	3	1/2	3	1/4	1/5	5	1/5	5	1/6	1/6	1/4	1/6	1/5	5	1	1/4
A ₁₆	5	2	5	1/2	1/3	7	1/3	7	1/3	1/4	1/2	1/4	1/3	7	4	1

Πίνακας 4. Αριθμητική αξιολόγηση προβλήματος

	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅
A ₁	8	3	5	2	8
A ₂	6	3	3	2	4
A ₃	1	3	3	2	5
A ₄	7	1	1	3	9
A ₅	3	4	2	1	1

Πίνακας 5. Βάρη κατά Saaty

W ₁	W ₂	W ₃	W ₄	W ₅
0.5840	0.2200	0.1070	0.0490	0.0400

Πίνακας 6. Κατάταξη κατά VIKOR

	S	sorting S	R	sorting R	Q	sorting Q
A ₁	0.103	A ₁ = 0.103	0.073	A ₁ = 0.073	0.000	A ₁ = 0.000
A ₂	0.343	A ₂ = 0.343	0.167	A ₂ = 0.167	0.276	A ₂ = 0.276
A ₃	0.755	A ₄ = 0.410	0.584	A ₄ = 0.220	1.000	A ₄ = 0.379
A ₄	0.410	A ₅ = 0.586	0.220	A ₅ = 0.417	0.379	A ₅ = 0.707
A ₅	0.586	A ₃ = 0.755	0.417	A ₃ = 0.584	0.707	A ₃ = 1.000

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Περιοδικά

Duckstein, L. and Opricovic, S., 1980. Multiobjective optimization in river basin development. *Water Res. Res.*, 16(1): 14-20.

Netto, C.O., Parent, E. And Duckstein, L., 1996. Multicriterion Design of Long-Term Water Supply in Southern France. *Water Resources Planning and Management*, 122: 403-413.

Opricovic, S., 1993. Dynamic programming with application to water reservoir management. *Agricultural Systems*, 41: 335-347. Opricovic S., (1998) *Multicriteria Optimization of Civil Engineering Systems*, Faculty of Civil Engineering, Belgrade.

Opricovic S., 2002, "Multicriteria Planning of Post-Earthquake Sustainable Reconstruction", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 17, 211-220.

Opricovic S., (2009) A Compromise Solution in Water Resources Planning. *Water Resour Manage*, 23, 1549-1561

Opricovic S. and Tzeng GH (2004) The compromise solution by MCDM methods: a comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *Eur J Oper Res* 156(2), 445-455.

Opricovic S, Tzeng GH (2006) Extended VIKOR method in comparison with outranking methods. *Eur J Oper Res* 178(2), 514-529.

Schiau, J.T. and Wu F.C., 2006. Compromise Programming Methodology for determining instream flow under multiobjective water allocation criteria. *JAWRA Journal of the A.W.R.A.*, 42(5): 1179-1191.

Zarghami, M., 2006. Integrated water resources management in polrud irrigation system. *Water Resources Management*, 20: 215-225

Κεφάλαια βιβλίων

Ζορμπά, Δ., 2010. Πολυκριτηριακή ανάλυση με χρήση συμβιβαστικού προγραμματισμού. Εφαρμογή σε αρδευτικά δίκτυα της πεδιάδας Θεσσαλονίκης. Μεταπτυχιακή Διατριβή, ΤΑΤΜ, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 64-71 σελ.

Καρασαββίδης, Π., 2003. Εφαρμογή της Πολυκριτηριακής Ανάλυσης (Συμβιβαστικός Προγραμματισμός) στη Διαχείριση Υδατικών

Πόρων στην Περιοχή Λιβαδίου Λαρίσης. Επιλογή Βέλτιστης Θέσης Φράγματος). Μεταπτυχιακή Διατριβή, ΤΑΤΜ, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 89-91 σελ.

Κωνσταντίνιδης, Κ., 1989. Τα εγγειοβελτιωτικά έργα στην πεδιάδα Θεσσαλονίκης. Εκδόσεις ΓΕΩΤ.Ε.Ε, Θεσσαλονίκη, 133-134 σελ.

Μαραβέα, Ε., 1998. Μέθοδος πολυκριτηριακής ανάλυσης στη διαχείριση των υδατικών πόρων. Διπλωματικά εργασία, Ε.Μ.Π., 97 σελ.

Μπάκα, Μ., 2006. Διαχείριση Υδατικών Πόρων με Μεθόδους Πολυκριτηριακής Ανάλυσης (Συμβιβαστικός Προγραμματισμός) και Εφαρμογή στην Υδρολογική Λεκάνη του Ποταμού Νέστου. Μεταπτυχιακή Διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 115-117 σελ.

Μπαλιώτη, Β., 2009. Διαχείριση αρδευτικών δικτύων με τη βοήθεια του γραμμικού προγραμματισμού. Εφαρμογή στο Αρδευτικό δίκτυο Γέφυρας. Μεταπτυχιακή διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 36 σελ.

Saaty, T.L., 1980. *The Analytic Hierarchy Process*. Mc Graw-Hill, New York.

Yu P.L., 1985. *Multiple-Criteria Decision Making, Concepts, Techniques, and Extension*. Plenum Press, Lawrence, Kansas, pp. 388.

Zeleny, M., 1982. *Multiple Criteria Decision Making*. McGraw-Hill, New York.

Πρακτικά Συνεδρίων

Τζιμόπουλος, Χ., Ζορμπά, Δ., Ευαγγελίδης, Χ., 2011. Πολυκριτηριακή ανάλυση με χρήση συμβιβαστικού προγραμματισμού: εφαρμογή σε αρδευτικά δίκτυα της πεδιάδας Θεσσαλονίκης. Πρακτικά 7^{ου} Πανελλήνιου Συνεδρίου Γεωργικής Μηχανικής, Ε.Γ.Μ.Ε.. Θεσσαλονίκη.

Καρασαββίδης, Π., Τζιμόπουλος, Χ., Ευαγγελίδης, Χ., 2009. Εφαρμογή της πολυκριτηριακής ανάλυσης (συμβιβαστικός προγραμματισμός) στη διαχείριση υδατικών πόρων στην περιοχή Λιβαδίου Λάρισας. Πρακτικά 6^{ου} Πανελλήνιου Συνεδρίου Γεωργικής Μηχανικής, Ε.Γ.Μ.Ε.. Θεσσαλονίκη, σελ. 123-130.

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΥΔΑΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗΣ ΔΥΟ ΥΒΡΙΔΙΩΝ ΗΛΙΑΝΘΟΥ ΥΠΟ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΛΗΡΟΥΣ ΚΑΙ ΕΛΛΕΙΜΜΑΤΙΚΗΣ ΑΡΔΕΥΣΗΣ

Ιωάννης Αργυροκαστρίτης¹, Γιολάντα Παπαθεοχάρη², Σταύρος Αλεξανδρής¹,
Αγγελική Πανταζή¹, Ιωάννα Μανδάρκα¹

Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών

¹Εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής, Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων & Γεωργικής Μηχανικής,

²Εργαστήριο Γεωργίας, Τμήμα Επιστήμης Φυτικής Παραγωγής, Ιερά Οδός 75, Αθήνα, 118 55

Στον πειραματικό αγρό του εργαστηρίου Γεωργικής Υδραυλικής του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών έγινε κατά την καλλιεργητική περίοδο (Μάιος - Αύγουστος) 2012, πειραματική καλλιέργεια δύο υβριδίων ηλίανθου (*Helianthus annuus* L.), Tristan και Sanay αντίστοιχα, με σκοπό να αξιολογηθεί η ανάπτυξη και η παραγωγή τους σε σπόρο και λάδι, κάτω από συνθήκες πλήρους και ελλειμματικής άρδευσης. Εφαρμόστηκε πειραματικό σχέδιο υποδιαιρεμένων τεμαχίων (split-plot) με 4 επαναλήψεις, 2 κύριες επεμβάσεις (Wet: πλήρους άρδευσης και Dry: ελλειμματικής άρδευσης) και 2 υπο-επεμβάσεις (Tristan και Sanay). Για τους σκοπούς του πειράματος κατά τη διάρκεια του βιολογικού κύκλου των φυτών, έγιναν μετρήσεις που αφορούσαν σε χαρακτηριστικά της ανάπτυξης τους (ύψος φυτών, φυλλική επιφάνεια, ξηρό βάρος κ.ά.), στην τελική απόδοσή τους σε σπόρο και λάδι, καθώς και χαρακτηριστικές ιδιότητες των φυτών, που σχετίζονται με την καταπόνησή τους σε συνθήκες ελλειμματικής άρδευσης, όπως π.χ. η θερμοκρασία των φύλλων τους. Η άρδευση των φυτών γινόταν με σύστημα επιφανειακής στάγδην άρδευσης. Επίσης λαμβάνονταν και οι απαραίτητες μικρομετεωρολογικές παρατηρήσεις, που τελικά βοήθησαν στον προσδιορισμό του δείκτη υδατικής καταπόνησης φυτού (Crop Water Stress Index) ενώ προσδιορίστηκε και η μεταβολή του κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου. Από τα αποτελέσματα του πειράματος, εξάγονται συμπεράσματα τόσο για την ανάπτυξη και παραγωγή των εξεταζόμενων υβριδίων ηλίανθου, όσο και για την καταπόνηση των φυτών υπό συνθήκες ελλειμματικής άρδευσης, που βοηθούν στην αξιολόγηση των συγκεκριμένων υβριδίων για παραγωγή σπόρου και βιοκαυσίμου, ενώ συγχρόνως εκτιμάται η συμβολή της ελλειμματικής τους άρδευσης στην αρδεύμενη γεωργία.

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

GROWTH PRODUCTION AND CROP WATER STRESS INDEX VARIATION OF TWO SUNFLOWER CULTIVARS UNDER FULL AND DEFICIT IRRIGATION CONDITIONS

Ioannis Argyrokastritis¹, Yolanda Papatheohari², Stavros Alexandris¹,
Aggeliki Pantazi¹, Ioanna Mandaraka¹

Agricultural University of Athens

¹Lab. of Agricultural Hydraulics, Dep. of Natural Resources Development & Agricultural Engineering,

²Lab of Crop Production Dep. of Crop Science, Iera Odos 75, 11855, Athens, Greece

jarg@aua.gr, papatheohari@aua.gr, stalex@aua.gr,

In the experimental field of Laboratory of Agricultural Hydraulics of the Agricultural University of Athens, a field experiment was carried out from May to August of 2012, using two hybrids (Tristan and Sanay) of *Helianthus annuus* L. Aim of the experiment was the evaluation of crop development and production under full and deficit irrigation conditions. A split – plot experimental design with 4 replications, 2 main treatments (Wet and Dry) and 2 sub-treatments (Tristan and Sanay) was followed. During the experiment some characteristics of crop development (crop height, leaf area and dry weight) the harvest (seed and oil production) and some properties related to the crop water stress under deficit irrigation (e.g. leaf temperature) were measured. Irrigation was applied using a surface drip irrigation system. Crop water stress index (CWSI) and its variation during the crop season were determined also. Useful conclusions for the production and development of the helianthus crop under full and deficit irrigation conditions are reached. Also the contribution of deficit irrigation of sunflower to irrigated agriculture and oil production is evaluated.

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

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο ηλίανθος, (*Helianthus annuus* L.) είναι φυτό με πολύ μεγάλη οικονομική σημασία, η οποία οφείλεται κυρίως στο λάδι που περιέχουν οι σπόροι του. Αυτοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως τρόφιμο (ως ξηρός καρπός και ως ηλιέλαιο που βγαίνει από αυτούς με έκθλιψη). Από τους ηλιόσπορους μετά από βιομηχανική επεξεργασία μπορεί να παραχθεί υγρό

βιοκαύσιμο, (βιοντήζελ). Από τα υποπροϊόντα της σπορελαιουργίας μπορεί να παραχθεί ηλιόπιττα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν ζωοτροφή. Θεωρείται φυτό όχι ιδιαίτερα απαιτητικό στο νερό, σε Ελληνικές συνθήκες όμως, με την άρδυσή του ακόμη κι αν αυτή είναι ελλειμματική, είναι δυνατό να επιτευχθούν αρκετά ικανοποιητικές αποδόσεις (Steduto et al., 2012). Επιβάλλεται λοιπόν να γίνεται ορθολογική

εφαρμογή του νερού άρδευσης, με σύγχρονες μεθόδους ενώ προκειμένου να επιτευχθούν οι επιθυμητές αποδόσεις, θα πρέπει η άρδευση να γίνεται την κατάλληλη χρονική στιγμή. Ως ένας αρκετά αξιόπιστος δείκτης της υδατικής δοκιμασίας που υφίστανται τα φυτά θεωρείται το υδατικό δυναμικό του φύλλου, (Karamanos, 2003). Η εκτίμηση του όμως και μάλιστα σε συνθήκες αγρού απαιτεί ιδιαίτερα ακριβό εξοπλισμό. 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) της ατμόσφαιρας σε 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 ($T_c - T_a$) και (VPD) αποκλίνει από τη γραμμική σχέση που αντιπροσωπεύει την επάρκεια εδαφικής υγρασίας για το φυτό, ενώ όταν αυτό βρεθεί σε συνθήκες μηδενικής διαπνοής (δηλ. μέγιστης υδατικής καταπόνησης) η διαφορά ($T_c - T_a$) έχει σταθερή τιμή. Η γραμμικότητα της σχέσης ($T_c - T_a$) και (VPD) για φυτά υπό συνθήκες μέγιστης διαπνοής και η σταθερότητα της διαφοράς ($T_c - T_a$) για φυτά υπό συνθήκες μηδενικής διαπνοής αποτέλεσαν και τη βάση για τον ορισμό του δείκτη υδατικής καταπόνησης φυτού (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 της παρούσας εργασίας είναι η εκτίμηση της υδατικής καταπόνησης που υφίστανται δύο υβρίδια ηλιάνθου, Tristan και Sanay, καθώς και η αξιολόγηση της ανάπτυξης και της παραγωγής τους σε σπόρο και σε λάδι, όταν αυτά υπόκεινται σε δύο μεταχειρίσεις, κανονικής και ελλειμματικής (50%) άρδευσης αντίστοιχα. Παρόμοιες έρευνες σε Ελληνικές συνθήκες, αλλά για άλλα υβρίδια, έγιναν και στο παρελθόν (Αργυροκαστρίτης κ.ά, 2009), ενώ από πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στην περιοχή του Λιβάνου (Fadi Karam et al., 2007) εξήχθηκαν χρήσιμα συμπεράσματα για παραμέτρους, όπως η εξαμισοδιαπνοή και η αποτελεσματικότητα χρήσης νερού για τον ηλιάνθο.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Η έρευνα πραγματοποιήθηκε κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου 2012, στον

πειραματικό αγρό του εργαστηρίου Γεωργικής Υδραυλικής του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών. Εφαρμόστηκε σχέδιο των υποδιαιρεμένων τεμαχίων (split plot) με τέσσερις επαναλήψεις, με δύο κύριες επεμβάσεις (Wet και Dry) και δύο υποεπεμβάσεις (Tristan – Sanay). Ο πειραματικός αγρός διαχωρίστηκε σε 16 πειραματικά τεμάχια. Σ' αυτά, σπάρθηκαν στις 17 Μαΐου 2012, 2 υβρίδια ηλιάνθου: Tristan και Sanay. Εφαρμόστηκαν 2 διαφορετικές μεταχειρίσεις άρδευσης: κανονική άρδευση (Wet) και ελλειμματική (Dry, 50%). Ο προγραμματισμός της άρδευσης έγινε με τη βοήθεια μετρήσεων του μέσου ημερήσιου ύψους εξάτμισης από Εξατμισήμετρο τύπου A ανά 10ήμερο. Το 80% του ύψους αυτού αντιστοιχούσε στη Wet μεταχείριση και το 40% στη Dry. Ο λόγος που προτιμήθηκε αυτή η μέθοδος προγραμματισμού ήταν γιατί άλλοι ερευνητές (Σακελλαρίου κ.ά, 2012) πέτυχαν αρκετά καλές αποδόσεις σε ελληνικές συνθήκες. Η σπορά πραγματοποιήθηκε με το χέρι σε 5 σειρές ανά τεμάχιο και σε αποστάσεις 75 cm μεταξύ των γραμμών και 20 cm επί της γραμμής. Η άρδευση έγινε με σύστημα στάγδην. Στον κεντρικό αγωγό (Φ 32mm) του δικτύου συνδέθηκαν 2 ηλεκτροβάννες για τη ρύθμιση της Wet και της Dry μεταχείρισης, ενώ για το δίκτυο εφαρμογής επιλέχθηκαν σταλακτηφόροι αγωγοί διαμέτρου 16mm με αυτορυθμιζόμενους σταλακτήρες παροχής 2,3 l/h ανά 33cm. Συνεπώς, προέκυψαν 2 μεταχειρίσεις άρδευσης για κάθε υβρίδιο. Το νερό, το οποίο εφαρμόστηκε κατά τη διάρκεια της υδατικής καταπόνησης ανέρχεται: για τη Wet μεταχείριση στα 495 mm (πλήρης άρδευση), ενώ για τη Dry μεταχείριση ήταν 247 mm (ελλειμματική άρδευση). Το έδαφος από πλευράς μηχανικής σύστασης μετά από δειγματοληψία και ανάλυση 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/m²), η σχετική υγρασία (2,0 m), RH(%), η ταχύτητα του ανέμου (2m), WS(m/s) και η θερμοκρασία του αέρα (1,5m), T_a (°C). Για το σκοπό αυτό εγκαταστάθηκε στην περιοχή αυτόματος μετεωρολογικός σταθμός που διέθετε τα απαραίτητα όργανα για τη μέτρηση των ανωτέρω παραμέτρων.

Προκειμένου να εκτιμηθεί η υδατική καταπόνηση που υφίστανται τα φυτά, θεωρήθηκε απαραίτητος ο προσδιορισμός δύο ορίων: του άνω ορίου, όπου επικρατεί παντελής έλλειψη εδαφικής υγρασίας και το φυτό δεν διαπνέει ($r_c \rightarrow \infty$) 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)

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

όπου r_a = αεροδυναμική αντίσταση στη μεταφορά υδρατμών (sec.m⁻¹) που προσδιορίζεται με τη σχέση των Thom and Oliver (1977), p = πυκνότητα αέρα και

Cp= θερμοχωρητικότητα του αέρα υπό σταθερή πίεση.

Το κάτω όριο προσδιορίστηκε με την εξίσωση (2) (Jackson, 1982)

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

όπου Δ= κλίση της σχέσης της τάσης υδρατμών στον κορεσμό με τη θερμοκρασία, γ= ψυχομετρική σταθερά, e_a = τάση υδρατμών στην ατμόσφαιρα, e_s = τάση υδρατμών σε κορεσμένη ατμόσφαιρα, σε θερμοκρασία T_a. Η διαφορά (e_s-e_a) παριστάνει το έλλειμμα κορεσμού της ατμόσφαιρας (VPD). Ο δείκτης υδατικής καταπόνησης (CWSI) ισούται με το λόγο της κάθετης απόστασης της διαφοράς θερμοκρασίας (T_c-T_a) από την οριογραμμή μέγιστης διαπνοής, προς την κάθετη απόσταση των δύο οριογραμμών, μέγιστης και μηδενικής διαπνοής αντίστοιχα, για την ίδια τιμή του (VPD) (Idso et al., 1981a, Jackson 1982). Έτσι, για τον προσδιορισμό του CWSI, λαμβάνονταν μετρήσεις της θερμοκρασίας του φυλλώματος (εξ' αποστάσεως, 15-20cm 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 λαμβάνονταν σε ένα αριθμό φυτών, σε φύλλα νεαρής ηλικίας, με τον ίδιο προσανατολισμό και την ίδια ώρα. Περιοδικά ανά 15 ημέρες, μετρήθηκε το ύψος των φυτών, και στη συνέχεια με καταστροφικές δειγματοληψίες μετρήθηκε ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας (LAI) και το ξηρό βάρος των φυτών, σε 3 φυτά ανά πειραματικό τεμάχιο. Οι δειγματοληψίες που παρακάτω χαρακτηρίζονται ως 1, 2, 3, 4 και 5 έγιναν αντίστοιχα 35, 49, 63, 77 και 92 ημέρες μετά τη σπορά. Στις 28/8/2012 (102 ημέρες μετά τη σπορά) έγινε η συγκομιδή κατά την οποία συγκομίστηκαν 9 φυτά ανά πειραματικό τεμάχιο στα οποία μετρήθηκαν η διάμετρος του βλαστού, το ξηρό βάρος της ταξιανθίας, το ολικό ξηρό βάρος του φυτού, το βάρος 1000 σπόρων και η περιεκτικότητα των σπόρων σε λάδι % w/w με τη μέθοδο της όξινης υδρόλυσης Soxhlet. Η στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων (ANOVA) έγινε με το πρόγραμμα JMP8 (Goopy and Creighton, 2007).

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Οι δύο οριογραμμές που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό του δείκτη υδατικής καταπόνησης (Crop Water Stress Index) και στις δύο μεταχειρίσεις, απεικονίζονται στο Σχήμα 1. Ο οριζόντιος άξονας αναφέρεται στο έλλειμμα κορεσμού (VPD), (δηλαδή e_s-e_a) και ο κάθετος άξονας αντιπροσωπεύει τη διαφορά θερμοκρασίας (T_c-T_a). Η κάτω οριογραμμή περιγράφεται από τη σχέση (3)

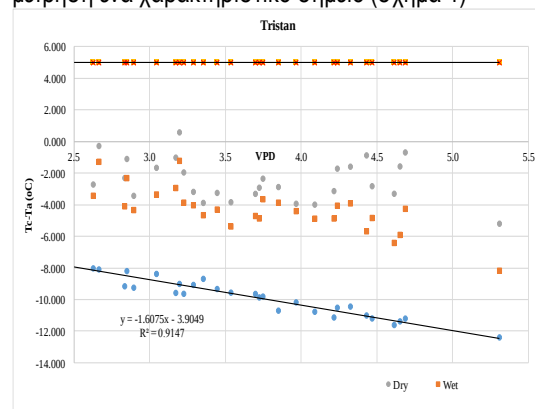
$$T_c - T_a = -1,6075 \cdot VPD - 3,9049, \quad (3)$$

(R²=0,915)

ενώ η άνω οριογραμμή από τη σχέση

$$T_c - T_a = 5,02 \cdot C.$$

Αντιστοιχίζοντας τις μετρήσεις της θερμοκρασίας του αέρα T_a (2,0m) και της θερμοκρασίας της φυλλικής επιφάνειας T_c στο διάγραμμα των οριογραμμών μηδενικής και μέγιστης υδατικής δοκιμασίας (και στις δύο μεταχειρίσεις, Wet-Dry) προκύπτει για κάθε μέτρηση ένα χαρακτηριστικό σημείο (σχήμα 1)



Σχήμα 1. Άνω και κάτω οριογραμμές για τον προσδιορισμό του CWSI για το υβρίδιο Tristan.

Έτσι, για το υβρίδιο Tristan (Wet μεταχείριση), (σχήμα 1) παρατηρήθηκε ότι, τα σημεία είναι μετατοπισμένα προς το κάτω όριο (οριογραμμή μέγιστης διαπνοής), γεγονός που υποδεικνύει ότι η χορηγούμενη ποσότητα νερού ήταν επαρκής για την κάλυψη των υδατικών αναγκών των φυτών σε νερό, και τα φυτά δεν υφίστανται την υδατική καταπόνηση τουλάχιστον όχι σε μεγάλο βαθμό.

Στη Dry μεταχείριση (σχήμα 1) τα περισσότερα σημεία είναι μετατοπισμένα προς το άνω όριο: ένδειξη της υδατικής καταπόνησης που υφίστανται τα φυτά, όταν η χορηγούμενη ποσότητα αρδευτικού νερού μειώνεται (κατά 50%). Με τη μείωση της ποσότητας αρδευτικού νερού τα φυτά υπόκεινται σε συνθήκες υδατικής καταπόνησης, λόγω των αυξημένων αναγκών τους σε νερό. Παρόμοιο διάγραμμα δημιουργήθηκε και για το υβρίδιο Sanay.

Στον πίνακα 1 που ακολουθεί παρουσιάζονται κάποια από τα αποτελέσματα της ANOVA για τα χαρακτηριστικά της παραγωγής των 2 υβριδίων. Συγκεκριμένα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα σύμφωνα με το στατιστικό κριτήριο F από το οποίο προκύπτει αν υπάρχουν στατιστικά σημαντικές διαφορές για τα εν λόγω χαρακτηριστικά (Prob>F).

Πίνακας 1. Στοιχεία αποτελεσμάτων ANOVA (Prob>F)

Πηγή	Διάμετρος Βλαστού	Ξηρό Βάρος Ταξιανθίας	Ολικό Ξηρό Βάρος	Βάρος 1000 σπόρων	Περιεκτικότητα σπόρων σε λάδι
Υβρίδιο (Tristan - Sanay)	0,7391	0,0001*	0,0087*	0,5666	0,0011*
Επέμβαση (Wet - Dry)	0,0077*	0,0141*	0,0107*	0,0095*	0,3242
Υβρίδιο x Επέμβαση	0,06385	0,0118*	0,0453*	0,01558	0,0004*

Σημ. * σημαίνει ότι υπάρχει στατιστικά σημαντική διαφορά σε επίπεδο σημαντικότητας 95%

Επειδή, όπως φαίνεται στον παραπάνω πίνακα, υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ υβριδίων και επέμβασης, για τα χαρακτηριστικά ξηρό βάρος ταξιανθίας, ολικό ξηρό βάρος φυτού και περιεκτικότητα σπόρων σε λάδι, έγινε σύγκριση των αντιστοιχών μέσων όρων και με τη μέθοδο της

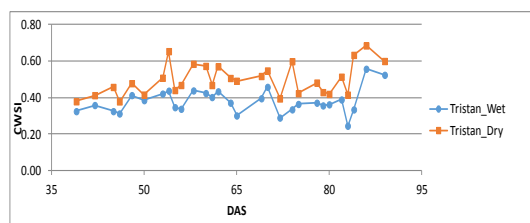
ελάχιστης σημαντικής διαφοράς, της οποίας τα αποτελέσματα δίνονται στον παρακάτω πίνακα 2.

Πίνακας 2. Αποτελέσματα σύγκρισης μέσων όρων με τη μέθοδο της ελάχιστης σημαντικής διαφοράς στις περιπτώσεις αλληλεπίδρασης.

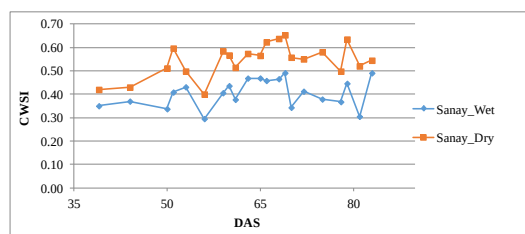
Μεταχείριση	Ξηρό Βάρος Ταξιανθίας (gr)	Ολικό Ξηρό Βάρος (gr)	Περιεκτικότητα σπόρων σε λάδι (% w/w)
Tristan Wet	135,82 a	230,27 a	42,20 bc
Tristan Dry	81,42 b	147,38 c	44,27 a
Sanay Wet	91,01 b	188,91 b	42,50 b
Sanay Dry	63,04 c	138,89 c	41,47 c

Σημ. Μεταχειρίσεις που δεν ακολουθούνται από το ίδιο γράμμα παρουσιάζουν σημαντική διαφορά.

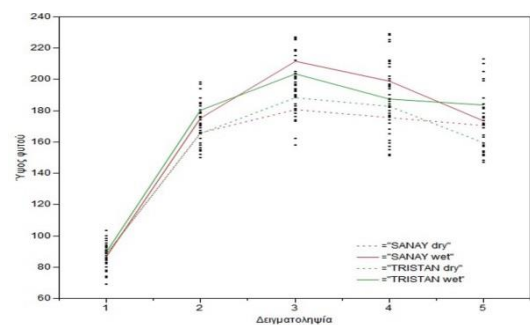
Στα σχήματα 2 και 3, παρουσιάζεται η μεταβολή του CWSI σε σχέση με τον αριθμό ημερών μετά τη σπορά (DAS) κατά τη διάρκεια των σταδίων ανάπτυξης της καλλιέργειας και για τις δύο υδατικές μεταχειρίσεις (Wet-Dry). Στα σχήματα 4, 5 και 6 παρουσιάζονται αντίστοιχα οι μεταβολές των χαρακτηριστικών: ύψος φυτού, LAI και ολικό ξηρό βάρος φυτού, όπως προσδιορίστηκαν από τις 5 δειγματοληψίες, για τα δύο υβρίδια και τις δύο μεταχειρίσεις άρδευσης.



Σχήμα 2. Μεταβολή του CWSI στο υβρίδιο Tristan.



Σχήμα 3. Μεταβολή του CWSI στο υβρίδιο Sanay.

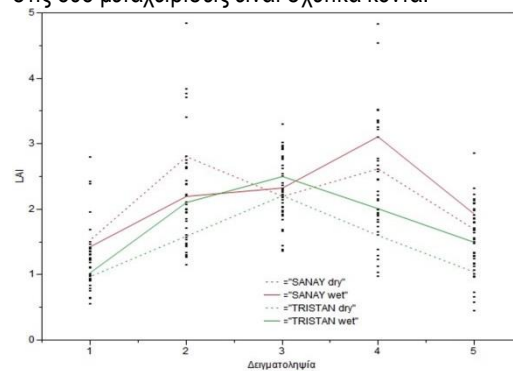


Σχήμα 4. Μεταβολή του ύψους φυτού (cm) κατά τις δειγματοληψίες

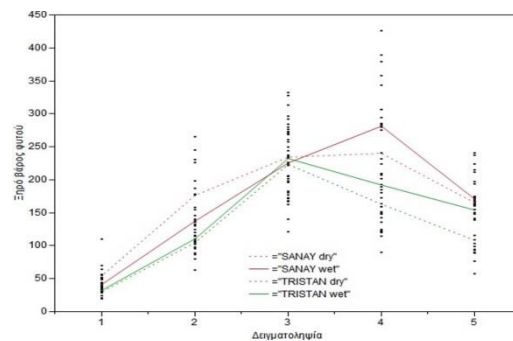
4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Παρατηρώντας τα πειραματικά σημεία στο σχήμα 1 είναι δυνατό να συμπεράνει κανείς ότι η υδατική καταπόνηση του υβριδίου Tristan στη Dry μεταχείριση δεν διέφερε πολύ από τη Wet

μεταχείριση, γεγονός που μπορεί να εξακριβωθεί και από το σχήμα 2 όπου οι τιμές που είχε ο CWSI και στις δύο μεταχειρίσεις είναι σχετικά κοντά.



Σχήμα 5. Μεταβολή του LAI κατά τις δειγματοληψίες .



Σχήμα 6. Μεταβολή του ξηρού βάρους φυτού (gr) κατά τις δειγματοληψίες.

Έτσι η μέση τιμή του CWSI για το υβρίδιο Tristan ήταν 0,38 για τη Wet μεταχείριση και 0,50 για τη Dry μεταχείριση. Οι αντίστοιχες τιμές του CWSI για το υβρίδιο Sanay (βλ. σχήμα 3) ήταν 0,41 για τη Wet μεταχείριση και 0,55 για τη Dry μεταχείριση, γεγονός που δείχνει ότι το υβρίδιο Sanay είναι πιο απαιτητικό σε νερό απ' ό,τι το Tristan. Βέβαια, όπως φαίνεται από τα σχήματα 2 και 3, ενώ για το υβρίδιο Tristan οι μικρές διαφορές στον CWSI για τις δύο μεταχειρίσεις διατηρούνται καθ' όλα τα στάδια της ανάπτυξης, στο υβρίδιο Sanay μεγαλύτερες διαφορές στον CWSI μεταξύ των δύο μεταχειρίσεων παρουσιάζονται στο στάδιο της άνθησης και διαμόρφωσης της παραγωγής (από DAS=50 και μετά). Συνοψίζοντας από πλευράς υδατικής καταπόνησης και για τα δύο υβρίδια μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα, ότι εφαρμόζοντας άρδευση με μεγάλη συχνότητα, πράγμα που επιτυγχάνεται με τη μέθοδο στάγδην άρδευσης καλύπτοντας ακόμη και τις μισές απαιτήσεις των φυτών σε νερό, δεν καταπονούνται ιδιαίτερα τα φυτά και μπορεί να εξοικονομηθεί νερό άρδευσης, με αποτέλεσμα να υπάρχει δυνατότητα εξυπηρέτησης μεγαλύτερης έκτασης. Από πλευράς χαρακτηριστικών της παραγωγής, σύμφωνα με τα στοιχεία του πίνακα 1 ως προς τη διάμετρο του βλαστού, δεν υπήρξε στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των υβριδίων, ενώ αντίθετα υπήρξε στατικά σημαντική διαφορά μεταξύ των μεταχειρίσεων. Ως προς το ξηρό βάρος ταξιανθίας καθώς και το ολικό ξηρό βάρος του

φυτού, υπήρξε στατιστικά σημαντική διαφορά τόσο ως προς τα υβρίδια, όσο και ως προς τη μεταχείριση, ενώ συγγόνως υπάρχει και αλληλεπίδραση μεταξύ υβριδίου και μεταχείρισης. Ως προς το βάρος 1000 σπόρων και κατά συνέπεια ως προς την παραγωγή, υπήρξε στατιστικά σημαντική διαφορά μόνο μεταξύ Wet και Dry μεταχείρισης και για τα δύο υβρίδια. Ως προς την περιεκτικότητα των σπόρων σε λάδι υπήρξε στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των υβριδίων ενώ υπάρχει και αλληλεπίδραση μεταξύ υβριδίων και μεταχειρίσεων. Έτσι μετά τη στατιστική επεξεργασία με τη μέθοδο της ελάχιστης σημαντικής διαφοράς και σύμφωνα με τα αναγραφόμενα στοιχεία του πίνακα 2 για τις περιπτώσεις ύπαρξης αλληλεπίδρασης μεταξύ υβριδίων και μεταχειρίσεων, προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα: Ως προς το ξηρό βάρος ταξιανθίας, υπάρχει σημαντική διαφορά των δύο υβριδίων τόσο στη Wet μεταχείριση, όσο και στη Dry. Επίσης υπάρχει σημαντική διαφορά και μεταξύ των μεταχειρίσεων τόσο για το υβρίδιο Tristan όσο και για το Sanay. Έτσι η σύγκριση των μέσων όρων για το χαρακτηριστικό αυτό, δείχνει ότι πιο ευαίσθητο υβρίδιο στην ελλειμματική άρδευση είναι το Tristan. Ως προς το ολικό ξηρό βάρος φυτού υπάρχει σημαντική διαφορά μεταξύ Wet και Dry μεταχείρισης και για τα δύο υβρίδια αντίστοιχα. Δεν υπάρχει σημαντική διαφορά μεταξύ των Dry μεταχειρίσεων για τα δύο υβρίδια, ενώ υπάρχει σημαντική διαφορά μεταξύ των Wet μεταχειρίσεων. Και πάλι η σύγκριση των μέσων όρων έδειξε ότι πιο ευαίσθητο στην εφαρμογή ελλειμματικής άρδευσης είναι το υβρίδιο Tristan. Ως προς την περιεκτικότητα των σπόρων σε λάδι, και κατ' επέκτασιν για τη δυνατότητα χρήσης του σπόρου για παραγωγή βιοκαυσίμου, υπάρχει σημαντική διαφορά μεταξύ των μεταχειρίσεων τόσο για το υβρίδιο Tristan, όσο και για το Sanay, καθώς και μεταξύ των δύο υβριδίων για την ίδια μεταχείριση. Η αλληλεπίδραση όμως που παρατηρήθηκε στην περίπτωση της περιεκτικότητας του σπόρου σε λάδι έδειξε ότι είναι αλληλεπίδραση κατεύθυνσης. Έτσι, κατά τη σύγκριση, στη μεν περίπτωση του υβριδίου Sanay η περιεκτικότητα του σπόρου σε λάδι μειώθηκε με την εφαρμογή ελλειμματικής άρδευσης, ενώ στην περίπτωση του υβριδίου Tristan, αυξήθηκε και μάλιστα σημαντικά.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Αργυροκαστρίτης Ι., Σ. Φραγκίστα, Χ. Βαμβακούλας, Θ. Δαμιανίδης, Σ. Αλεξανδρής και Π. Παπαστυλιανού, 2009. Μεταβολή του δείκτη υδατικής καταπόνησης δύο ποικιλιών ηλιάνθου υπό συνθήκες ελλειμματικής άρδευσης. Πρακτικά 6^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου Εταιρείας Γεωργικών Μηχανικών Ελλάδος, Θεσσαλονίκη σ. 107-114.
- Fadi Karam, Rafic Lahoud, Randa Masaad, Rabih Kabalan, Joelle Breidi, Claude Chalita, Youssef Rouphael, 2007. Evapotranspiration, seed yield and water use efficiency of drip irrigated sunflower under full and deficit irrigation conditions. *Agricultural Water Management* 90:213-223.
- Goopy J. and L. Creighton (2007) Introduction to Design of Experiments with JMP® Examples, Third Edition, Copyright © 2007, SAS Institute Inc., Cary, NC, USA, pp. 468
- Howell T.A., J. L. Hatfield, H. Yamada, and K.R. Davis, 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, 1981 a. 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, 1981 b. Measuring yield - plant water potential depressions in alfalfa by means of Infrared thermometry. *Agron.J.* 73: 826.
- Jackson, R.D., and S.B. Idso, 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*.
- O'Toole J.C., N.C. Turner, O.P. Nainuco, M. Dingkuhn, and K.A. Gomez, 1984. Comparison of some crop water stress measurement methods. *Crop Sci.* 24: 1121-1128.
- Pinter P.J.Jr. and R.J. Reginato, 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 J. Howe. 1985. Irrigation scheduling using crop indicators. *J. Irrig. Drain. Eng.* 3:125-133.
- Reginato R.J., and D.J. Garrot 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.
- Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη Μ., Χ. Τζιμόπουλος, Χ. Νάκας, Ε. Καρατάσιου, Χ. Παπανικολάου, 2012. Συγκριτική ανάλυση αυτοματοποιημένων μεθόδων άρδευσης. Πρακτικά 2ου Κοινού Συνεδρίου ΕΥΕ-ΕΕΔΥΠ, Πάτρα, Οκτώβριος 2012, 791-801
- Steduto P., T. Hsiao, E. Fereres, D. Raes (2012). Yield Response to Water, *FAO Irrigation and Drainage paper No 66*, Rome, Italy, pp 500.
- Thom, A.S. and H.R. Oliver 1977. On Penman's equation for estimating regional Evaporation. *Q.J. Roy. Met. Soc.* 103: 345-357.
- Wanjura D.F., J.L. Hatfield and D.R. Upchurch, 1990. Crop water stress index relationship with crop productivity. *Irrig. Sci.* 11:93-99.

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΙΜΩΝ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΣΤΟΝ ΚΟΡΕΣΜΟ ΑΔΙΑΤΑΡΑΚΤΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΤΑΡΑΓΜΕΝΩΝ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΣΕ ΔΥΟ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΑΡΔΕΥΣΗΣ (ΝΕΡΟ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΜΕΝΗ ΕΚΡΟΗ ΤΡΙΤΟΒΑΘΜΙΟΥ ΒΙΟΛΟΓΙΚΟΥ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ)

Γεώργιος Μπουραζάνης¹, Ελένη Χαριτίδου², Ιωάννης Αργυροκαστρίτης³, Πέτρος Κερκίδης⁴

¹Δ/ση Αγροτικής Οικονομίας & Κτηνιατρικής, Περιφερειακή Ενότητα Λακωνίας, Περιφέρεια Πελοποννήσου, 20 χλμ. Ε.Ο. Σπάρτης Γυθείου, 23100 Σπάρτη,

^{2,3,4}Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Ιερά Οδός 75, 18500 Αθήνα

gbourazanis@windtools.gr, eleni-gl@hotmail.com, jarg@aia.gr, kerkides@aia.gr

Στην Ελλάδα η μετατροπή ξηρικών καλλιεργειών σε αρδεύόμενες και η επέκταση της καλλιέργειας, κυρίως της ελιάς, ωθεί τους παραγωγούς σε διάνοιξη βαθύτερων γεωτρήσεων, με αύξηση του κόστους εξόρυξης και του κόστους εγκατάστασης και λειτουργίας του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού. Την ίδια στιγμή, η υπερεκμετάλλευση των υδροφόρων στρωμάτων προξενεί την είσοδο θαλασσινού νερού σε παραθαλάσσια υδροφόρα στρώματα. Υπ' αυτές τις συνθήκες, προβάλλει ως ελκυστική λύση η επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων υγρών αστικών αποβλήτων (ΕΥΑΑ) για άρδευση, στην προσπάθεια βελτίωσης του υδατικού ισοζυγίου, σε επίπεδο υδρολογικών λεκανών. Το Ελληνικό Κράτος, εξέδωσε την ΚΥΑ 145119/2011 (ΦΕΚ 354 Β'/8-3-11) «Καθορισμός μέτρων, όρων και διαδικασιών για την επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων και άλλες διατάξεις» Στο πλαίσιο αυτό, σε αγρό ελαιοκαλλιέργειας πέντε στρεμμάτων, σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε πείραμα αρδεύσεως διετούς διάρκειας, με δύο επεμβάσεις: Στη μία επέμβαση έγινε άρδευση με καλής ποιότητας αρδευτικό νερό από γεώτρηση, ενώ στην άλλη έγινε άρδευση με εκροή τριτοβάθμιου βιολογικού καθαρισμού υγρών αστικών αποβλήτων. Μετά το πέρας της διετίας, έγινε δειγματοληψία αδιατάρακτων επιφανειακών δειγμάτων και προσδιορίστηκε η υδραυλική αγωγιμότητα στον κορεσμό ($K_{s,undisturbed}$). Περαιτέρω, τα δείγματα αυτά αεροξηράνθηκαν και κοσκινίστηκαν, για να ληφθούν τα μικρότερης διαμέτρου εδαφικά τεμαχίδια, τα οποία ξαναπακεταρίστηκαν με την ίδια φαινόμενη πυκνότητα (ρ_p) με τα αντίστοιχα αδιατάρακτα δείγματα και επαναλήφθηκε ο προσδιορισμός της $K_{s,disturbed}$. Στην παρούσα ανακοίνωση, υλοποιήθηκαν συγκρίσεις που ανέδειξαν διαφορές μεταξύ των K_s , τόσο των αδιατάρακτων, όσο και των διαταραγμένων δειγμάτων, που αρδεύτηκαν με νερό έναντι αυτών που αρδεύτηκαν με επεξεργασμένο απόβλητο.

Λέξεις κλειδιά: Άρδευση, επεξεργασμένα υγρά αστικά απόβλητα, υδραυλική αγωγιμότητα στον κορεσμό

COMPARING SATURATED HYDRAULIC CONDUCTIVITY DETERMINED FOR UNDISTURBED AND REPACKED SURFACE SOIL SAMPLES IN TWO IRRIGATION APPLICATIONS (WATER AND TERTIARY TREATED MUNICIPAL WASTEWATER EFFLUENT)

George Bourazanis¹, Helen Haritidou², Ioannis Argyrokastritis³, Petros Kerkides⁴

¹ Department of Rural Economy and Veterinary of Regional Government of Laconia, Sparta, Laconia, 23100, Greece

^{2,3,4} Laboratory of Agricultural Hydraulics, Department of Natural Resources development and Agricultural Engineering University of Athens, 11855, Athens, Greece

gbourazanis@windtools.gr, eleni-gl@hotmail.com, jarg@aia.gr, kerkides@aia.gr

In Greece the conversion of rain fed crops in irrigated and the extension of cultivation, mainly olive trees make producers mining deep drilling, increasing both the extraction cost, and the cost of installation and operation of electromechanical equipment. At the same time, the overexploitation of groundwater causes intrusion of sea water into the coastal aquifers. In this scene, emerges as an attractive solution the reuse of treated municipal wastewater (TMWW) for irrigation in an effort to improve the water balance at catchment areas. The Greek State legislated the 145119/2011 (Government Gazette 354 B/8-3-2011) Joint Ministerial Decision titled "For measures, procedures and processes for the reuse of treated wastewater and other provisions". In this context in a five acres olive orchard designed and implemented irrigation experiment with two applications for two years. The first application was irrigated with good quality irrigation water from a drilling, while the second was irrigated with TMWW. After two years, surface undisturbed soil cores were sampled and the hydraulic conductivity at saturation was determined. ($K_{s,undisturbed}$). Furthermore these samples airdried sieved ($d < 2\text{mm}$) and repacked with the same bulk density (ρ_p) as the undisturbed respectively. After this we also determined the hydraulic conductivity at saturation for the disturbed and repacked soil cores ($K_{s,disturbed}$). In this paper, comparisons are made and differences between K_s of both undisturbed, and disturbed samples revealed, which were irrigated with water versus those irrigated with treated effluent.

Key Words: Irrigation, treated municipal waste water, saturated hydraulic conductivity

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η υδραυλική αγωγιμότητα στον κορεσμό είναι μείζονος σημασίας ιδιότητα κατά τον προγραμματισμό των αρδεύσεων, δεδομένου ότι μέσω αυτής προσδιορίζεται η μέγιστη παροχή του μέσου εφαρμογής του νερού στον αγρό (τοπικές αρδεύσεις, τεχνητή βροχή) ή λαμβάνεται υπ' όψιν στον προσδιορισμό των διαστάσεων των λεκανών των λωρίδων και των αυλακιών στις επιφανειακές μεθόδους άρδευσης.

Η προσθήκη αλάτων νατρίου μέσω της άρδευσης με ΕΥΑΑ παίζει σημαντικό ρόλο στην μεταβολή της υδραυλικής αγωγιμότητας και η επίδρασή τους περιορίζεται στα πρώτα εκατοστά του εδάφους (Πανώρας και Ηλίας 1999). Εν γένει στην υδραυλική αγωγιμότητα στον κορεσμό επιδρούν με διαφορετικούς μηχανισμούς η ποσότητα η αναλογία και το είδος των αλάτων, η οργανική ουσία αλλά και τα αιωρούμενα στερεά που περιέχονται στα ΕΥΑΑ (Levy and Assouline 2011). Η επίδραση αυτή γίνεται εμφανής τόσο κατά τη διάρκεια της αρδευτικής περιόδου όσο και κατά τη διάρκεια της επερχόμενης περιόδου βροχοπτώσεων (Levy and Assouline 2011). Μεγάλης σημασίας είναι ο βαθμός επεξεργασίας καθώς και η μέθοδος χορήγησης του νερού (Πανώρας και Ηλίας 1999).

Στα ΕΥΑΑ που χρησιμοποιήθηκαν για άρδευση διενεργήθηκαν όλες οι από το νόμο προβλεπόμενες αναλύσεις για κάθε γεγονός άρδευσης. Βάσει των αποτελεσμάτων των αναλύσεων και της κείμενης νομοθεσίας τα ΕΥΑΑ χαρακτηρίζονταν ως μηδαμινού ή μικρού έως μέτριου κινδύνου για την μεταβολή της διηθητικότητας (ΚΥΑ 145119/2011 Παράρτημα ΙΙΙ Πίνακας 5) χαρακτηρισμός που εξάγεται από την συσχέτιση τιμών του λόγου προσροφημένου νατρίου (SAR) και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC).

Μετά από δύο αρδευτικές περιόδους έγινε δειγματοληψία επιφανειακών αδιατάρακτων εδαφικών δειγμάτων στα οποία προσδιορίστηκε η υδραυλική αγωγιμότητα στον κορεσμό ($K_{sundisturbed}$). Ακολούθως τα δείγματα αυτά αεροξηράνθηκαν και

ξαναπακεταρίστηκαν με την ίδια φαινόμενη πυκνότητα (ρ_ϕ) των αδιατάρακτων δειγμάτων αντιστοίχως και έγινε εκ νέου προσδιορισμός της υδραυλικής αγωγιμότητας στον κορεσμό $K_{sdisturbed}$. Το χρησιμοποιηθέν υγρό ήταν απεσταγμένο νερό, το οποίο χρησιμοποιείται σε εργαστηριακά πειράματα προσδιορισμού της υδραυλικής αγωγιμότητας στον κορεσμό, επί εδαφικών δειγμάτων, προσομοιάζοντας την επίδραση της βροχόπτωσης μετά την αρδευτική περίοδο (Levy and Assouline 2011).

Στόχος είναι να διαπιστωθεί αν προκύπτουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας των δειγμάτων, που αρδεύτηκαν με νερό και εκείνων που αρδεύτηκαν με ΕΥΑΑ, και συνεπώς να εξαχθούν συμπεράσματα για το ποια θα είναι η επίδραση της βροχόπτωσης στην ακολουθούσα χειμερινή περίοδο.

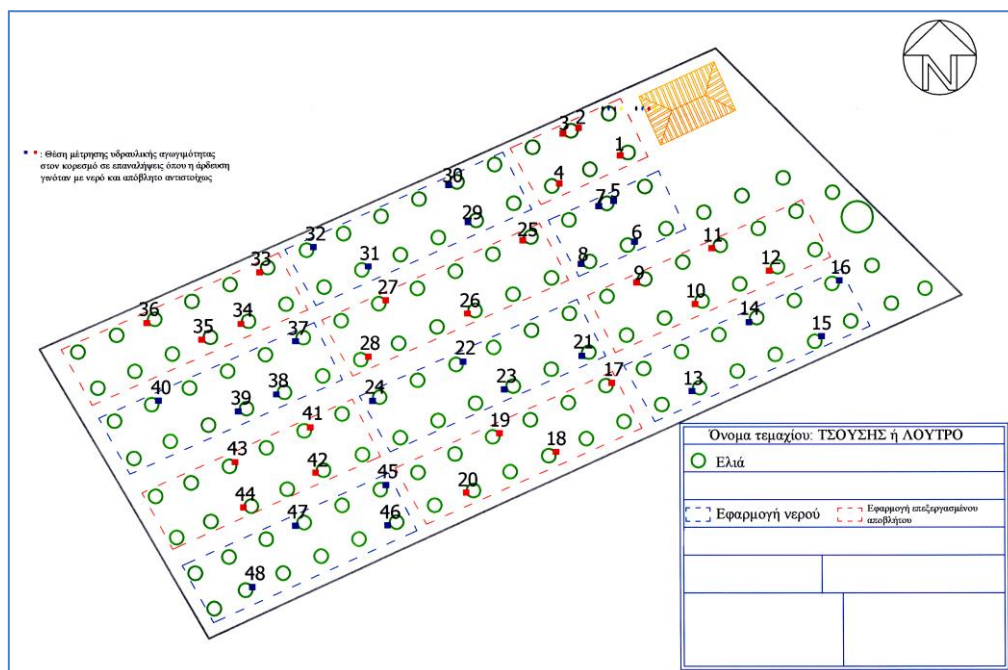
2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1. Πειραματικός Αγρός

Νοτίως της Σπάρτης σε αρδευόμενο ελαιοτεμάχιο 5 στρεμμάτων εγκαταστάθηκε πειραματικός αγρός.



Εικόνα 9. Ελαιοτεμάχιο στο οποίο εγκαταστάθηκε το πείραμα



Εικόνα 10. Σχέδιο του πειραματικού αγρού με τις επαναλήψεις των δύο εφαρμογών καθώς και τα σημεία δειγματοληψίας

Αφού μελετήθηκαν οι πιθανές πηγές παραλλακτικότητας, έγινε επιλογή της χωροθέτησης των επαναλήψεων των δύο εφαρμογών και έτσι αποφασίστηκαν έξι επαναλήψεις για κάθε εφαρμογή. Κάθε επανάληψη περιελάμβανε δώδεκα ελιές. (Εικόνα 2)

Η άρδευση γινόταν με δύο καταιονιστήρες ανά ελαιόδενδρο παροχής 90 lt/h ο καθένας.

2.2. Δειγματοληψία

Τα δείγματα ελήφθησαν από τα σημεία που εμφανίζονται στην Εικόνα 2 (κόκκινα στίγματα-απόβλητο και μπλε στίγματα-νερό) και εντός του κύκλου διαβροχής του καταιονιστήρα. Για την λήψη των αδιατάρακτων εδαφικών δειγμάτων χρησιμοποιήθηκαν τεμάχια μεταλλικών κυλίνδρων πολύ λεπτού τοιχώματος ύψους 15 cm και διαμέτρου 7,6 cm. Αυτά εισάγονταν με πίεση εντός του εδάφους ώστε να ληφθεί ένα εδαφικό δείγμα ύψους περίπου 10 cm. Η αφαίρεσή του δειγματολήπτη γινόταν με σκάψιμο περιφερειακά της σωληνώσεως, μέχρι του κατώτερου σημείου της και ακολούθως τομή του εδάφους στη βάση του δειγματολήπτη με ένα μαχαίρι. Ελήφθησαν τέσσερα δείγματα ανά επανάληψη ήτοι 24 δείγματα ανά εφαρμογή.

2.3. Προσδιορισμός της Υδραυλικής Αγωγιμότητας στον Κορεσμό

Για τον προσδιορισμό της υδραυλικής αγωγιμότητας στον κορεσμό χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του σταθερού φορτίου (Klute 2006) με χρήση αποσταγμένου νερού.

Στο κάτω μέρος των δειγμάτων τοποθετήθηκε ύφασμα μαζί με λεπτή σήτα και δέθηκαν πάνω στην μεταλλική σωλήνα με σφικτήρα.



Εικόνα 11. Παρουσίαση τοποθέτησης υφάσματος και σήτας στην βάση της σωλήνας με σφικτήρα

Ακολούθησε κορεσμός από κάτω των δειγμάτων και διατήρηση σταθερής στάθμης ύψους Η με τη χρήση σωλήνα Mariotte.



Εικόνα 12. Κορεσμός δειγμάτων

Επειδή η στάθμη αυτή μπορεί να έχει ένα μέγιστο (τη στιγμή που τελειώνει η προσθήκη νερού από το Mariotte στο δείγμα) και ένα ελάχιστο (τη στιγμή πριν προστεθεί νερό από το Mariotte στο δείγμα) παίρνουμε ως Η το μέσο όρο των δύο τιμών. Καλό είναι κατά την κατασκευή του Mariotte αυτό να προσεχθεί, ώστε να μην απέχουν αυτές οι τιμές μεταξύ τους. Στη συνέχεια και ανά τακτά διαστήματα μετρούμε τον όγκο του νερού, που εξέρχεται από τη

βάση του δείγματος. Προσδιορίζουμε την K_s ως ακολούθως:

Με βάση τις μετρήσεις του όγκου του εξερχόμενου νερού, έχουμε

$$u_z = \frac{4V(t)}{\pi d^2 t} \quad (1)$$

και με βάση το νόμο του Darcy

$$u_z = K_s \frac{H+L}{L} \quad (2)$$

Από τις (1) και (2) έχουμε:

$$K_s = \frac{4V(t)L}{\pi d^2 t(H+L)} \quad (3)$$

Όπου:

d	Διάμετρος Δείγματος
L	Ύψος Δείγματος
H	Ύψος στάθμης νερού
V(t)	Όγκος νερού που διέρχεται από το δείγμα στο χρόνο
S	Εμβαδόν διατομής δείγματος
k_s	Υδραυλική αγωγιμότητα στον κορεσμό

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1. Πειραματικά αποτελέσματα

Οι δύο επεμβάσεις τοποθετήθηκαν στα πειραματικά τεμάχια σύμφωνα με το σχέδιο των Τυχαιοποιημένων Πλήρων Ομάδων. Η ομαδοποίηση έγινε για να απομακρυνθεί τυχόν παραλλακτικότητα που οφείλεται στην ανομοιομορφία του εδάφους και δημιουργήθηκαν έξι ομάδες. Μετά τη διενέργεια των πειραμάτων προσδιορισμού της K_s καταλήξαμε στον ακόλουθο πίνακα τιμών υδραυλικής αγωγιμότητας τόσο για τα αδιατάρακτα δείγματα, όσο και για τα διαταραγμένα και ξαναπακεταρισμένα.

Πίνακας 8. Τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας στον κορεσμό

α/α Δείγματος	Εφαρμογή ²	$K_{sDisturbed}$ (cm/min)	$K_{sUndisturbed}$ (cm/min)
1	A	2.38	53.31
2	A	3.72	5.54
3	A	2.37	81.71
4	A	6.00	50.10
5	N	2.05	2.29
6	N	3.81	12.02
7	N	1.37	42.16
8	N	3.83	12.18
9	A	4.19	1.18
10	A	5.53	27.51
11	A	4.55	1.16
12	A	2.43	0.78
13	N	7.93	22.57
14	N	2.50	1.65
15	N	1.19	6.98
16	N	2.59	5.73
17	A	7.98	33.08
18	A	3.66	12.13
19	A	4.05	1.85
20	A	7.61	5.78
21	N	1.45	26.62
22	N	1.72	7.39
23	N	2.19	3.96
24	N	1.08	11.73
25	A	3.74	25.92
26	A	2.77	9.46
27	A	3.20	49.20
28	A	2.00	12.98
29	N	0.97	81.49
30	N	0.93	91.54
31	N	2.31	54.05
32	N	6.96	88.87
33	A	4.46	67.75
34	A	5.97	71.82
35	A	5.56	30.14
36	A	4.04	55.07
37	N	3.18	101.42
38	N	3.34	105.48
39	N	1.34	100.04

2 A: Απόβλητο και N: Νερό

40	N	1.83	24.03
41	A	2.94	75.52
42	A	9.22	70.19
43	A	4.86	59.63
44	A	11.61	39.18
45	N	1.44	45.77
46	N	2.23	47.75
47	N	2.28	110.80
48	N	2.44	108.03

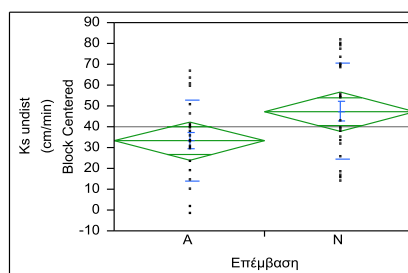
Στα πιο πάνω στοιχεία πραγματοποιήθηκε στατιστική επεξεργασία, με χρήση του λογισμικού JMP, όπως περιγράφεται διεξοδικά στο εγχειρίδιο (Συμιλλίδης 2010). Αρχικά έγινε έλεγχος της κανονικότητας των δεδομένων με τη δοκιμασία Shapiro-Wilk (Shapiro and Wilk 1965, Συμιλλίδης 2010) και έλεγχος της ομοσκεδαστικότητας (ομοιογένειας διακυμάνσεων) των επεμβάσεων με τη δοκιμασία Levene (Levene, 1960, Συμιλλίδης 2010). Για την απομάκρυνση των ακραίων τιμών χρησιμοποιήθηκε η δοκιμασία του Dixon (Dixon, 1950, Dixon, 1951, Rorabacher, 1991, Συμιλλίδης 2010).

3.1.1 Επεξεργασία τιμών υδραυλικής αγωγιμότητας αδιατάρακτων δειγμάτων $K_{sundisturbed}$

Από την Ανάλυση Διασποράς στα αδιατάρακτα εδαφικά δείγματα τα πειραματικά τεμάχια που δέχτηκαν άρδευση με καθαρό νερό είχαν στατιστικά σημαντικά μεγαλύτερη μέση τιμή υδραυλικής αγωγιμότητας στον κορεσμό $K_{sundisturbed\ water} = 47,3$ cm/min (Πίνακας 4) σε σχέση με τα πειραματικά τεμάχια που δέχτηκαν άρδευση με ΕΥΑΑ με μέση τιμή $K_{sundisturbed\ Wastewater} 33,2$ cm/min. (Πίνακας 4)

Πίνακας 9. Στατιστική ανάλυση των πειραματικών δεδομένων για τα αδιατάρακτα δείγματα

R^2	0.61
$R^2\ Adj$	0.56
Τυπική Απόκλιση	22.59
Μέσος Όρος Πειράματος	40.26
Αριθμός Παρατηρήσεων	48
CV %	55.8



Διάγραμμα 7. Παρουσίαση της στατιστικής ανάλυσης των πειραματικών δεδομένων για τα αδιατάρακτα δείγματα

Διαπιστώνουμε ότι στα αδιατάρακτα εδαφικά δείγματα, χρησιμοποιώντας το σχέδιο των Τυχαιοποιημένων Πλήρων Ομάδων, το μοντέλο ερμήνευσε το 61% (Συντελεστής προσδιορισμού R^2) της παραλλακτικότητας ενώ ο συντελεστής παραλλακτικότητας (CV) είναι 55.8% (Πίνακας 2).

Πίνακας 10. Ανάλυση Διασποράς

Πηγή Παραλλακτικότητας	BE	Άθροισμα τετραγώνων	Μέσο Τετράγωνο	F Ratio	Prob > F
Επέμβαση	1	2411,73	2411,73	4,7258	0,0355*
Ομάδα	5	31670,97	6334,19	12,411	<,0001*
Υπόλοιπο	41	20923,74	510,34		
Σύνολο	47	55006,44			

Από την δοκιμασία του F (Πίνακας 3) παρατηρούμε ότι υπάρχουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των δύο επεμβάσεων αφού $F=0.0355<0.05$ (5%: επίπεδο σημαντικότητας).

Πίνακας 11. Μέσοι όροι των επεμβάσεων

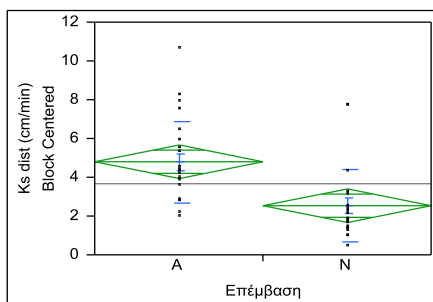
Επέμβαση	Παρατηρήσεις	M.O.	Τυπική Απόκλιση	Τυπικό σφάλμα
A	24	33,1783	19,5602	3,9927
N	24	47,3550	22,9593	4,6865

3.1.2 Επεξεργασία τιμών υδραυλικής αγωγιμότητας διαταραγμένων δειγμάτων $K_{s\text{disturbed}}$

Από την Ανάλυση Διασποράς στα διαταραγμένα εδαφικά δείγματα τα πειραματικά τεμάχια που δέχτηκαν άρδευση με ΕΥΑΑ είχαν αντιθέτως από τα αδιατάρακτα στατιστικά σημαντικά μεγαλύτερη μέση τιμή υδραυλικής αγωγιμότητας στον κορεσμό $K_{s\text{disturbed wastewater}} = 4,78 \text{ cm/min}$ (Πίνακας 7) σε σχέση με τα πειραματικά τεμάχια που δέχτηκαν άρδευση με νερό με μέση τιμή $K_{s\text{disturbed water}} 2,45 \text{ cm/min}$ (Πίνακας 7).

Πίνακας 12. Στατιστική ανάλυση των πειραματικών δεδομένων για τα διαταραγμένα δείγματα

R2	0,29
R2 Adj	0,19
Τυπική Απόκλιση	2,11
Μέσος Όρος Πειράματος	3,66
Αριθμός Παρατηρήσεων	48
CV %	57,63



Διάγραμμα 8. Παρουσίαση της στατιστικής ανάλυσης των πειραματικών δεδομένων για τα διαταραγμένα δείγματα

Διαπιστώνουμε ότι στα διαταραγμένα εδαφικά δείγματα, χρησιμοποιώντας το σχέδιο των Τυχαιοποιημένων Πλήρων Ομάδων, το μοντέλο ερμήνευσε το 29% (Συντελεστής προσδιορισμού R^2) της παραλλακτικότητας ενώ ο συντελεστής παραλλακτικότητας (CV) είναι 57.63% (Πίνακας 5).

Πίνακας 13. Ανάλυση Διασποράς

Πηγή Παραλλακτικότητας	BE	Άθροισμα τετραγώνων	Μέσο Τετράγωνο	F Ratio	Prob > F
Επέμβαση	1	60,48	60,48	13,58	0,0007*
Ομάδα	5	14,75	2,95	0,66	0,6541

Υπόλοιπο	41	182,63	4,45
Σύνολο	47	257,86	

Από την δοκιμασία του F (Πίνακας 6) παρατηρούμε ότι υπάρχουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των δύο επεμβάσεων αφού $F=0.0007<0.05$ (5%: επίπεδο σημαντικότητας).

Πίνακας 14. Μέσοι όροι των επεμβάσεων

Επέμβαση	Παρατηρήσεις	M.O.	Τυπική Απόκλιση	Τυπικό σφάλμα
A	24	4,78500	2,10218	0,42910
N	24	2,54000	1,87653	0,38304

4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα τέτοιου είδους εργαστηριακών πειραμάτων ποικίλλουν, ανάλογα με την κοκκομετρία και λοιπές συνθήκες που επικρατούν στο έδαφος. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι δεν παρατηρείται διαφορά στην υδραυλική αγωγιμότητα στον κορεσμό μεταξύ δειγμάτων που αρδεύτηκαν με καθαρό νερό και δειγμάτων που αρδεύτηκαν με ΕΥΑΑ και ελήφθησαν τόσο από καλλιεργούμενη όσο και από ακαλλιεργητή περιοχή αμμοπηλιδώδους συστάσεως. Αντιθέτως σε παρόμοια σύγκριση δειγμάτων αργιλωδούς εδάφους παρατηρήθηκε σημαντική μείωση της υδραυλικής αγωγιμότητας στον κορεσμό (Levy and Assouline 2011).

Από τη στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων διαπιστώθηκε ότι η άρδευση με ΕΥΑΑ είχε επίδραση στην υδραυλική αγωγιμότητα στον κορεσμό η οποία με την επίδραση βροχόπτωσης μειώνεται. Αυτό σημαίνει ότι στον αγρό κατά την περίοδο βροχοπτώσεων που ακολουθεί την αρδευτική περίοδο η βροχόπτωση θα επιδράσει επί του επιφανειακού στρώματος μειώνοντας την υδραυλική αγωγιμότητα. Συνέπεια αυτού θα είναι σε γεγονότα ραγδαίων βροχοπτώσεων να παρατηρείται περίσσεια νερού στην επιφάνεια του εδάφους και απορροή.

Ακολούθως στα ξαναπακεταρισμένα εδάφη για τα οποία θα μπορούσε να ειπωθεί ότι παραπέμπουν σε καλλιεργημένο έδαφος παρατηρήθηκε η αντίστροφη επίδραση, δηλαδή τα δείγματα που προέκυψαν από εδάφη που είχαν αρδευτεί με νερό είχαν μικρότερη υδραυλική αγωγιμότητα στον κορεσμό από ότι τα δείγματα που προέκυψαν από εδάφη που αρδεύτηκαν με ΕΥΑΑ.

Περαιτέρω πρέπει να διερευνηθεί και να διαπιστωθεί ποιοι είναι οι παράγοντες που ευθύνονται για την συμπεριφορά της K_s όπως έχει καταδειχθεί στην προκαταρκτική αυτή εργασία.

Ευχαριστίες

Στο ΥΑΑ&T καθώς και στην Ν.Α. Λακωνίας για την συγχρηματοδότηση του έργου.

Επίσης στο μέλος του Εργαστηρίου Βελτίωσης Φυτών & Γεωργικού Πειραματισμού Λέκτορα κο Συμιλλίδη Γεράσιμο καθώς στον κο Κατσιλέρο Αναστάσιο ΕΤΕΠ του ιδίου Εργαστηρίου για τη συνδρομή τους, στη στατιστική επεξεργασία των δεδομένων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ΚΥΑ 145119/2011 (ΦΕΚ 354 Β'8-3-11)
«Καθορισμός μέτρων, όρων και διαδικασιών για την επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων και άλλες διατάξεις»
- Πανώρας Α , Ηλίας Α. 1999, ;Άρδευση με επεξεργασμένα Υγρά Αστικά Απόβλητα Θεσσαλονίκη, σελ. 57-61
- Συμιλλίδης Γ. (2010). Έρευνα – Πειραματισμός, Εγχειρίδιο εφαρμογών στις γεωπονικές και λοιπές βιολογικές επιστήμες. Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Γ.Π.Α. σελ 98 και 107.
- Dixon, W.J. (1950). Analysis of extreme values. Ann. Math. Stat. 21, 4, 488-506.
- Dixon, W.J. (1951). Ratios involving extreme values. Ann. Math. Stat. 22, 1, 68-78.
- Klute A. (2006). Water retention: Laboratory methods in Klute A. (editor) Methods of Soil Analysis Part 1- Physical and Mineralogical Methods, 2nd Ed., SSSA Book Series 5 pp.694-700
- Levene, H. (1960). Robust testes for equality of variances. In Contributions to Probability and

- Statistics (I. Olkin, ed.) 278–292. Stanford Univ. Press, Palo Alto, CA.
- Levy G. J., and Assouline S. 2011, Physical aspects in Levy G. J., Fine P., and Bar-Tal A. (editors) Treated Wastewater in Agriculture, Use and impacts on the Soil Environment and Crops, Willey-Blackwell, pp306-322
- Levy G. J., Goldstein D., and Mamedov I. A. (2005). Saturated Hydraulic Conductivity of Semiarid Soils: Combined Effects of Salinity, Sodcity, and Rate of Wetting., Soil Science Society of America Journal 69, 653-662
- Rorabacher, D.B. (1991). Statistical Treatment for Rejection of Deviant Values: Critical Values of Dixon Q Parameter and Related Subrange Ratios at the 95 percent Confidence Level. Anal. Chem. 83, 2, 139-146.
- Shapiro S.S. and Wilk M.B. (1965). An analysis of variance test for normality (complete samples), Biometrika 52 (3-4): 591–611.

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΑΔΙΑΤΑΡΑΚΤΩΝ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ ΑΠΟ ΚΥΤΤΑΡΑ ΠΙΕΣΗΣ ΚΑΙ ΜΕ ΠΕΔΟΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ

Γεώργιος Μπουραζάνης¹, Μαργαρίτα Τσανικλίδου², Ιωάννης Αργυροκαστρίτης³, Πέτρος Κερκίδης⁴

¹ Δ/ση Αγροτικής Οικονομίας & Κτηνιατρικής, Περιφερειακή Ενότητα Λακωνίας, Περιφέρεια Πελοποννήσου, 20 χλμ. Ε.Ο. Σπάρτης Γυθείου, 23100 Σπάρτη,

^{2,3,4} Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Ιερά Οδός 75, 11855 Αθήνα

gbourazanis@windtools.gr, marg.tsaniklidou@hotmail.gr, jarg@aua.gr, kerkides@aua.gr

Στην παρούσα εργασία, γίνεται σύγκριση Χαρακτηριστικών Καμπυλών Υγρασίας (ΧΚΥ) τριών αδιατάρακτων εδαφικών δειγμάτων που προσδιορίστηκαν πειραματικά, με αντίστοιχες, που προέκυψαν από πεδοσυναρτήσεις (PTFs), με χρήση ευκόλως προσδιορίσιμων εδαφικών χαρακτηριστικών. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Soil Water Characteristics from Texture (SWCT). Τα αδιατάρακτα δείγματα ελήφθησαν από τρεις οριζόντες (5-10, 10-15 και 25-30 cm) ενός σημείου πειραματικού αγρού (ελαιώνα) πέντε στρεμμάτων. Γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων και ελέγχεται η χρησιμότητά του SWCT ως εργαλείου προσδιορισμού των υδραυλικών ιδιοτήτων, για τα συγκεκριμένα δείγματα. Διαπιστώνεται εν προκειμένω ότι το SWCT υπερεκτιμά την υγρασία καθ' όλο το εύρος του κλάδου αποστράγγισης, έναντι των πειραματικά προσδιορισμένων τιμών για τις ίδιες τιμές πίεσης, ενώ αναδεικνύεται και το γεγονός που έχει αναφερθεί στη βιβλιογραφία ότι οι πεδοσυναρτήσεις χαρακτηρίζονται από τοπική εφαρμοσιμότητα. Η επιλογή του SWCT έγινε διότι πρόκειται για ένα πρόγραμμα δωρεάν διαθέσιμο στο διαδίκτυο, που με πολύ ευκόλως προσδιορίσιμα εργαστηριακά δεδομένα και χωρίς ιδιαίτερες γνώσεις επί του αντικείμενου, φαίνεται να δίνει τα υδραυλικά χαρακτηριστικά του εδάφους, για οποιαδήποτε περαιτέρω χρήση αυτών στις εφαρμογές των αρδεύσεων. Τα χαρακτηριστικά αυτά του SWCT θα μπορούσαν να το κάνουν ιδιαίτερα ελκυστικό για ευρεία χρήση από επιστήμονες του κλάδου που ασχολούνται με εφαρμογές.

Λέξεις κλειδιά: Χαρακτηριστική καμπύλη υγρασίας, πεδοσυναρτήσεις, Soil Moisture Characteristics from texture

MOISTURE CHARACTERISTIC CURVES COMPARISON OF UNDISTURBED SOIL SAMPLES DETERMINED BY PRESSURE CELLS AND PEDOTRANSFER FUNCTIONS

George Bourazanis¹, Margarita Tsaniklidou², Ioannis Argyrokastritis³, Petros Kerkides⁴

¹ Department of Rural Economy and Veterinary of Regional Government of Laconia, Sparta, Laconia, 23100, Greece

^{2,3,4} Laboratory of Agricultural Hydraulics, Department of Natural Resources development and Agricultural Engineering University of Athens, 11855, Athens, Greece

gbourazanis@windtools.gr, marg.tsaniklidou@hotmail.gr, jarg@aua.gr, kerkides@aua.gr

In this paper, Soil Moisture Characteristic Curves (SMCCs) of three undisturbed soil samples determined experimentally are compared with those provided by using pedotransfer functions (PTFs). For this purpose we used Soil Water Characteristics from Texture software (SWCT). The undisturbed samples were taken from three depths (5-10, 10-15 and 25-30 cm) of a specific location of a half an acre experimental field (olive orchard). Comparisons of the test results are made. Furthermore the usefulness of SWCT as a tool for determining the hydraulic properties for these soil samples is discussed. The SWCT seems to overestimate soil moisture throughout the drying curve against experimentally determined values for the same pressure heads. At the same time emerges the fact which has been reported in the literature that PTFs shouldn't be used for extrapolation. The choice of SWCT was because it is freely available, and determines soil hydraulic properties with easily obtainable laboratory soil data. No special knowledge on the subject is needed and at the same time this tool seems to give easily the hydraulic characteristics of the soil, for any further use for irrigation scheduling. These characteristics could make SWCT attractive for use by Agronomists and Agricultural Engineers dealing with irrigation scheduling and applications.

Key words: Soil moisture characteristic curve, pedotransfer functions, Soil Moisture Characteristics from Texture

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η γνώση της χαρακτηριστικής καμπύλης υγρασίας (ΧΚΥ) είναι πολύ σημαντική για τη διαχείριση του αρδευτικού νερού και του εδαφικού πόρου, σε ό,τι έχει να κάνει με φαινόμενα διάβρωσης, συσσώρευσης αλάτων και

ερημοποίησης. Ο εργαστηριακός προσδιορισμός της ΧΚΥ είναι χρονοβόρος και απαιτεί ακριβό εργαστηριακό εξοπλισμό, κάτι που δρα αποτρεπτικά (Saxton and Rawls, 2006)

Έχουν γίνει προσπάθειες έμμεσου προσδιορισμού της με διάφορες μεθοδολογίες, όπως

με εμπειρικές εξισώσεις, που σκοπό έχουν τη δυνατότητα χρησιμοποίησης τους, ως βασικών δεδομένων εισόδου (input data) για αριθμητική επεξεργασία και επίλυση προβλημάτων κίνησης του εδαφικού διαλύματος στην ακόρεση ζώνη. Μία από τις μεθοδολογίες αυτές είναι και οι πεδοσυναρτήσεις (Pedotransfer functions) (PTFs). Οι PTFs προσδιορίζουν είτε στο σύνολό της τη ΧΚΥ, είτε σημαντικά σημεία αυτής (σημείο μάρανσης και υδατοϊκανότητα), με αναλυτικές εξισώσεις που την περιγράφουν, λαμβάνοντας υπ' όψιν παράγοντες του εδάφους που παίζουν ρόλο στη κατανομή, τη μορφή και τη σταθερότητα των πόρων. Τέτοιοι παράγοντες είναι η κοκκομετρική σύσταση, η περιεκτικότητα σε χαλίκια, η αλατότητα, η φαινομενική πυκνότητα, η περιεκτικότητα σε οργανική ουσία κ.λ.π..

Η αξία των PTFs παρά τα αντικρουόμενα αποτελέσματα της εφαρμογής τους αποδεικνύεται από την πλειάδα των επιστημόνων που έχουν ασχοληθεί με τη δημιουργία νέων πεδοσυναρτήσεων με σύγκριση μεθοδολογιών δημιουργίας PTFs αλλά και με σύγκριση της απόδοσης των διαφόρων PTF που έχουν δημιουργηθεί. (Danalatos et al., 1994, Antonopoulos 2000, Antonopoulos 2001, Μουσουλιώτης κ.α. 2009α Μουσουλιώτης 2009β)

Ένα τέτοιο λογισμικό προσδιορισμού των υδραυλικών ιδιοτήτων των εδαφών από χαρακτηριστικά τα οποία προκύπτουν από εύκολες εργαστηριακές αναλύσεις, είναι το Soil Water Characteristics from Texture (SWCT) (Saxton et al., 1986, Saxton and Rawls, 2006). Το συγκεκριμένο υποπρόγραμμα είναι μέρος ενός λογισμικού προσομοίωσης υδρολογίας το Plant Atmosphere Water Field and Pond Hydrology (SPAW).

Το SWCT χρησιμοποιεί εξισώσεις που έχουν προκύψει από πολυπαραμετρική ανάλυση παλινδρόμησης δεδομένων υδραυλικών αλλά και λοιπών εδαφολογικών χαρακτηριστικών διαθέσιμων στην εδαφολογική βάση του Υπουργείου Γεωργίας της Αμερικής (USDA)

Στην παρούσα εργασία γίνεται σύγκριση ΧΚΥ που προκύπτουν από τη χρήση του συγκεκριμένου λογισμικού με πειραματικά προσδιορισμένες για τρία διαφορετικής κοκκομετρικής σύστασης αδιατάρακτα δείγματα (SCL, L και CL) που ελήφθησαν από τρία διαφορετικά βάθη μίας κατατομής (5-10, 10-15 και 25-30 cm) πειραματικού ελαιώνα πέντε στρεμμάτων..

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1.Υλικά

Για τη λήψη αδιατάρακτων δειγμάτων κατασκευάστηκε δειγματολήπτης και περιέκτες από διάφανο πλαστικό. Ο πλαστικός περιέκτης είχε ύψος 4 cm και διάμετρο 7,1 cm. Για τις διαστάσεις του πλαστικού κυλίνδρου επελέγησαν οι ίδιες με τον πλαστικό δακτύλιο που χρησιμοποιείται στα κύτταρα πίεσης προσδιορισμού της ΧΚΥ,



Εικόνα 13. Ο δειγματολήπτης αδιατάρακτου με τα τμήματά του καθώς και ο πλαστικός περιέκτης με τα χαρακτηριστικά του

Για τον προσδιορισμό των ΧΚΥ χρησιμοποιήθηκαν κύτταρα πίεσης με κεραμική πλάκα 2.5 bar τα οποία κατασκευάστηκαν στο μηχανουργείο του ΓΠΑ



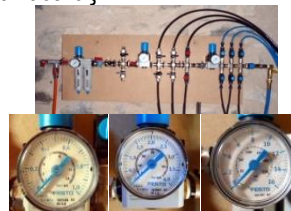
Εικόνα 14. Κύτταρο πίεσης με τα εξαρτήματά του

Ως πηγές αέρα υπό πίεση χρησιμοποιήθηκε ένας ηλεκτρικός αεροσυμπιεστής με αεροθάλαμο με δυνατότητα διατήρησης πίεσης στις 6 Atm.



Εικόνα 15. Μέσο εφαρμογής πίεσης

Η διάταξη ρύθμισης πίεσης αποτελείται από ζεύγος υδατοπαγίδας και ελαιοπαγίδας και από τρεις ρυθμιστές ακριβείας διαφορετικού εύρους ρύθμισης ο καθένας.



Εικόνα 16. Γραμμή ρύθμισης πίεσης για τον ηλεκτρικό αεροσυμπιεστή και ρυθμιστές πίεσης

Για τη ζύγιση των κυτάρων, χρησιμοποιήθηκε ζυγός ψηφιακός της εταιρείας Adam μοντέλο ACB-3.000 με ακρίβεια ένα δεκαδικό του γραμμαρίου (0.1 gr) και δυνατότητα ζύγισης μέχρι 3.000 gr.



Εικόνα 17. Διηλεκτρική συσκευή και μετρητής που χρησιμοποιήθηκε

2.2.Διαδικασία προσδιορισμού της ΧΚΥ με τα Κύτταρα πίεσης

Ακολουθήθηκαν τα εξής βήματα:

1. Ζυγίζεται όλο το κύτταρο έχοντας κορέσει την κεραμική πλάκα, γεμίζει με νερό το θάλαμο κάτω από αυτήν καθώς και το σωληνάκι μέσω του οποίου εξέρχεται το νερό. (B₀)

2. Αφαιρείται από το κύτταρο ο πλαστικός δακτύλιος και ζυγίζεται το κύτταρο. (B_{Δ})
3. Τοποθετείται ο πλαστικός δακτύλιος στον δειγματολήπτη αδιατάρακτου (εικόνα 1) και εισάγεται στην κατατομή στο εκείνο το βάθος από όπου είναι επιθυμητή η λήψη του δείγματος.
4. Αφαιρείται ο δειγματολήπτης λύνεται και λαμβάνεται ο πλαστικός δακτύλιος με το εδαφικό αδιατάρακτο δείγμα.
5. Αφήνεται το αδιατάρακτο δείγμα εντός του δακτύλιου να αεροξηρανθεί και γίνεται μέτρηση του όγκου του δείγματος. (V_{Δ})
6. Ζυγίζεται το αεροξηρανθέν δείγμα μαζί με τον πλαστικό δακτύλιο. ($B_{\Delta+E\Delta}$)
7. Προσδιορίζεται το βάρος του ξηρού δείγματος από την αφαίρεση $B_{E\Delta}=B_{\Delta+E\Delta}-B_{\Delta}$
8. Με τις μέχρι τώρα ανεξάρτητες ζυγίσεις είναι γνωστό το βάρος που έχει το κύτταρο πίεσης με το ξηρό δείγμα με κορεσμένη την πλάκα και με γεμάτο με νερό το θάλαμο κάτω από αυτήν καθώς και το σωληνάκι απαγωγής $B_{KUT=EP}=B_0+B_{E\Delta}$
9. Συνδέεται το σωληνάκι απαγωγής με σταθερή στάθμη νερού και κορένεται με αργό ρυθμό το δείγμα (μικρό ύψος στάθμης).
10. Αποσυνδέεται το σωληνάκι απαγωγής και συνδέεται στην κορυφή του κυττάρου ο ταχυσύνδεσμος εφαρμογής πίεσης.
11. Εφαρμόζεται θετική πίεση μικρού βήματος οπότε και αρχίζει στραγγίζοντας το δείγμα να εξέρχεται νερό από το σωληνάκι απαγωγής. Ζυγίζεται καθημερινά το δείγμα $B_{\Delta i}$ μέχρις ότου να σταθεροποιηθεί το μετρούμενο βάρος το οποίο και καταγράφεται μαζί με την πίεση που

εφαρμόστηκε (H_i). Υπολογίζεται η υγρασία του δείγματος ως ακολούθως:

$$\theta_i = \frac{B_{\Delta i} - B_{KUT=EP}}{V_{\Delta}}$$

12. Επαναλαμβάνεται η πιο πάνω διαδικασία για επόμενη πίεση μέχρι την πίεση αντοχής της πλάκας.

Στο τέλος της διαδικασίας έχει προσδιορισθεί η ΧΚΥ στο σύνολό της (Or and Wraith 2004, Lu, and Lykos, 2002, Klute 2006).

2.3. Προσδιορισμός εδαφικών παραμέτρων

Για την χρήση του SWCT προσδιορίσθηκαν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά με τις μεθοδολογίες που αναφέρονται:

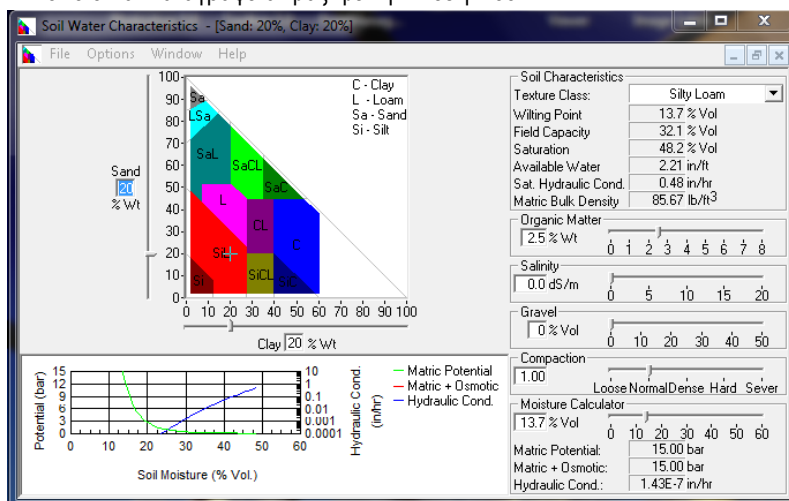
Πίνακας 15 Παρουσίαση των αναλύσεων που απαιτούνται ως δεδομένα για τη χρήση του SWCT πρόγραμμα

Ανάλυση	Μέθοδος	Βιβλιογραφία
Κοκκομετρική σύσταση	Μέθοδος Βουνιούκου	Gee and Bauder 2006
Οργανική ουσία	Μέθοδος Walkley-Black	Darrell and Lee 2007

2.3. Soil Water Characteristics from Texture (SWCT)

Για τον υπολογισμό των υδραυλικών χαρακτηριστικών χρησιμοποιήθηκε το SWCT. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα αποτελεί τμήμα του Soil Plant Atmosphere Water Field and Pond Hydrology (SPAW) πακέτου το οποίο αναπτύχθηκε από τον K. E. Saxton (Saxton et al., 1986). και είναι διαθέσιμο στην ιστοσελίδα:

<http://hydrolab.arsusda.gov/soilwater/Index.htm>



Εικόνα 18. Παρουσίαση του βασικού παραθύρου του προγράμματος SWCT όπου φαίνονται δεδομένα και αποτελέσματα

Για τον προσδιορισμό των υδραυλικών ιδιοτήτων απαιτούνται ως δεδομένα η κοκκομετρική σύσταση, το ποσοστό άμμου >2mm, η οργανική ουσία, η αλατότητα και η συμπίεση. Τα αποτελέσματα είναι κατ' αρχήν γραφικά όπου εμφανίζεται η ΧΚΥ ή $K(\theta)$ καθώς και η ΧΚΥ συμπεριλαμβάνοντας και την οσμωτική πίεση που ασκούν τα άλατα. Πέραν αυτών δίδονται και διακεκριμένες τιμές υδραυλικών ιδιοτήτων όπως η υδατοϊκανότητα, η υγρασία μαράνσεως, η υγρασία κορεσμού, η διαθέσιμη υγρασία, η υδραυλική αγωγιμότητα στον κορεσμό.

Επίσης στο πεδίο Moisture Calculator δίνεται η δυνατότητα να εισάγονται τιμές υγρασίας και να υπολογίζονται τιμές φορτίου πίεσης συμπεριλαμβανομένης και της οσμωτικής όπως και τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1. Αναλύσεις εδαφικών δειγμάτων

Στον πίνακα που ακολουθεί εμφανίζονται οι τιμές των παραμέτρων που απαιτούνται ως δεδομένα του προγράμματος:

Πίνακας 16 Αποτελέσματα αναλύσεων

α/α	% Sand	% SILT	% Clay	D>2mm (% κ.β.)	ΟΡΓ.ΟΥΣ. %	d (gr/cm ³)
A	35.4	38	26.6	5.72	1.541	1.46
B	48	25.4	26.6	5.59	1.7755	1.57
Γ	39.7	31.7	28.6	9.08	1.2395	1.55

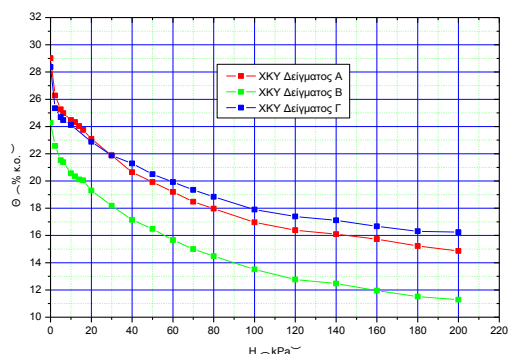
Τα τρία αδιατάρακτα εδαφικά δείγματα ελήφθησαν από τρία διαφορετικά βάθη μίας κατατομής. Συγκεκριμένα το Α από βάθος 5-10 cm, το Β από βάθος 10-15 cm και το Γ από βάθος 25-30 cm.

3.2. Προσδιορισμός ΧΚΥ Εδαφικών Δειγμάτων με τα Κύτταρα πίεσης

Με τα κύτταρα πίεσης προσδιορίστηκαν οι οριακοί κλάδοι αποστράγγισης τριών δειγμάτων Α, Β και Γ με τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε προηγουμένως και παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα.

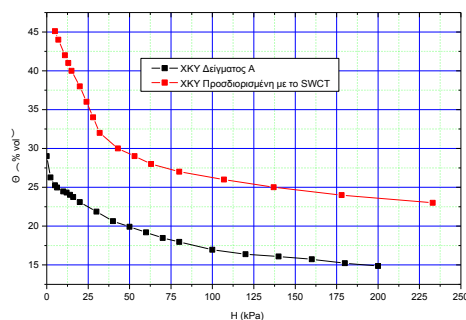
Πίνακας 17 Πειραματικές τιμές πίεσης-υγρασίας για τα τρία δείγματα

Δείγμα Α		Δείγμα Β		Δείγμα Γ	
H kPa	Θ %	H kPa	Θ %	H (kPa)	Θ(%)
0	29.02	0	24.28	0	28.37
2.25	26.27	2.25	22.57	2.25	25.33
5	25.26	5	21.53	5	24.69
6.25	24.97	6.25	21.38	6.25	24.47
10	24.47	10	20.56	10	24.11
12	24.32	12	20.34	20	22.88
14	24.04	14	20.12	30	21.87
16	23.75	16	20.05	40	21.29
20	23.10	20	19.30	50	20.50
30	21.87	30	18.19	60	19.92
40	20.64	40	17.15	70	19.34
50	19.92	50	16.48		
60	19.20	60	15.66		
70	18.48	70	15.00		
80	17.97	80	14.48		
100	16.96	100	13.51		
120	16.38	120	12.77		
140	16.10	140	12.47		
160	15.74	160	11.95		
180	15.23	180	11.51		
200	14.87	200	11.28		

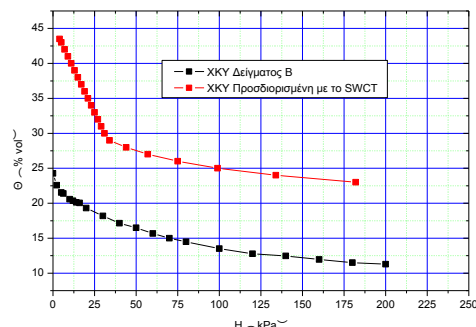


Διάγραμμα 9 ΧΚΥ τριών δειγμάτων όπως προσδιορίστηκαν με τη χρήση των Κυττάρων πίεσης

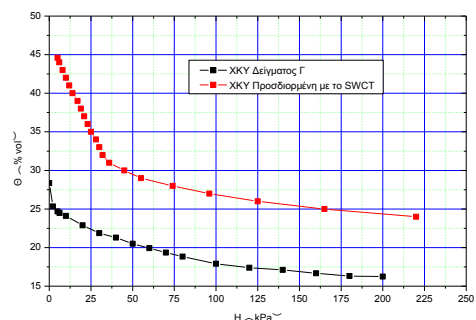
Επίσης με τη χρήση των δεδομένων του πίνακα 2 και του λογισμικού SWCT εξήχθησαν οι ΧΚΥ των τριών δειγμάτων. Ακολούθως εμφανίζεται σχηματικά η σύγκριση ανά δείγμα των δύο ΧΚΥ (πειραματική και υπολογισμένη από το SWCT).



Διάγραμμα 10 ΧΚΥ για το δείγμα Α πειραματική και υπολογισμένη με το SWCT



Διάγραμμα 11 ΧΚΥ για το δείγμα Β πειραματική και υπολογισμένη με το SWCT



Διάγραμμα 12 ΧΚΥ για το δείγμα Γ πειραματική και υπολογισμένη με το SWCT

4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τα διαγράμματα 1, 2 και 3 παρατηρούμε υπερεκτίμηση των τιμών υγρασίας που υπολογίστηκαν με τη χρήση του SWCT έναντι των πειραματικών και για τα τρία δείγματα.

Οι Gijssman et al., 2002 ανέφεραν ότι από οκτώ μεθόδους εκτίμησης που χρησιμοποίησαν σε γεωργικές και υδρολογικές εφαρμογές η μεθοδολογία του Saxton (Saxton et al., 1986) έδωσε την καλύτερη προσαρμογή σε ομάδα πειραματικών δεδομένων κάτι που δεν συνάδει με τα δικά μας αποτελέσματα.

Οι Williams, et al., 1992 αναφέρουν ότι από όλες τις κατηγορίες των PTFs εκείνες που δημιουργήθηκαν με ανάλυση παλινδρόμησης όπως το SWCT έδωσαν τα χειρότερα αποτελέσματα, ενώ βελτιώθηκαν σημαντικά όταν υπήρχαν διαθέσιμα και συμπεριλαμβάνονταν στους υπολογισμούς ζεύγη τιμών της ΧΚΥ.

Από την άλλη το SWCT δημιουργήθηκε από δεδομένα της εδαφολογικής βάσης του Υπουργείου Γεωργίας της Αμερικής και εμείς το δοκιμάσαμε σε

εδάφη εκτός αυτών των εδαφικών περιοχών. Οι Gijsman et al., (2002), Wosten, et al., (2001) ο O Givi et al., (2004) και οι Μουσουλιώτης κ.α. (2009) αναφέρουν ότι οι αποκλίσεις που παρατηρούνται οφείλονται σε διαφορές που υπάρχουν μεταξύ των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για να δημιουργηθούν οι PTFs έναντι αυτών που εμείς δοκιμάζουμε. Οι διαφορές είναι χωρικού χαρακτήρα και έχουν να κάνουν με το από ποια περιοχή προήλθαν τα δείγματα με τα οποία δημιουργήθηκε και αξιολογήθηκε μία PTF, και από ποια περιοχή είναι τα δείγματα για τα οποία θέλουμε να προβλέψουμε τις υδραυλικές τους ιδιότητες. Αλλιώς οι πεδοσυναρτήσεις χαρακτηρίζονται από τοπική ισχύ και η χρήση του δεν πρέπει να γίνεται άκριτα. (Wosten, et al., 2001, Μουσουλιώτης κ.α. 2009).

Η αξία των PTFs είναι αδιαμφισβήτητη για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας όπου σε περιφερειακό ή εθνικό επίπεδο άλλοι παράγοντες που εμπλέκονται και εμφανίζουν χωρική παραλλακτικότητα θα έχουν μεγαλύτερη επίδραση από ότι αυτή των υδραυλικών ιδιοτήτων στα αποτελέσματα (Gijsman et al., 2002).

Αντιθέτως, θα πρέπει να αποφεύγεται η χρήση τους για τον προσδιορισμό των υδραυλικών χαρακτηριστικών συγκεκριμένου σημείου, διότι αυτό ενέχει πολλούς κινδύνους λαθών, με επίδραση σε ακόλουθους υπολογισμούς που έχουν να κάνουν με την κίνηση αλάτων διάβρωση κ.λ.π. (Wosten, et al., 2001)

Εκτιμούμε ότι οι PTFs μπορούν να αποτελέσουν εργαλείο με ικανοποιητική προσέγγιση και θεωρούμε ότι είναι σκόπιμο αναπτυχθούν νέες βελτιωμένες πεδοσυναρτήσεις και για τα Ελληνικά εδάφη (Μουσουλιώτης κ.α. 2009). Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι μία τέτοια προσπάθεια έχει γίνει από τους Danalatos et al., (1994) όπου ελήφθησαν εις τριπλούν αδιατάρακτα δείγματα από 105 ορίζοντες 34 εδαφών. Τα δείγματα αυτά χρησιμοποιήθηκαν σε προταθείσα πεδοσυνάρτηση η οποία προήλθε από απλοποίηση της PTF που έχει προταθεί από τους Driessen (1986) και Driessen and Konijn (1992).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Μουσουλιώτης Χ., Γεωργούσης Χ., Μπαμπατζιμόπουλος Χ., Πανώρας Ε., Χατζηγιαννάκης Ε. και Αραμπατζής Γ., 2009α, Χρήση πεδοσυναρτήσεων για την περιγραφή υδραυλικών ιδιοτήτων εδαφών της πεδιάδας Θεσσαλονίκης Ι. Αξιολόγηση πεδοσυναρτήσεων της Βιβλιογραφίας Κοινό Συνέδριο Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης (ΕΥΕ) και Ελληνικής Επιτροπής Διαχείρισης Υδατικών πόρων (ΕΕΔΥΠ), Τόμος Ι, 363-369

Μουσουλιώτης Χ., Γεωργούσης Χ., Μπαμπατζιμόπουλος Χ., Πανώρας Ε., Χατζηγιαννάκης Ε. και Αραμπατζής Γ., 2009β, Χρήση πεδοσυναρτήσεων για την περιγραφή υδραυλικών ιδιοτήτων εδαφών της πεδιάδας Θεσσαλονίκης ΙΙ Ανάπτυξη πεδοσυναρτήσεων ιολόγηση πεδοσυναρτήσεων της Βιβλιογραφίας Κοινό Συνέδριο Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης (ΕΥΕ) και Ελληνικής Επιτροπής Διαχείρισης Υδατικών πόρων (ΕΕΔΥΠ), Τόμος Ι, 379-386

Antonopoulos Z. Vassilis, 2000 Modelling of soil water dynamics in an irrigated corn field using direct and pedotransfer functions for hydraulic properties *Irrigation and Drainage Systems* **14**: 325–342, 2000

Antonopoulos Z. Vassilis, 2001, Simulation of water and nitrogen balances of irrigated and fertilized corn-crop soil, *Journal Irrigation Drainage Engineering* **127**:77-83

Danalatos N.G., Kosmas C.S., Driessen P.M., Yassoglou N., 1994, Estimation of the draining soil moisture characteristic from standard data as recorded in routine soil surveys, *Geoderma* Volume **64**, Issues 1–2, pp. 155–165

Darrell W. Nelson and Lee E. Sommers, 2007. Total Carbon, Organic Carbon and Organic Matter Water retention, Laboratory methods, in Sparks L.D. (editor) *Methods of Soil Analysis Part 3-Chemical methods*, SSSA Book Series 5 pp.995-996

Driessen, P M and Konijn, N T, 1992 *Land-Use Systems Analysis* INRES, Agric Univ of Wageningen, pp.230

Driessen, P M, 1986 The water balance of the soil In H van Keulen and J Wolf (Editors), *Modeling of Agricultural Production Weather, Soils and Crops* Pudoc, Wageningen, pp 76-116

Gee W. G. and Bauder W. J. 2006 Hydrometer method in

Gijsman, A.J., S.S. Jagtap, and J.W. Jones. 2002. Wading through a swamp of complete confusion: How to choose a method for estimating soil water retention parameters for crop models. *Eur. J.Agron.* **18**:75–105.

Givi J., Prasher S.O., Patel R.M. (2004) Evaluation of pedotransfer functions in predicting the soil water contents at field capacity and wilting point *Agricultural Water Management* **70** 83–96

Klute A 2006. Water retention, Laboratory methods, in Klute A. (editor) *Methods of Soil Analysis Part 1-Physical and Mineralogical Methods*, 2nd Ed., SSSA Book Series 5 pp.635-656

Lu. N. and Likos W. J., 2002, *Unsaturated Soil mechanics*, John Wiley & Sons INC, pp. 417-459

Or D. and Wraith J. M. 2004 Soil water content and water potential relationships in Warrick W. A. (editor) 2004, *Soil Physics Companion*, CRC Press, pp 49-82

Saxton E. K. and Rawls J. W., 2006, Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions, *Soil Sci. Soc. Am. J.* **70**:1569–1578

Saxton, K.E., Rawls, W.J., Romberger, J.S., Papendick, R.I., 1986. Estimating generalized soil-water characteristics from texture., *Soil Sci. Soc. Am. J.* **50**, 1031-1036

Williams, R D, Ahuja, L R and Naney, J W, 1992 Comparison of Methods to Estimate Soil Water Characteristics From Soil Texture, Bulk Density, and Limited Data *Soil Sc* **153**(3) 172-184

Wosten, J.H.M., Pachepsky, Ya.A., Rawls, W.J., 2001. Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. *J. Hydrol.* **251**, 123–150.

**ΔΙΕΥΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ - ΠΑΡΟΧΗΣ ΣΕ ΑΡΔΕΥΤΙΚΑ ΚΑΝΑΛΙΑ
ΜΕ ΣΥΣΚΕΥΗ ΥΠΕΡΗΧΩΝ**

**Ανδρέας Ηλίας¹, Ηλίας Τελόγλου², Ευάγγελος Χατζηγιαννάκης¹, Ιωάννης Πανώρας¹,
Παναγιώτα Γαλιατσάτου³, Αθανάσιος Πανώρας¹**

¹Ινστιτούτο Εγγείων Βελτιώσεων, Ελληνικός Γεωργικός Οργανισμός "Δήμητρα", 57400 Σίνδος

²Τμήμα Φυτικής Παραγωγής, Αλεξάνδρειο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Θεσσαλονίκης, 57400 Σίνδος

³Τομέας Υδραυλικής και Τεχνικής Περιβάλλοντος, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, ΑΠΘ, 54124 Θεσσαλονίκη

Η χρήση οργάνων που στηρίζονται στις αρχές της ακουστικής και χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της ταχύτητας ροής του νερού μέσα σε αγωγούς, αν και διατίθενται αρκετά χρόνια στο εμπόριο, έχει τύχει μικρής εφαρμογής στην πράξη. Οι συσκευές αυτές εκπέμπουν ηχητικά κύματα στο φάσμα των υπερήχων και λαμβάνουν ανακλάσεις σε διαφορετικές συχνότητες λόγω του φαινομένου Doppler. Χαρακτηριστικό γνώρισμα αυτών των συσκευών είναι η δυνατότητα αυτοματοποιημένης συνεχούς μέτρησης και καταγραφής ταχυτήτων και παροχής. Πραγματοποιήθηκαν εκτεταμένες δοκιμές μετρήσεων και καταγραφής της "σημειακής" (τοπικής) ταχύτητας ροής με τη συσκευή υπερήχων-Doppler Starflow-Model 6526 του Αυστραλιανού οίκου Unidata. Αρχικά έγιναν δοκιμές σε εργαστηριακό κανάλι, σε δεύτερη φάση πραγματοποιήθηκαν δοκιμές για περιορισμένο χρόνο σε τριτεύουσες και δευτερεύουσες διώρυγες και τελικά η συσκευή τοποθετήθηκε σε δευτερεύουσα διώρυγα του δικτύου βαρύτητας στην περιοχή ευθύνης του ΤΟΕΒ Αγίου Αθανασίου, με στόχο τη διερεύνηση της αξιοπιστίας των μετρήσεων ταχύτητας ροής και παροχής κατά τη διάρκεια της αρδευτικής περιόδου. Σε όλη τη διάρκεια των δοκιμών, ταυτόχρονα με τη λειτουργία της συσκευής υπερήχων πραγματοποιήθηκαν επανειλημμένες μετρήσεις της ταχύτητας ροής με μολίσκο προκειμένου να χρησιμοποιηθούν ως μέτρο σύγκρισης. Στη διάρκεια των δοκιμών εξετάστηκαν εναλλακτικά σενάρια τοποθέτησης και διάφορα σενάρια ρύθμισης των παραμέτρων της συσκευής με στόχο τη βελτιστοποίηση λειτουργίας και τη λήψη σταθερών και αξιόπιστων μετρήσεων.

Λέξεις κλειδιά: ταχύτητα ροής, μετρητές ροής, υπέρηχοι, Doppler

**INVESTIGATION OF THE ACCURACY OF ACOUSTIC DOPPLER VELOCITY AND FLOW MEASUREMENTS IN
OPEN CHANNELS**

**Andreas Ilias¹, Ilias Teloglou², Evaggelos Hatzigiannakis¹, Ioannis Panoras¹, Panagiota Galiatsatou³,
Athanasios Panoras¹**

¹Land Reclamation Institute, Hellenic Agricultural Organization "Demetra", 57400 Sindos,

e-mail: Andreas Ilias: anilias.LRI@nagref.gr, Evaggelos Hatzigiannakis: hatzigiannakis.LRI@nagref.gr, Ioannis Panoras: y.panoras@gmail.com, Athanasios Panoras: panoras.lri@nagref.gr

²Department of Crop Production, Alexander Technological Educational Institute of Thessaloniki, 57400 Sindos,
e-mail: itelo@cp.teithe.gr

³ Division of Hydraulics and Environmental Engineering, Department of Civil Engineering, AUTH, 54124 Thessaloniki
e-mail: pgaliats@civil.auth.gr

Acoustic Doppler devices are used for the estimation of water velocity for several years now; nevertheless there is little experience in situ measurements. These devices utilize the acoustic signals frequency shift, due to the Doppler effect, to measure water velocity (ADVM). One of the main advantages of such instruments is their ability to measure continuously and log the measurements so they may be utilized for the rational management of water resources and the operation surveillance of open-channel irrigation networks. The acoustic Doppler velocity meter "Starflow-Model 6526" of the Australian firm "Unidata" was tested in both a laboratory channel and in the open-channel irrigation network of Agios Athanasios, at Thessaloniki plain, in northern Greece. The ultimate target of this study was to investigate the accuracy of velocity and discharge measurements throughout an irrigation season, at a secondary channel of the irrigation network. To optimize the instrument operation for obtaining stable and reliable measurements a series of alternative scenarios related to adjusting various parameter sets and mounting of the device was examined. During both the lab and the irrigation channel measurements made with the ADVM device, several measurements with a typical propeller current meter were carried out, in order to check the accuracy of the acoustic device.

Key words: water velocity meters, current meters, acoustic Doppler

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μέτρηση της παροχής σε ανοικτούς αγωγούς (κανάλια ή διώρυγες) είναι ένα θέμα που έχει απασχολήσει όλους όσους σχετίζονται με το αντικείμενο των εγγείων βελτιώσεων και ιδιαίτερα αυτούς που ασχολούνται με τη διαχείριση και τη διανομή του νερού σε δίκτυα βαρύτητας. Η κλασική μέθοδος μέτρησης της ταχύτητας ροής με χρήση μιλίσκου και ο υπολογισμός της παροχής, είναι ακριβής αλλά απαιτεί εξειδικευμένο προσωπικό, ύπαρξη κατάλληλης θέσης μέτρησης, είναι χρονοβόρα, ενώ η μέτρηση είναι στιγμιαία.

Η χρήση οργάνων που στηρίζονται στις αρχές της ακουστικής για τη μέτρηση της ταχύτητας ροής και της παροχής του νερού, αν και τα όργανα αυτά υπάρχουν αρκετά χρόνια στο εμπόριο, έχει τύχει μικρής εφαρμογής στην πράξη. Οι συσκευές αυτές εκπέμπουν ηχητικά κύματα στο φάσμα των υπερήχων και λαμβάνουν ανακλάσεις σε διαφορετικές συχνότητες λόγω του φαινομένου Doppler, τις οποίες επεξεργάζονται στο πεδίο του χρόνου και των συχνοτήτων (συσκευές υπερήχων-Doppler). Χαρακτηριστικό γνώρισμα αυτών των συσκευών είναι η δυνατότητα αυτοματοποιημένης συνεχούς μέτρησης και καταγραφής των ταχυτήτων, σε αντίθεση με την κλασική μέθοδο του μιλίσκου που δίνει στιγμιαίες μετρήσεις και η δυνατότητα μέτρησης γρήγορα μεταβαλλόμενων (Ruhl and Simpson, 2005; Simpson and Oltmann, 1993) ή πολύ μικρών παροχών (Merz, 2010). Οι συσκευές υπερήχων - Doppler χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες (Censor and Newhouse, 1988):

- Τις συσκευές που μετρούν σημειακή (τοπική) ταχύτητα ροής (Acoustic Doppler Velocity Meters, ADVM) και χρησιμοποιούνται κατά κανόνα σε αρδευτικά και στραγγιστικά κανάλια ή μικρά υδατορεύματα, και
- Τις συσκευές που καταγράφουν κατανομή (προφίλ) ταχυτήτων ροής (Acoustic Doppler Current Profilers, ADCP), οι οποίες είναι πολύπλοκες, υψηλού κόστους και χρησιμοποιούνται για την μέτρηση παροχής σε μεγάλα υδατορεύματα (Vougioukas et al., 2011).

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1. Η συσκευή

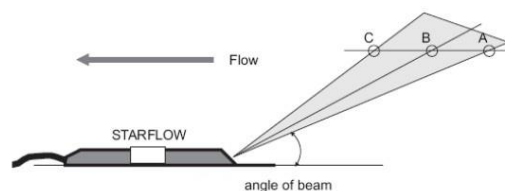
Η συσκευή Starflow-Model 6526 που χρησιμοποιήθηκε (Unidata Starflow Manual, 2011), μετρά την τοπική ταχύτητα και το βάθος ροής και υπολογίζει την παροχή όταν έχουν εισαχθεί τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διατομής του αγωγού. Η συσκευή προορίζεται για μετρήσεις ταχύτητας ροής, βάθους και παροχής σε μικρά ρέματα και αρδευτικά κανάλια και συνοδεύεται από τον επεξεργαστή "Micrologger Model 6526".

Τα βασικά χαρακτηριστικά της συσκευής είναι τα εξής:

- Δυνατότητα μέτρησης ταχύτητας ροής με χρήση τεχνικής υπερήχων-Doppler (Y-D)
- Ενσωματωμένος επεξεργαστής και καταγραφέας (logger) σε μονάδα στερεής κατάστασης (solid-state unit)

- Μέτρηση βάθους ροής με πιεζομετρικό αισθητήρα
- Μέτρηση θερμοκρασίας νερού για διόρθωση ταχύτητας
- Σειριακή θύρα επικοινωνίας για ρύθμιση της συσκευής και λήψη καταγραφών
- Δυνατότητα παρακολούθησης μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο
- Τροφοδοσία από μπαταρία, ηλιακό συλλέκτη ή ρεύμα
- Δυνατότητα μέτρησης σε μη στρωτές ροές, καθώς και σε ανάστροφες ροές

Η πραγματική μέτρηση (raw) του αισθητήρα της συσκευής αφορά στη μεταβολή της συχνότητας (Doppler shift) του ηχητικού σήματος που ανακλάται στα κινούμενα σωματίδια ή στις φυσαλίδες που βρίσκονται μέσα στο νερό, και μεταφράζεται σε ταχύτητα ροής με επεξεργασία του σήματος. Καθώς οι αισθητήρες της συσκευής είναι υπό-γωνία με τη ροή, υπολογίζεται η συνιστώσα της ταχύτητας κατά τη διεύθυνση της ροής (Εικόνα 1).



Εικόνα 1. Μέτρηση ταχύτητας ροής από τη συσκευή Starflow

2.2. Δείκτης ταχύτητας και μέση ταχύτητα ροής

Η συσκευή Starflow, όπως και κάθε άλλη συσκευή ADVM, λαμβάνει ανακλάσεις σημάτων από τα αιωρούμενα σωματίδια που βρίσκονται σε ένα τμήμα της υγρής διατομής του υδατορεύματος, ή για την ακρίβεια σε έναν (κατά προσέγγιση κωνικό) όγκο νερού που βρίσκεται μπροστά και επάνω από τη συσκευή (Εικόνα 1). Για το λόγο αυτό η μετρούμενη ταχύτητα αναφέρεται συνήθως ως δείκτης ταχύτητας (index velocity) (Huang, 2004), σε αντιδιαστολή με την σημειακή ταχύτητα που μετρείται με τον κλασικό μιλίσκο (με προπέλα ή ηλεκτρομαγνητικό).

Το μέγεθος του όγκου που συμμετέχει στη μέτρηση εξαρτάται από την ισχύ του ηχητικού σήματος και την καθαρότητα του νερού. Όσο πιο μεγάλος είναι αυτός ο όγκος και όσο πιο αντιπροσωπευτική η ταχύτητα του νερού εντός αυτού του όγκου σε σχέση με τη μέση ταχύτητα νερού στη διατομή μέτρησης, τόσο πιο κοντά στην πραγματική μέση ταχύτητα του υδατορεύματος θα είναι η μετρούμενη ταχύτητα. Η αντιπροσωπευτικότητα της μέσης ταχύτητας του μετρούμενου όγκου σε σχέση με την μέση ταχύτητα κίνησης του νερού στο κανάλι εξαρτάται από παράγοντες όπως τα χαρακτηριστικά της ροής, η τραχύτητα του πυθμένα και των πρανών, και το μέγεθος και το σχήμα του καναλιού.

Σε μικρά κανάλια, η ταχύτητα που μετρείται από τη συσκευή Starflow μπορεί να βρίσκεται πολύ κοντά ή να ταυτίζεται με την πραγματική μέση ταχύτητα του νερού, καθώς η ηχητική δέσμη "βλέπει" σημαντικό τμήμα της διατομής του ρέοντος νερού. Σε περιπτώσεις όπου η ροή εντός των καναλιών είναι

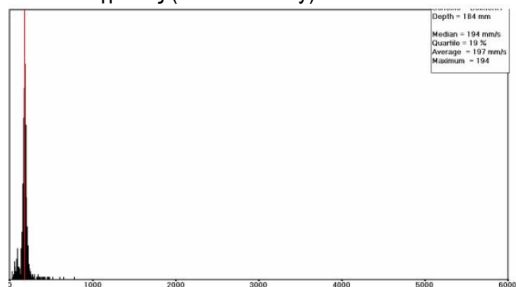
στρωτή, η ταχύτητα που μετράει η συσκευή αναμένεται σε γενικές γραμμές να βρίσκεται σε ένα εύρος γύρω από την πραγματική μέση ταχύτητα της υγρής διατομής.

Σε μεγαλύτερα κανάλια η δέσμη ηχητικών σημάτων "βλέπει" μικρό μέρος της υγρής διατομής. Γενικά, σε ροές με σημαντικά βάθη ή σε ροές με μικρότερα βάθη αλλά σχετικά ακάθαρτα νερά (στα οποία τα ηχητικά σήματα αποσβένονται σε μικρές αποστάσεις από την πηγή), ή σε κανάλια με τραχείς πυθμένες, οι μετρούμενες ταχύτητες πρέπει να διορθώνονται ώστε να αντανakλούν τη μέση ταχύτητα της υγρής διατομής. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η μέτρηση της μέσης ταχύτητας ροής με μιλίσκο και η συσχέτισή της με τη μετρούμενη με τη συσκευή ADVN.

2.3. Ρύθμιση της συσκευής ADVN

Η κατανόηση των αρχών της υδραυλικής σε συνδυασμό με τις αρχές λειτουργίας και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της χρησιμοποιούμενης συσκευής είναι στοιχεία απαραίτητα για την αποτελεσματική παραμετροποίησή της. Είναι προφανές ότι οι παράμετροι που πρέπει να ρυθμιστούν αλληλοεξαρτώνται και για το λόγο αυτό αντιμετωπίζονται ως σύνολο ή ως "σχήμα" (scheme). Οι βασικές παράμετροι ρύθμισης της συσκευής είναι οι εξής:

- Ρυθμός σάρωσης (scan rate): Καθορίζει τη συχνότητα σάρωσης για κάθε μέτρηση. Μεγάλος ρυθμός σάρωσης αυξάνει την πιθανότητα καταγραφής "αποδεκτών" μετρήσεων. Υπάρχει περιορισμός στη σχέση μεταξύ του διαστήματος καταγραφής (logging interval) και της συχνότητας σάρωσης.
- Βήμα καταγραφής (log interval). Το διάστημα στο οποίο υπολογίζεται η μέση ταχύτητα (index velocity) από τις στιγμιαίες μετρήσεις.
- Ελάχιστο βάθος μέτρησης. Καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά της συσκευής.
- Μέγιστο τεταρτημόριο. Ως τεταρτημόριο (quartile) ορίζεται ο λόγος του εύρους της κατανομής των στιγμιαίων ταχυτήτων στο διάστημα μέτρησης της ταχύτητας, προς το ύψος της κορυφής της κατανομής (peak value). Αποτελεί ένα δείκτη της ποιότητας μέτρησης. Υψηλές τιμές (μεγαλύτερες του 100%) υποδηλώνουν μεγάλη διασπορά στις στιγμιαίες ταχύτητες (Εικόνα 2).
- Ελάχιστος αριθμός αποδεκτών στιγμιαίων ταχυτήτων, ώστε να υπολογιστεί η μέση ταχύτητα του δείγματος (index velocity).



Εικόνα 2. Ιστογράμμο ταχυτήτων με τιμή τεταρτημορίου (quartile) 19%.

- Μέγιστος αριθμός αποδεκτών μετρήσεων προς ανάλυση. Γενικά ένας αριθμός της τάξης των 200 μετρήσεων είναι αρκετός. Για συνθήκες με προβληματικές ροές, ο αριθμός αυτός μπορεί να πρέπει να αυξηθεί πχ έως το 500.
- Επιλογή των παραμέτρων που θα καταγράφονται (logging). Ιδιαίτερα στην περίοδο ελέγχου και ρύθμισης της συσκευής μπορεί να καταγράφονται παράμετροι όπως η συχνότητα του σήματος, οι ελάχιστες, μέγιστες, μέσες και αθροιστικές τιμές όλων των παραμέτρων στο διάστημα ολοκλήρωσης (log interval), ο υπολογισμός και η καταγραφή της παροχής, η τάση, κλπ.
- Υπάρχει δυνατότητα ρύθμισης γραμμικής ή κυκλικής καταγραφής.
- Ενεργοποίηση συμβάντος (event logging), όπως καταγραφή δεδομένων, αποστολή SMS και ενεργοποίησης μικροδιακοπών (relay control).

3. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ – ΔΟΚΙΜΕΣ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1. Τοποθέτηση της συσκευής

Η συσκευή ADVN τοποθετήθηκε σε δευτερεύουσα τραπεζοειδή διώρυγα του αρδευτικού δικτύου στην περιοχή ευθύνης του Τ.Ο.Ε.Β. Αγίου Αθανασίου. Το νερό της διώρυγας μετέφερε υδροχαρή βλάστηση και άλλα φερτά υλικά σε διαφορετικά φορτία κατά τη διάρκεια της αρδευτικής περιόδου.

Η συσκευή είναι κατασκευασμένη με προδιαγραφή τη μόνιμη τοποθέτησή της στον πυθμένα του καναλιού. Ωστόσο η μόνιμη τοποθέτηση δημιουργεί δύο σημαντικά προβλήματα: α) Η συσκευή πρέπει να τοποθετηθεί πριν την πλήρωση του δικτύου και να απεγκατασταθεί μετά τη διακοπή παροχής νερού στα κανάλια και β) Είναι πρακτικά αδύνατο να υπάρχει έλεγχος της συσκευής όταν είναι τοποθετημένη μόνιμα στον πυθμένα του καναλιού. Όπως φάνηκε από την πιλοτική χρήση της συσκευής σε κάθε περίπτωση είναι απαραίτητο να υπάρχει δυνατότητα οπτικού ελέγχου, ανασυρσης και καθαρισμού της συσκευής. Για το λόγο αυτό η τοποθέτηση έγινε σε αυτοσχέδια βάση (Εικόνα 3)



Εικόνα 3. Ιδιοκατασκευή - βάση τοποθέτησης συσκευής ADVN.

Η προτεινόμενη τοποθέτηση της συσκευής Starflow για τη μέτρηση της ταχύτητας ροής σε ανοικτούς

αγωγούς είναι τέτοια ώστε οι πομποδέκτες ηχητικών σημάτων να βλέπουν προς τα ανάντη της ροής. Σε αυτή την τοποθέτηση έχει γίνει η εργοστασιακή βαθμονόμηση (calibration) της συσκευής. Για την αποφυγή συσσώρευσης φερτών υλικών επάνω στην επιφάνεια του αισθητήρα, δοκιμάστηκε επιπλέον η τοποθέτηση της συσκευής με φορά προς τα κατόντη της ροής. Στην περίπτωση αυτή οι ταχύτητες που καταγράφονται είναι αρνητικές, ενώ (κατά τον κατασκευαστή) υπάρχει και μικρή απόκλιση από τη βαθμονόμηση της συσκευής.

Στις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν έχοντας τους αισθητήρες της συσκευής στραμμένους προς τα κατόντη της ροής, οι μετρήσεις που πάρθηκαν ήταν αντίστοιχες της κανονικής τοποθέτησης. Το πρόβλημα ωστόσο στην περίπτωση αυτής της τοποθέτησης, είναι ότι καθώς οι ράβδοι στήριξης και το σώμα της συσκευής βρίσκονται ανάντη των αισθητήρων, τα φερτά υλικά που συσσωρεύονται στις ράβδους και στο σώμα της συσκευής, αλλά και η ίδια η συσκευή, επηρεάζουν σημαντικά τη ροή στην περιοχή της μέτρησης. Για το λόγο αυτό δεν μελετήθηκε περισσότερο η συγκεκριμένη διάταξη.

Στις περιπτώσεις κατά τις οποίες έγινε προσπάθεια μέτρησης και καταγραφής της ταχύτητας ροής για παρατεταμένα διαστήματα (αρκετών ημερών ή/και εβδομάδων), παρατηρήθηκαν προβλήματα από τη συσσώρευση φερτών υλικών (φύκια, φύλλα, κλαδιά, στελέχη καλλιεργειών, σχοινιά, πλαστικά κλπ) επάνω στη συσκευή και στους βραχίονες στήριξης. Στην προσπάθεια να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα, έγιναν διάφορες τροποποιήσεις και δοκιμές τόσο στον τρόπο τοποθέτησης της συσκευής όσο και βελτίωση της βάσης τοποθέτησης.

Κατά το θέρος, εξαιτίας των υψηλών θερμοκρασιών και της ηλιακής ακτινοβολίας, αναπτύσσεται στα κανάλια υδροχαρής βλάστηση. Τα φυτά αυτά έχουν μακριά ινώδη υφή και επικάθονται σε στρώματα πάνω στη συσκευή. Επιπλέον η ιλύς σε συνδυασμό με τα διάφορα είδη μικροοργανισμών που υπάρχουν στο νερό δημιουργούν επάνω στη συσκευή στρώσεις υλικών (πουρί) που παρεμποδίζουν τις μετρήσεις. Τα προβλήματα αυτής της μορφής είναι τόσο πιο έντονα όσο μεγαλύτερα είναι τα διαστήματα με χαμηλές ταχύτητες ροής.

Για την αντιμετώπιση των εσφαλμένων μετρήσεων, δοκιμάστηκαν διάφορα σεντ παραμέτρων, ενώ κατά τη θερινή περίοδο του 2012 πραγματοποιήθηκε και αναβάθμιση του λογισμικού μετά από συνεργασία με την κατασκευάστρια εταιρεία.

Σημειώνεται ότι η όποια κατασκευή για την προστασία της συσκευής από την υδροχαρή βλάστηση και τα άλλα φερτά υλικά, αλλά και η κατασκευή που θα επιτρέπει την τοποθέτηση και ανάσχυση της συσκευής για έλεγχο και καθαρισμό, πρέπει: α) να προφυλάσσει τη συσκευή από τα φερτά υλικά, β) να μην παρεμποδίζει τη λειτουργία της συσκευής και γ) να μην επηρεάζει σημαντικά τα χαρακτηριστικά της ροής (Εικόνα 4).

3.2 Αρχικές μετρήσεις

Κατά τις αρχές του θέρους του 2012, καταγράφηκε αριθμός εμφανώς λανθασμένων μετρήσεων. Μία από τις αιτίες των εσφαλμένων παρατηρήσεων ήταν οι πολύ αργές ροές κατά τις απογευματινές και



Εικόνα 4. Ιδιοκατασκευή για προστασία της συσκευής μετρήσεων από τα φερτά υλικά.

βραδινές ώρες, εξαιτίας της μειωμένης ζήτησης νερού στο αρδευτικό δίκτυο. Παρόμοια προβλήματα, δηλαδή παρεμβολή "θορύβου" κατά τις μετρήσεις, σε περιπτώσεις μικρών παροχών ή μικρού αριθμού αιωρούμενων σωματιδίων έχουν παρατηρηθεί και από άλλους ερευνητές και για την επίλυσή τους χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι διόρθωσης (Blake and Packman, 2008). Οι αλγόριθμοι αυτοί είτε ενσωματώνονται στο λογισμικό των συσκευών είτε εφαρμόζονται μετά τη λήψη των στοιχείων (post processing).

Στο διάστημα που ακολούθησε και για περισσότερο από ένα μήνα, μετά από συνεχή επικοινωνία, δοκιμές και ανταλλαγή δεδομένων με τεχνικούς του κατασκευαστικού οίκου Unidata, δοκιμάστηκαν διάφορα σχήματα παραμέτρων (schemes), με στόχο να βρεθεί η αιτία του εμφανιζόμενου θορύβου και των εσφαλμένων μετρήσεων. Σημειώνεται ότι ακόμα και οι τεχνικοί της κατασκευάστριας εταιρίας δυσκολεύτηκαν να ερμηνεύσουν τις εκτός ορίων μετρήσεις που έδινε η συσκευή. Μετά από αρκετές δοκιμές και από αναβάθμιση του λογισμικού ώστε να περιέχει βελτιωμένα φίλτρα για τα καταγραφόμενα σήματα, έγινε δυνατό να πάρουμε συνεχείς μετρήσεις χωρίς την εμφάνιση θορύβου. Δυστυχώς όταν επιλύθηκε το παραπάνω πρόβλημα, ήδη οι παροχές στις διώρυγες του αρδευτικού δικτύου ήταν μειωμένες, συχνά δε και μηδενικές ή πολύ μικρές, καθώς πλησίαζε το τέλος της αρδευτικής περιόδου

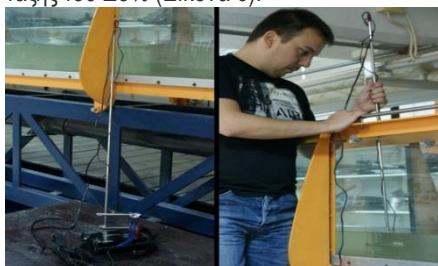
3.3. Εργαστηριακές μετρήσεις

Πραγματοποιήθηκε εργαστηριακή δοκιμή στο τεχνητό κανάλι δοκιμών του Εργαστηρίου Γενικής και Γεωργικής Υδραυλικής και Βελτιώσεων της Γεωπονικής Σχολής του ΑΠΘ (μήκος 20 m, ορθογωνική διατομή πλάτους 30 και ύψους 45 cm).

Κατά τις δοκιμές, πραγματοποιήθηκαν ταυτόχρονες μετρήσεις με τη συσκευή Starflow (τοποθετημένη στην αυτοσχέδια βάση ώστε να προσομοιάζουν οι συνθήκες με αυτές των πραγματικών μετρήσεων) και με μιλίσκο του οίκου A.OTT Kempten, Type C1 (Εικόνα 5).

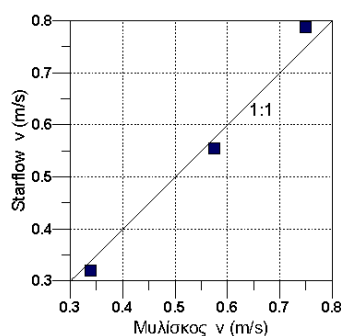
Αρχικός στόχος της δοκιμής στο εργαστηριακό κανάλι ήταν η διαπίστωση της ακρίβειας μέτρησης

σε διάφορες καταστάσεις ροής, καθώς και η εύρεση της σχέσης μεταξύ του δείκτη ταχύτητας και της μέσης ταχύτητας ροής στο κανάλι. Στις "ιδανικές" συνθήκες ροής στο εργαστηριακό κανάλι, η μετρούμενη ταχύτητα με τη συσκευή ADVM και με το μολίσκο πρακτικά ταυτίζονταν, με αποκλίσεις της τάξης του $\pm 5\%$ (Εικόνα 6).



Εικόνα 5. Ταυτόχρονη μέτρηση με μολίσκο.

Ωστόσο δεν ήταν δυνατή η δοκιμή σε μεγάλο εύρος ταχυτήτων ροής, εξαιτίας των περιορισμών στη ρύθμιση της ροής του καναλιού.



Εικόνα 6. Σύγκριση μετρήσεων ταχύτητας ροής με συσκευή Starflow και με μολίσκο.

3.4. Μετρήσεις σε καναλέτα

Αρχικά πραγματοποιήθηκε περιορισμένος αριθμός μετρήσεων σε καναλέτα (τριτεύουσες διώρυγες, Εικόνα 7).



Εικόνα 7. Μετρήσεις σε καναλέτο.

Σε όλες τις δοκιμές διενεργούνταν ταυτόχρονα μετρήσεις με μολίσκο. Σε δύο περιόδους μετρήσεων, κατά τις οποίες είχε ρυθμιστεί πολύ μικρός χρόνος ολοκλήρωσης, η συσκευή Starflow κατέγραψε σημαντικό αριθμό αρνητικών ταχυτήτων. Οι αρνητικές μετρήσεις πιθανώς να οφείλονται στο μικρό μέγεθος του καναλιού και στους στροβιλισμούς που προκαλούνταν από τα τραχιά τσιμεντένια τοιχώματα. Σημειώνεται ότι μεταξύ των επιλογών ρύθμισης της συσκευής υπάρχει η δυνατότητα αποκλεισμού των αρνητικών μετρήσεων.

Στη γενική περίπτωση, σε σύντομες περιόδους (διάρκειας μερικών λεπτών ή κάθε μία) δοκιμαστικών μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν σε καναλέτα, η απόκλιση της μετρούμενης ταχύτητας με τη συσκευή Starflow σε σχέση με τη μετρούμενη με μολίσκο ήταν υπερεκτιμημένη κατά 12 με 15%.

3.5. Μετρήσεις σε δευτερεύουσες διώρυγες (ΔΔ)

3.5.1 Αρχική μέτρηση σε ΔΔ

Πραγματοποιήθηκε αρχική δοκιμαστική μέτρηση σε δευτερεύουσα διώρυγα των επιφανειακών δικτύων της πεδιάδας Θεσσαλονίκης (Εικόνα 8). Η συσκευή τοποθετήθηκε στη διώρυγα με τη βάση και τους βραχίονες στήριξης. Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε υπό ιδανικές συνθήκες ροής, δηλαδή σταθερή ομοιόμορφη ροή και νερό χωρίς φερτά υλικά αλλά με επαρκή αιωρούμενα ώστε να δίνουν ικανοποιητικό αριθμό ανακλάσεων. Υπό αυτές τις συνθήκες η μέτρηση της συσκευής Y-D ήταν πολύ κοντά στις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με το μολίσκο, με απόκλιση της τάξης του 3%. Επιπλέον η υπολογιζόμενη παροχή από τη συσκευή πρακτικά ταυτίστηκε με την υπολογισμένη από τις ταχύτητες ροής στις διατομές που μετρήθηκαν με το μολίσκο (Πίνακας 1).



Εικόνα 8. Μέτρηση σε δευτερεύουσα διώρυγα.

Πίνακας 1. Συγκριτικές μετρήσεις ADVM-μολίσκου

Συσκευή	V (mm/s)	Παροχή (l/s)
Μολίσκος	340	153.0
Starflow	351	157.6
Απόκλιση	+3%	+3%

3.5.2 Μέτρηση σε ΔΔ σε μακροχρόνια τοποθέτηση

Η θέση μακροχρόνιας τοποθέτησης επιλέχθηκε ύστερα από υπόδειξη των υπευθύνων του Τ.Ο.Ε.Β. Αγίου Αθανασίου. Στην πορεία των δοκιμών παρουσιάστηκαν ιδιαίτερα έντονα προβλήματα με τα φερτά υλικά (φύκια, φύλλα, βλαστοί, καλάμια κλπ) τα οποία επικάθονταν στη συσκευή και τους βραχίονες στήριξης με αποτέλεσμα να παρουσιαστούν διάφορα προβλήματα, όπως δυσλειτουργία της συσκευής, παράσυρσή της από τη ροή, κάλυψη των αισθητήρων, δημιουργία στροβιλισμών στη ροή, τοπική ή ακόμα και γενική μείωση της παροχής.

Οι αρχικές μετρήσεις κατά την προσπάθεια τοποθέτησης για παρατεταμένο χρόνο, είχαν αρκετά προβλήματα, τα οποία οφείλονταν τόσο στη συγκέντρωση φερτών υλικών επάνω στη συσκευή, όσο και στην παραμετροποίηση και το λογισμικό της συσκευής. Γενικά η συσκευή ADVM στο διάστημα αυτό υπερεκτιμούσε τις ταχύτητες ροής (Πίνακας 2).

Πίνακας 2. Δοκιμαστική μέτρηση σε ΔΔ

Ημ/νία	Συσκευή	V (mm/s)
2/7/12	Μυλίσκος	473
	Starflow	621
	Απόκλιση	+31.5%
12/7/12	Μυλίσκος	416
	Starflow	497
	Απόκλιση	+19.6%
18/7/12	Μυλίσκος	597
	Starflow	646
	Απόκλιση	+8.2%

3.5.3 Μέτρηση σε ΔΔ μετά την αναβάθμιση του λογισμικού

Οι επόμενες μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με το αναβαθμισμένο λογισμικό και το τροποποιημένο σεντ παραμέτρων, για να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα που παρουσιάστηκαν κατά τις προηγούμενες δοκιμές. Τα αποτελέσματα των νέων δοκιμών έδωσαν πολύ καλά αποτελέσματα, γεγονός που πιθανώς να οφείλεται στο αναβαθμισμένο λογισμικό και το διορθωμένο σεντ παραμέτρων, ενώ κάποιο ρόλο μπορεί να έπαιξαν και οι μειωμένες παροχές της περιόδου αυτών των μετρήσεων (Πίνακας 3).

Κατά τη δοκιμή της 17/8/2012, το τεταρτημόριο (quartile) που δείχνει την "ποιότητα" της μέτρησης, είχε μέση τιμή 42, κάτω από το 50 που είναι ένα όριο απόλυτα αποδεκτών μετρήσεων, ενώ και οι μέγιστες τιμές δε ξεπερνούσαν το 68. Είναι τιμές αναμενόμενες καθώς το βάθος ροής που ήταν περίπου 0.5m (480mm) σε συνδυασμό με την ταχύτητα ροής που είναι 0.344m/s, δίνουν χαρακτηριστικά στρωτής ροής και δείχνουν ότι ακόμη και στην περιοχή της συσκευής δε δημιουργούνται ιδιαίτεροι στροβιλισμοί. Υπό αυτές τις συνθήκες οι μετρήσεις ταχύτητας ροής της συσκευής ADVN και του μυλίσκου, πρακτικά ταυτίζονται.

Κατά τη μέτρηση της 14/9/2012 μετρήθηκε και η παροχή, με το μυλίσκο με την τυπική μέθοδο του χωρισμού της υγρής διατομής σε τρία τμήματα (δύο τρίγωνα που περιβάλλουν ένα ορθογώνιο παραλληλόγραμμο) και μέτρησης της ταχύτητας σε κάθε τμήμα, ενώ με τη συσκευή ADVN θωρήθηκε ως μέση ταχύτητα της υγρής διατομής η μετρούμενη από τη συσκευή.

Πίνακας 3. Συγκριτικές μετρήσεις ADVN-μυλίσκου

Ημ/νία	Συσκευή	V (mm/s)	Παροχή(l/s)
17/8/12	Μυλίσκος	333	
	Starflow	344	
	Απόκλιση	+3.5%	
14/9/12	Μυλίσκος	377	186
	Starflow	353	175
	Απόκλιση	-6.4%	-6%

4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η σχεδόν συστηματική υπερεκτίμηση των ταχυτήτων που μετρούνταν από τη συσκευή ADVN,

σε σχέση με αυτές που μετρούνταν με μυλίσκο, πιθανώς να οφείλεται στο γεγονός ότι η συσκευή υπερήχων υπολογίζει την ταχύτητα ροής δεχόμενη ανακλάσεις από έναν όγκο (κώνο) νερού, γεγονός που σημαίνει ότι συνυπολογίζει και συνιστώσες ταχύτητας που δεν είναι κάθετες στην υγρή διατομή. Ο τρόπος αυτός μέτρησης, αντιστοιχεί στη μέτρηση με μυλίσκο, με προπέλες που δέχονται εύρος συνιστωσών σε γωνία $\pm 45^\circ$, σε αντιδιαστολή με τις κλασικές προπέλες, όπως αυτή που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις με μυλίσκο, που επηρεάζονται από συνιστώσες ροής σε εύρος γωνιών $\pm 5^\circ$. Προφανώς η επίδραση των συνιστωσών αυτών (οι οποίες δεν είναι κάθετες ή σχεδόν κάθετες προς την υγρή διατομή) είναι τόσο σημαντικότερη, όσο πιο "ακατάστατη" (στροβιλώδης) είναι η ροή στην περιοχή μέτρησης.

Σε συνθήκες στρωτής ροής η συσκευή ADVN, έδωσε εξαιρετικά αποτελέσματα, συγκρινόμενα με μετρήσεις που πραγματοποιούνται με μυλίσκο.

Τέλος, σημαντικό ρόλο στη δυνατότητα αξιοποίησης των συσκευών ADVN ή γενικότερα καταγραφικών οργάνων (οι οποίες απαιτούν μόνιμη τοποθέτηση) παίζει η δυνατότητα κατασκευής αυτοκαθαριζόμενου συστήματος προστασίας των συσκευών από φερτά υλικά.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Blake, J.R., and Packman, J.C., 2008. Identification and correction of water velocity measurement errors associated with ultrasonic Doppler flow monitoring. *Water and Environment Journal*, 22:155-167.
- Censor, D., and Newhouse, V., 1988. Generalized Doppler effect: Coherent and incoherent spectra. *Journal, Acoustical Society of America*, 83(6).
- Huang, H., 2004. Index-velocity rating development for rapidly changing flows in an irrigation canal using Broadband StreamPro ADCP and ChannelMaster H-ADCP. 1st International Conference on Managing Rivers in the 21st Century.
- Merz, J., 2010. Discharge measurements in low flow conditions with ADCP technology - First experiences in Nepal. *Journal of Hydrology and Meteorology, SOHAM-Nepal*, Vol.7(1):40-48.
- Ruhl, C.A., and Simpson M.R., 2005. Computation of discharge using the index-velocity method in tidally affected areas. *US Geological Survey, Scientific Investigations Report 2004-2005*.
- Simpson, M.R., and Oltmann, R.N., 1993. Discharge measurement using an acoustic Doppler current profiler. *U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2395*, 34p.
- Unidata, 6526 Starflow Manual, Issue 3.4, Sep 2011.
- Vougioukas, S., Papamichail, D., Georgiou, P.E. and Papadimos, D., 2011. River Discharge Monitoring using a Vertically Moving Side-Looking Acoustic Doppler Profiler. *Computers and Electronics in Agriculture*, 79, 137-141.

ΚΛΙΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ: ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΟΥ ΥΨΟΥΣ ΒΡΟΧΗΣ ΚΑΙ Η ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΟΥΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Χαλκίδης Ηρακλής, Ευάγγελος Μπrouζούκης, Μαρία Σακελλαρίου - Μακραντωνάκη
Εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Φυτόκο, οδός Φυτόκου, 38334, Βόλος,
ichalkidis@uth.gr, Brouzoukis@gmail.com, mask@agr.uth.gr

Η παρούσα εργασία έχει ως σκοπό την διερεύνηση της προσαρμοστικότητας του ύψους βροχής των παγκόσμιων κλιματικών μοντέλων από το Ευρωπαϊκό πρόγραμμα πρόγνωσης για τις κλιματικές αλλαγές, PRUDENCE στις κλιματικές συνθήκες της Ελλάδας. Η έρευνα πραγματοποιήθηκε με δεδομένα από 16 μετεωρολογικούς σταθμούς καταμετρημένους σε όλη την ελληνική επικράτεια. Αρχικά πραγματοποιήθηκε μια στατιστική επεξεργασία των δεδομένων της βροχόπτωσης τόσο της περιόδου 1960-1990 όσο και της 2070-2100 από διάφορα κλιματικά μοντέλα και εξετάστηκε η προσαρμοστικότητά τους στην περιοχή διερεύνησης. Για τη λήψη των δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν τα περιοχικά μοντέλα RCAO, HIRHAM και REMO και το σενάριο εκπομπών CO₂, A2 του προγράμματος PRUDENCE. Στη συνέχεια έγινε συσχέτιση των πραγματικών τιμών βροχόπτωσης των μετεωρολογικών σταθμών με τις αντίστοιχες προβλέψεις των μοντέλων και εξήχθησαν μηνιαίες γραμμικές συσχετίσεις. Με τη χρήση των μηνιαίων γραμμικών συσχετίσεων πραγματοποιήθηκε η μετατροπή των μελλοντικών τιμών του μοντέλου σε μελλοντικές τιμές των περιοχών των Μετεωρολογικών σταθμών. Επίσης εξήχθησαν μηνιαίες γραμμικές συσχετίσεις μεταξύ των τιμών των μοντέλων για την περίοδο 1960-1990 με μελλοντικές τιμές των μοντέλων της περιόδου 2070-2100. Αυτές οι μηνιαίες γραμμικές συσχετίσεις εφαρμόζονται στα δεδομένα των μετεωρολογικών σταθμών και προκύπτουν αντίστοιχα χρονοσειρές βροχόπτωσης της περιόδου 2070-2100. Οι παραπάνω δυο μεθοδολογίες συγκρίνονται και εξάγονται τα τελικά συμπεράσματα προσαρμοστικότητας των μοντέλων ανά περιοχή.

Λέξεις – κλειδιά : PRUDENCE, κλιματικά μοντέλα, βροχόπτωση, κλιματικές αλλαγές, μελλοντικές χρονοσειρές .

CLIMATE MODELS: PREDICTION OF RAINFALL AND THEIR ADAPTABILITY IN GREECE

Chalkidis Iraklis, Evaggelos Brouzoukis, Maria Sakellariou - Makrantonaki
Laboratory of Agricultural Hydraulics, Department of Agriculture Crop Production and Rural Environment, University of Thessaly, Fytokou Street, GR-38334, Volos, Greece
ichalkidis@uth.gr, Brouzoukis@gmail.com, mask@agr.uth.gr

This study aims to investigate the adaptability of the global climate models on the weather conditions of Greece and also to investigate their best adjustment in our country. This survey was conducted in selected areas of Greece, with data from 16 weather stations throughout Greece. Initially a statistical treatment of rainfalls data was conducted, from the periods between 1960-1990 and 2070-2100 of various climate models and their adaptability was tested in the area of investigation. Future data found by PRUDENCE, the European program for forecasting climate change. To obtain the data we used the area models RCAO, HIRHAM and REMO and the CO₂ emission scenario A2 of the PRUDENCE project. Then there was a comparison of the observed values with predicted values model, a linear equation was found and with the use of this relationship we converted the simulated future values of the model on future values of the weather stations areas. Then the predicted values of the model were compared with future ones and this comparison was used for the export of future values of a weather station from the existing ones. We completed with the comparison of the two methods and the conclusions.

Keywords: PRUDENCE, climate models, rainfall, climate changes, future time series.

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Συνεχείς προσπάθειες πραγματοποιούνται προκειμένου να προβλεφθεί το τι θα συμβεί στο κλίμα το επόμενο διάστημα, ώστε να ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα και να αποτραπούν καταστροφικές συνέπειες. Για αυτό τον λόγο κατασκευάστηκαν κάποια λογισμικά, τα παγκόσμια κλιματικά μοντέλα ή μοντέλα Γενικής Κυκλοφορίας (Global Climate Models ή General Circulation Models, GCM's), τα οποία χρησιμοποιώντας τις μεταβλητές που επηρεάζουν το κλίμα και εξετάζοντας διάφορα σενάρια αύξησης του επιπέδου του CO₂ στην ατμόσφαιρα, προβλέπουν ορισμένα βασικά στοιχεία του μελλοντικού κλίματος όπως βροχόπτωση θερμοκρασία κτλ για όλες τις περιοχές του πλανήτη.

Όλα τα μοντέλα συγκλίνουν στο ότι σε γενικές γραμμές θα υπάρχει αύξηση της μέσης θερμοκρασίας της Γης και σε ορισμένες περιοχές θα είναι ιδιαίτερα μεγάλη. Επίσης θα μειωθεί η συχνότητα της βροχόπτωσης αλλά θα υπάρχουν ορισμένες ακραίες μηνιαίες τιμές του ύψους βροχής σε κάποια μέρη.

Τα GCMs έχουν σχετικά μικρή χωρική οριζόντια ανάλυση, της τάξεως των 250Km, με αποτέλεσμα να μην είναι ιδιαίτερα χρήσιμα στην προσομοίωση του κλίματος σε μικρότερες περιοχές, σε τοπικό δηλαδή επίπεδο. Για το λόγο αυτό, κατασκευάστηκαν τα περιοχικά μοντέλα (Regional Climate Models, RCM's) με χωρική ανάλυση της τάξεως των 25km.

Όμως ακόμη και αυτά τα μοντέλα παρουσιάζουν συστηματικά ή και τυχαία σφάλματα στην προσομοίωση σημαντικών κλιματικών παραμέτρων, όπως η θερμοκρασία και η βροχόπτωση.

Στο πλαίσιο του ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος PRUDENCE (Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects) πραγματοποιήθηκε μία σύγκριση των προσομοιώσεων 10 διαφορετικών RCMs τόσο μεταξύ τους, όσο και με πραγματικά δεδομένα για την περίοδο ελέγχου 1960-1989 για την ευρύτερη περιοχή της Ευρώπης. Σε γενικές γραμμές παρατηρήθηκε υπερεκτίμηση της θερμοκρασίας κατά το χειμώνα και το καλοκαίρι και μία τάση υποεκτίμησης της κατά τις μεταβατικές εποχές. Συγκεκριμένα για την περιοχή της Μεσογείου, η

θερμοκρασία υποεκτιμάται από τα μοντέλα σε όλες τις εποχές (Jacob *et al.*, 2007). Αντίθετα, η βροχόπτωση υπερεκτιμάται από το μοντέλο σε όλες τις εποχές. Την προσομοίωση της χειμερινής βροχόπτωσης στην Ελλάδα από το GCM HadAM3P μελέτησαν οι Tolika *et al.* (2006) και συμπέραναν ότι το μοντέλο δεν αναπαράγει ικανοποιητικά τα ύψη βροχής, πιθανότατα, σύμφωνα με τους ερευνητές, λόγω της αδυναμίας του να «συλλάβει» την πολύπλοκη ορογραφία της περιοχής, αλλά και το ρόλο του Αιγαίου πελάγους. Σε γενικές γραμμές σημειώνεται υποεκτίμηση των ποσών βροχόπτωσης, κυρίως στις περιοχές που χαρακτηρίζονται από τα μεγαλύτερα ύψη βροχής (δυτική Ελλάδα και νησιά ανατολικού Αιγαίου).

Σκοπός αυτής της εργασίας είναι να βελτιώσει τις εκτιμώμενες τιμές των μοντέλων προσδίδοντας τις διαφοροποιήσεις εξαιτίας των τοπικών κλιματικών συνθηκών, στη θέση κάθε μετεωρολογικού σταθμού.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1. Πηγή δεδομένων

Για την διερεύνηση των μελλοντικών κλιματικών αλλαγών στην Ελλάδα, όσον αφορά την βροχόπτωση, επιλέχτηκαν 16 μετεωρολογικοί σταθμοί κατανεμημένοι σε όλη την ελληνική επικράτεια. Αντίστοιχα από τα περιοχικά κλιματικά μοντέλα του ερευνητικού προγράμματος Prudence επιλέχτηκαν τα περιοχικά μοντέλα HIRHAM, RCO και REMO τα οποία έχουν ίδιου μεγέθους υπολογιστικό πλέγμα και κοινή εφαρμογή του δυσμενέστερου σεναρίου εκπομπών CO₂, A2. Το σενάριο αυτό προβλέπει: Μέτρια αύξηση του μέσου παγκόσμιου κατά κεφαλήν εισοδήματος. Ιδιαίτερα έντονη κατανάλωση ενέργειας. Ραγδαία αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού. Αργή και τμηματική τεχνολογική ανάπτυξη και μέτριες έως μεγάλες αλλαγές στη χρήση γης. **Ραγδαία** αύξηση της συγκέντρωσης του CO₂ στην ατμόσφαιρα η οποία θα φτάσει τα **850 ppm** το 2100. (Επιτροπή Μελέτης Επιπτώσεων κλιματικής αλλαγής Τράπεζας της Ελλάδος, 2011). Διερευνήθηκαν οι πιο κοντινές συντεταγμένες των περιοχικών μοντέλων με τους αντίστοιχους μετεωρολογικούς σταθμούς (Πίνακας 1).

Πίνακας 1. Συντεταγμένες Μετεωρολογικών σταθμών

Α/Α	ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΟΣ ΣΤΑΘΜΟΣ	ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΟ		ΥΨΟΜΕΤ ΡΟ (m)	RCO (σε μοίρες)		REMO (σε μοίρες)		HIRHAM (σε μοίρες)	
		ΠΛΑΤΟΣ	ΜΗΚΟΣ							
1	ΑΓΡΙΝΙΟ	38.61°	21.38°	24	38.56	21.43	38.69	21.60	38.57	21.43
2	ΑΓΧΙΑΛΟΣ	39.21°	22.80°	15	39.48	22.44	39.00	22.92	39.07	22.48
3	ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥΠΟΛΗ	40.85°	25.95°	3	40.84	25.71	40.53	25.93	40.93	25.74
4	ΑΡΑΞΟΣ	38.13°	21.41°	12	38.12	21.46	38.20	21.49	38.13	21.48
5	ΦΛΩΡΙΝΑ	40.80°	21.41°	695	40.76	21.27	40.74	21.45	40.79	21.77
6	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	35.01°	25.73°	10	35.12	25.63	35.45	25.57	35.21	25.87
7	ΙΩΑΝΝΙΝΑ	39.66°	20.85°	484	39.85	20.79	39.84	20.61	39.84	20.74
8	ΚΑΛΑΜΑΤΑ	37.06°	22.10°	11	37.26	22.04	37.04	22.43	37.28	22.10
9	ΛΗΜΝΟΣ	39.75°	25.23°	3	39.96	25.15	39.67	25.01	39.16	25.23
10	ΠΑΤΡΑ	38.25°	21.73°	2	38.12	21.46	38.20	21.49	38.13	21.48
11	ΡΟΔΟΣ	36.40°	28.08°	12	36.37	28.19	36.41	28.30	36.53	28.47
12	ΤΑΤΟΙ	38.10°	23.78°	235	38.19	23.56	38.41	23.39	39.12	23.58
13	ΤΡΙΠΟΛΗ	37.53°	22.40°	652	37.72	22.53	37.53	22.55	37.75	22.59
14	ΧΑΝΙΑ	35.50°	24.03°	62	35.56	24.14	35.67	24.45	35.62	24.31
15	ΧΙΟΣ	38.35°	26.15°	4	38.19	26.20	38.36	26.49	38.30	26.35
16	ΤΑΝΑΓΡΑ	38.31°	23.55°	140	38.63	23.55	38.41	23.39	38.68	23.61

2.2. Αξιολόγηση πραγματικών και υπολογιζόμενων τιμών

Ως κριτήριο συσχέτισης επιλέγεται το συνολικό αθροιστικό ύψος βροχόπτωσης στην 30ετία και συγκρίνονται τα δεδομένα κάθε σταθμού με τις αντίστοιχες εκτιμώμενες τιμές από τα επιλεγμένα RCM μοντέλα.

Έπειτα από τις συγκρίσεις δεδομένων και υπολογισμένων τιμών ζητούμενο είναι η δημιουργία μελλοντικών χρονοσειρών ύψους βροχής που να αντιστοιχούν στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε μετεωρολογικού σταθμού

Από την επεξεργασία των δεδομένων των μετεωρολογικών σταθμών και των αντιστοίχων κλιματικών μοντέλων (RCAO, REMO, HIRHAM) λαμβάνονται οι τρεις σταθμοί Αράξου, Φλώρινας και Αγχιάλου οι οποίοι αντίστοιχα έδωσαν τις καλύτερες συσχετίσεις με τα μοντέλα RCAO, REMO και HIRHAM, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.

Συγκεκριμένα επιλέχθηκαν ο σταθμός της Αράξου με το μοντέλο RCAO που το αθροιστικό ύψος βροχόπτωσης διαφέρει μόνο κατά +0,81%, ο σταθμός της Φλώρινας με τα μοντέλα REMO με διαφορά + 0,17% και ο σταθμός της Αγχιάλου με το μοντέλο HIRHAM με διαφορά κατά -0,08%.

Για τα μηνιαία δεδομένων της βροχόπτωσης των μετεωρολογικών σταθμών με τις αντίστοιχες τιμές των

μοντέλων, εφαρμόζεται η διπλή αθροιστική καμπύλη. Στη συνέχεια η γραμμή τάσης της διπλής αθροιστικής καμπύλης χρησιμοποιείται ως συνάρτηση μετατροπής των μελλοντικών δεδομένων των μοντέλων σε μελλοντικά δεδομένα των μετεωρολογικών σταθμών (1^η μέθοδος). Επίσης εφαρμόζεται η διπλή αθροιστική καμπύλη και μεταξύ των τιμών ελέγχου των μοντέλων (1960-1989) και των μελλοντικών τιμών αυτών (2070-2099). Η γραμμή τάσης αυτής της αθροιστικής καμπύλης χρησιμοποιείται ως η νέα συνάρτηση μετατροπής των δεδομένων βροχόπτωσης των μετεωρολογικών σταθμών (1960-1989) σε μελλοντικά δεδομένα των μετεωρολογικών σταθμών (2070-2099) (2^η μέθοδος). Τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων συγκρίνονται μεταξύ τους και σχολιάζονται.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Από τους υπολογισμούς συσχέτισης του συνολικού αθροιστικού ύψους βροχόπτωσης στην 30ετία (1960-89) προέκυψαν τα αποτελέσματα του Πίνακα 2. στον οποίο εμφανίζονται συνολικά οι αθροιστικές βροχοπτώσεις των Μετεωρολογικών σταθμών και αντιστοίχως των κλιματικών μοντέλων RCAO, REMO και HIRHAM με τα αντίστοιχα ποσοστά προσέγγισης τους με τις παρατηρούμενες τιμές.

Πίνακας 2. Αθροιστική βροχόπτωση 30 ετών, των Μετεωρολογικών σταθμών και αντιστοίχως των κλιματικών μοντέλων RCAO, REMO, HIRHAM

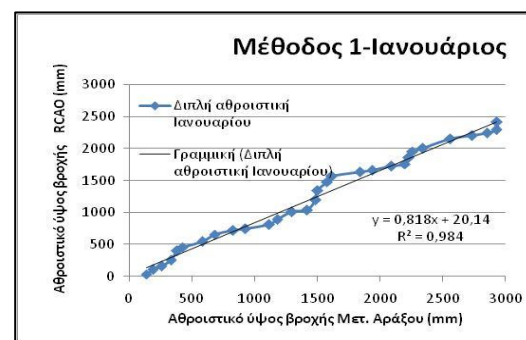
Α/Α	ΣΤΑΘΜΟΣ	ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ 1960-1989 (mm)	RCAO		REMO		HIRHAM	
			mm	%	mm	%	mm	%
1	ΑΓΡΙΝΙΟ	27694	21057	76.03	34945	126.18	17990	64.96
2	ΑΓΧΙΑΛΟΣ	15246	10909	71.55	24892	163.27	15234	99.92
3	ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥΠΟΛΗ	16571	10967	66.19	21268	128.34	15176	91.58
4	ΑΡΑΞΟΣ	20171	20334	100.81	42225	209.33	17298	85.76
5	ΦΛΩΡΙΝΑ	19849	25590	128.93	19882	100.17	20873	105.16
6	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	15259	3160	20.71	19632	128.66	3864	25.33
7	ΙΩΑΝΝΙΝΑ	32678	35565	108.84	33750	103.28	18894	57.82
8	ΚΑΛΑΜΑΤΑ	23912	19627	82.08	14167	59.25	16319	68.25
9	ΛΗΜΝΟΣ	13789	7336	53.20	12857	93.24	13051	94.65
10	ΠΑΤΡΑ	20787	20334	97.82	42224	203.13	17298	83.22
11	ΡΟΔΟΣ	21126	3816	18.06	20442	96.76	25594	121.15
12	ΤΑΤΟΙ	12962	8562	66.06	15455	119.23	11392	87.89
13	ΤΡΙΠΟΛΗ	24344	18171	74.64	12299	50.52	13466	55.32
14	ΧΑΝΙΑ	18496	5719	30.92	12982	70.19	13412	72.51
15	ΧΙΟΣ	16978	9322	54.91	31169	183.58	19258	113.43
16	ΤΑΝΑΓΡΑ	13763	9466	68.77	15455	112.29	14386	104.53

Από την εφαρμογή των μεθόδων 1 και 2 καταρτίζεται ο Πίνακας 3 ενώ στο Σχήμα 1 δίνεται ενδεικτικά η εφαρμογή της διπλής αθροιστικής καμπύλης (Μιρίκου, 1994) του Μοντέλου RCAO με τον Μετεωρολογικό Σταθμό της Αράξου του μηνός Ιανουαρίου για την 1^η Μέθοδο.

Από τα αποτελέσματα για τις μελλοντικές τιμές βροχόπτωσης, καταρτίζεται ο Πίνακας 4 στον οποίο συγκρίνονται το αθροιστικό ύψος βροχόπτωσης κάθε μήνα για τις δυο μεθόδους, για τα ζεύγη μοντέλου RCAO-Μετεωρολογικού σταθμού Αράξου, REMO-Μετεωρολογικού σταθμού Φλώρινας και HIRHAM- Μετεωρολογικού σταθμού Αγχιάλου.

Στους πίνακες 3 και 4 αντίστοιχα με το Σχήμα 1, στον άξονα των x θέτονται οι παρατηρούμενες τιμές

του σταθμού και στον άξονα y οι υπολογιζόμενες τιμές του μοντέλου.



Σχήμα 1. Διπλή αθροιστική καμπύλη RCAO - Αράξου.

Πίνακας 3. Εξισώσεις των γραμμών τάσεων των διπλών αθροιστικών καμπυλών και οι συντελεστές προσδιορισμού για την 1^η και 2^η μέθοδο

ΜΟΝΤΕΛΟ	ΜΗΝΑΣ	f(x) 1 ^{ης} Μεθόδου	R ² 1 ^{ης} Μεθόδου	f(x) 2 ^{ης} Μεθόδου	R ² 2 ^{ης} Μεθόδου
RCAO	Ιανουάριος	$y = 0,8187x + 20,143$	0,98	$y = 1,155x + 34,129$	0,97
	Φεβρουάριος	$y = 1,1466x + 113,87$	0,98	$y = 0,8959x + 51,788$	0,99
	Μάρτιος	$y = 0,7964x + 27,378$	0,99	$y = 1,0038x + 153,72$	0,98
	Απρίλιος	$y = 0,6048x - 22,536$	0,98	$y = 0,7274x + 200,76$	0,95
	Μάιος	$y = 0,4881x - 56,818$	0,99	$y = 0,8513x - 31,101$	0,92
	Ιούνιος	$y = 0,4756x + 24,55$	0,95	$y = 0,3096x + 57,098$	0,86
	Ιούλιος	$y = 0,8301x + 19,611$	0,74	$y = 0,0128x + 1,0612$	0,39
	Αύγουστος	$y = 0,4027x + 49,027$	0,82	$y = 0,0394x + 3,3113$	0,68
	Σεπτέμβριος	$y = 0,717x + 39,386$	0,95	$y = 0,4577x - 4,1887$	0,95
	Οκτώβριος	$y = 1,2826x + 208,4$	0,96	$y = 0,6119x + 14,556$	0,98
	Νοέμβριος	$y = 1,1819x - 356,84$	0,97	$y = 0,6215x + 42,018$	0,99
REMO	Δεκέμβριος	$y = 1,1679x + 322,05$	0,98	$y = 0,7087x + 144,77$	0,96
	Ιανουάριος	$y = 1,3125x + 43,988$	0,99	$y = 0,6613x - 65,199$	0,98
	Φεβρουάριος	$y = 1,2438x + 97,303$	0,98	$y = 0,7383x + 56,016$	0,97
	Μάρτιος	$y = 1,1343x + 256,4$	0,98	$y = 0,9915x + 197,11$	0,98
	Απρίλιος	$y = 0,8087x + 10,408$	0,99	$y = 0,9544x + 90,237$	0,99
	Μάιος	$y = 0,8162x + 94,919$	0,99	$y = 1,138x + 99,739$	0,97
	Ιούνιος	$y = 0,5136x + 183,38$	0,95	$y = 0,7817x + 262,56$	0,96
	Ιούλιος	$y = 0,8156x + 45,36$	0,93	$y = 1,1951x + 81,813$	0,97
	Αύγουστος	$y = 0,7224x - 132,77$	0,97	$y = 0,5135x - 17,33$	0,98
	Σεπτέμβριος	$y = 0,9319x - 59,391$	0,97	$y = 1,3459x - 133,07$	0,95
	Οκτώβριος	$y = 1,3645x - 22,311$	0,93	$y = 1,1613x - 79,129$	0,98
HIRHAM	Νοέμβριος	$y = 1,2515x + 163,89$	0,98	$y = 0,9166x - 70,719$	0,97
	Δεκέμβριος	$y = 1,545x + 332,93$	0,93	$y = 0,6487x + 142,84$	0,92
	Ιανουάριος	$y = 0,8575x + 71,765$	0,96	$y = 1,2385x + 112,75$	0,96
	Φεβρουάριος	$y = 1,203x + 28,289$	0,996	$y = 0,7521x + 18,642$	0,97
	Μάρτιος	$y = 1,0329x + 221,01$	0,97	$y = 1,0332x + 174,13$	0,99
	Απρίλιος	$y = 0,6646x - 89,137$	0,98	$y = 0,7918x + 96,911$	0,99
	Μάιος	$y = 0,6593x - 6,3392$	0,97	$y = 0,899x - 3,6809$	0,99
	Ιούνιος	$y = 0,464x - 0,9142$	0,99	$y = 0,6449x + 57,223$	0,98
	Ιούλιος	$y = 0,5912x + 42,671$	0,97	$y = 0,5786x + 127,27$	0,82
	Αύγουστος	$y = 0,5564x - 9,5605$	0,98	$y = 0,3234x + 42,899$	0,92
	Σεπτέμβριος	$y = 1,2977x + 245,35$	0,95	$y = 0,8233x + 39,142$	0,96
	Οκτώβριος	$y = 2,11x + 59,301$	0,99	$y = 0,8579x - 8,4272$	0,91
	Νοέμβριος	$y = 1,0216x - 38,57$	0,99	$y = 0,8149x + 51,349$	0,99
	Δεκέμβριος	$y = 1,3473x + 81,289$	0,98	$y = 0,8244x - 18,861$	0,97

Πίνακας 4. Σύγκριση μελλοντικών τιμών αθροιστικής βροχοπτώσης ανά μήνα των μεθόδων 1 & 2

ΜΟΝΤΕΛΟ	ΜΗΝΑΣ	ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ ΜΕΘΟΔΟΣ 1	ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ ΜΕΘΟΔΟΣ 2	ΜΗΝΑΣ	ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ ΜΕΘΟΔΟΣ 1	ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ ΜΕΘΟΔΟΣ 2
RCAO	Ιανουάριος	1994	3416	Αύγουστος	57	10
	Φεβρουάριος	2422	2337	Σεπτέμβριος	325	311
	Μάρτιος	1817	2003	Οκτώβριος	1833	1444
	Απρίλιος	894	1103	Νοέμβριος	2048	2318
	Μάιος	425	437	Δεκέμβριος	3360	2844
	Ιούνιος	118	140	Σύνολο	15314	16365
	Ιούλιος	21	3			
REMO	Ιανουάριος	1868	1145	Αύγουστος	359	434
	Φεβρουάριος	1520	1270	Σεπτέμβριος	2027	1660
	Μάρτιος	2043	2083	Οκτώβριος	2413	2005
	Απρίλιος	1716	1732	Νοέμβριος	1997	1905
	Μάιος	2189	2216	Δεκέμβριος	2126	1756
	Ιούνιος	1138	1208	Σύνολο	20669	18733
	Ιούλιος	1272	1318			
HIRHAM	Ιανουάριος	957	2379	Αύγουστος	184	208
	Φεβρουάριος	1395	1203	Σεπτέμβριος	1075	919
	Μάρτιος	1886	1835	Οκτώβριος	1914	1648
	Απρίλιος	871	922	Νοέμβριος	1445	1529
	Μάιος	1038	1038	Δεκέμβριος	1722	1587
	Ιούνιος	407	446	Σύνολο	13287	14142
	Ιούλιος	391	427			

4. Συζήτηση

Από τη σύγκριση της αθροιστικής βροχόπτωσης των μετεωρολογικών σταθμών και των μοντέλων για την περίοδο 1960-1989, παρατηρείται ότι η αθροιστική βροχόπτωση των πέντε σταθμών Αγρινίου, Αράξου, Καλαμάτας, Πάτρας και Τριπόλεως συσχετίζονται καλύτερα με το κλιματικό μοντέλο RCAO. Οι τέσσερις σταθμοί Φλώρινας, Ιεράπετρας, Ιωαννίνων και Ρόδου συσχετίζονται με το REMO και οι υπόλοιποι επτά σταθμοί Αγχιάλου, Αλεξανδρούπολης, Λήμνου, Τατοΐου, Χανίων, Χίου και Τανάγρας με το HIRHAM.

Σε αυτά τα ζεύγη σταθμών – μοντέλων οι εξισώσεις τάσης της 1^{ης} μεθόδου, έδωσαν πολύ υψηλούς συντελεστές συσχέτισης από 0,996 έως 0,74 με μοναδικές τιμές κάτω από 0,9 αυτές του μοντέλου RCAO για τους μήνες Ιούλιο (0,74) και Αύγουστο (0,82).

Επίσης η 2^η μέθοδος, έδωσε πολύ υψηλούς συντελεστές συσχέτισης έως 0,99 με μοναδικές τιμές κάτω από 0,9 αυτές του μοντέλου RCAO για τους μήνες, Ιούνιο (0,86), Ιούλιο (0,39) και Αύγουστο (0,68) και του μοντέλου HIRHAM για τον μήνα Ιούλιο (0,82).

Από τη σύγκριση των δύο μεθόδων με υπολογισμούς από τον πίνακα 4, παρατηρείται ότι για το μοντέλο RCAO η διαφορά μεταξύ των μεθόδων 1 και 2 κυμαίνεται μεταξύ -12,14% και 15,39%. Για το REMO η διαφορά μεταξύ των μεθόδων 1 και 2 κυμαίνεται από -14,90% έως 41,18% ενώ για το HIRHAM μεταξύ -106,98% και 14,66%.

Οι μεγάλες διακυμάνσεις που παρατηρούνται από μήνα σε μήνα μεταξύ των δύο μεθόδων, εξαλείφονται όταν έπεται από υπολογισμούς, συγκριθούν οι ετήσιες διαφορές οι οποίες είναι μικρότερες του 7% και συγκεκριμένα 3,75% για το RCAO, 6,82% για το REMO και -2,18% για το HIRHAM.

Η πρόβλεψη των κλιματικών αλλαγών και ιδιαίτερα της βροχόπτωσης είναι πολύ σημαντική για την σωστή μελέτη και κατασκευή υδραυλικών έργων στα οποία ο χρόνος κατασκευής μπορεί να είναι αρκετά έτη και η λειτουργική τους ζωή περισσότερο από 50 έτη. Αντίστοιχα σημαντική είναι και για την γεωργία εφόσον οι αρδεύσεις είναι ο σημαντικότερος παράγοντας παραγωγικότητας μιας καλλιέργειας. Η πρόβλεψη των κλιματικών αλλαγών θα βοηθήσει στον ορθό αγροτικό σχεδιασμό της χώρας και την ορθή αναδιάρθρωση των καλλιεργειών όπου απαιτηθεί.

5. Συμπεράσματα

Συμπερασματικά το μοντέλο HIRHAM έχει μια ελαφρά υπεροχή σε Πανελλαδικό επίπεδο ενώ όλοι οι μετεωρολογικοί σταθμοί της Πελοποννήσου συσχετίζονται καλύτερα με το RCAO μοντέλο.

Από τις συσχετίσεις των μοντέλων προκύπτει ότι το μοντέλο RCAO υστερεί σημαντικά τους θερινούς μήνες και κυρίως για τους μήνες Ιούλιο και Αύγουστο έναντι του HIRHAM και του REMO και ιδιαίτερα με την εφαρμογή της 2^{ης} μεθόδου.

Οι μεγάλες διακυμάνσεις των δυο μεθόδων οφείλονται στις μικρές αθροιστικές τιμές βροχόπτωσης που εμφανίζονται τους θερινούς μήνες, οπότε μικρές σχετικά διαφορές εμφανίζουν μεγάλες ποσοστιαίες διακυμάνσεις, οι οποίες εξαλείφονται όταν η σύγκριση των μεθόδων γίνει σε ετήσια βάση. Συνεπώς οι δυο μέθοδοι δεν διαφέρουν σημαντικά οπότε καλό είναι για την Ελληνική επικράτεια να επιλέγεται η μέθοδος που τους θερινούς μήνες δίνει μεγαλύτερες τιμές βροχόπτωσης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Μιμίκου, Μ.,(1994). Τεχνολογία υδατικών πόρων. Παπασωτηρίου, Αθήνα, 564 σελ.

Τράπεζας της Ελλάδος, (2011). Επιτροπή Μελέτης Επιπτώσεων κλιματικής αλλαγής. Σενάρια ανθρωπογενούς Παρέμβασης στην Κλιματική Αλλαγή και τα Προγράμματα Prudence και Ensembles. Αθήνα, σελ, 1-11.

Feyen, L., R. Vazquez, K. Christians, O. Sels and J. Feyen.(2000). Application of a distributed physically-based hydrological model to a medium size catchment. Hydrology & Earth System Sciences, 4(1): p.47-63.

Jacob D, Bärring L, Christensen OB, Christensen JH, de Castro M, Déqué M, Giorgi F, Hagemann S, Hirschi M, Jones R, Kjellström E, Lenderink G, Rockel B, Sánchez E, Schär C, Seneviratne SI, Somot S, van Ulden A and van den Hurk B ,(2007). An inter- comparison of regional climate models for Europe: model performance in present-day climate. Climatic Change 81: 31-52.

League, K. and R.E. Green.,(1991). Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and applications. Journal of Contaminant Hydrology 7: 51-73.

Nash, J.E., Sutcliffe, J.V.,(1970). Riverflow forecasting through conceptual models. Part 1: a discussion of principles. Journal of Hydrology, 10: 282-290.

Tolika K, Maheras P, Flocas HA and Arseni-Papadimitriou A,(2006). An evaluation of a General Circulation Model (GCM) and the NCEP-NCAR reanalysis data for winter precipitation in Greece. International Journal of Climatology 26: 935-955.

Vazquez R.F., L. Feyen, J. Feyen and J.C Refsgaard, (2002). Effect of grid size on effective parameters and model performance of the MIKE-SHE code. Hydrological Processes.16:355-372.

ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΡΙΖΟΥ-ΠΕΤΡΙΑΣ-ΑΡΣΕΝΙΟΥ (Ν.ΠΕΛΛΑΣ)

Δ.Σεραφείμ και Θ.Ζήσης

Τομέας Εγγείων Βελτιώσεων, Εδαφολογίας και Γεωργικής Μηχανικής
Γεωπονική Σχολή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 54124 Θεσσαλονίκη

Για την αξιολόγηση της εφαρμογής τεχνητού εμπλουτισμού του υδροφόρου της περιοχής Ριζού-Πετριάς-Αρσενίου χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας MODFLOW για την ανάπτυξη ενός τριδιάστατου μοντέλου προσομοίωσης της υπόγειας ροής. Η διοχέτευση του νερού εμπλουτισμού στον υδροφόρο θεωρείται ότι γίνεται διαμέσου δεκαπέντε (15) υδρογεωτρήσεων διπλού σκοπού. Εξετάζονται είκοσι οκτώ (28) διαφορετικά σενάρια τεχνητού εμπλουτισμού και υπολογίζεται για όλα η μεταβολή της πιεζομετρικής στάθμης με το χρόνο και η ποσότητα του νερού που αποθηκεύεται στον υδροφόρο κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Η εφαρμογή του μοντέλου έδειξε ότι ακόμη και μικρή χρονική διάρκεια τεχνητός εμπλουτισμός έχει θετικά αποτελέσματα.

Λέξεις κλειδιά: υδροφόρας, τεχνητός εμπλουτισμός, αριθμητική προσομοίωση, μέθοδοι πεπερασμένων διαφορών

THREE-DIMENSIONAL SIMULATION OF ARTIFICIAL RECHARGE OF THE RIZO-PETRIA-ARSENI AQUIFER (PREFECTURE OF PELLA)

D.Serafim and T.Zissis

Dept. of Hydraulics, Soil Science and Agricultural Engineering, School of Agriculture, Aristotle University of Thessaloniki, 54124 Thessaloniki, Greece

In order to evaluate the effect of artificial recharge on the aquifer of Rizo-Petria-Arseni region, the MODFLOW code was used for the development of a three-dimensional model to simulate groundwater flow. The injection of water into the aquifer was considered to be achieved through fifteen (15) existing irrigation wells. Twenty-eight (28) different scenarios of artificial recharge were examined and the variation of piezometric head with time as well as the quantity of water that is stored in the aquifer during the simulation time were computed for all scenarios. The implementation of the model showed that artificial recharge of even a small duration of time had a positive effect on the aquifer.

Key words: aquifer, artificial recharge, numerical simulation, finite-difference methods

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Για την αντιμετώπιση της λειψυδρίας στην περιοχή Ριζού-Πετριάς-Αρσενίου στο Ν. Πέλλας ανορύχθηκαν, κατά τα έτη 1990-1993, αρδευτικές γεωτρήσεις, οι οποίες παρόλο που έλυσαν προσωρινά το πρόβλημα της ανεπάρκειας του αρδευτικού νερού, είχαν ως επακόλουθο την υπεράντληση του υδροφόρου και την προοδευτική μείωση της παροχής των γεωτρήσεων εξαιτίας της πτώσης στάθμης του νερού σε αυτές. Η λειτουργία των υπαρχουσών γεωτρήσεων αλλά και αυτών που θα κατασκευασθούν μελλοντικά στην ευρύτερη περιοχή, εκτιμάται ότι θα οδηγήσουν στην ένταση των παραπάνω προβλημάτων με μη αναστρέψιμες περιβαλλοντικές επιπτώσεις και με σημαντικές οικονομικές και κοινωνικές συνέπειες.

Για τους παραπάνω λόγους, στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος του Ινστιτούτου Εγγείων Βελτιώσεων του Εθνικού Ιδρύματος Αγροτικής Έρευνας (ΕΘ.Ι.ΑΓ.Ε.) τα έτη 1993-1996 και σε συνεργασία με τον τομέα Εγγείων Βελτιώσεων, Εδαφολογίας και Γεωργικής Μηχανικής της Γεωπονικής Σχολής του Α.Π.Θ. έγινε διερεύνηση εφαρμογής της μεθόδου του τεχνητού εμπλουτισμού του υδροφόρου της περιοχής, από νερό προερχόμενο από πηγή που βρίσκεται πλησίον του οικισμού των Σεβαστειανών. Εκτελέστηκαν πειράματα τεχνητού εμπλουτισμού με θετικά αποτελέσματα (Βαφειάδης κ.α., 1994; Βαφειάδης και

Πανώρας, 1996α,β; Πανώρας και Βαφειάδης, 1999) και προτάθηκε να χρησιμοποιηθούν για την εφαρμογή τεχνητού εμπλουτισμού δεκαπέντε (15) υφιστάμενες γεωτρήσεις του δικτύου του ΤΟΕΒ Έδεσσαίου, στην περιοχή δικαιοδοσίας του οποίου ανήκουν τα αγροκτήματα του Ριζού, της Πετριάς και του Αρσενίου.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας MODFLOW μέσα από το γραφικό περιβάλλον του Argus One, για την ανάπτυξη ενός τριδιάστατου μοντέλου για την προσομοίωση του φαινομένου του τεχνητού εμπλουτισμού του υδροφόρου της περιοχής. Καθορίστηκαν και εκτελέστηκαν αρχικά δύο βασικά σενάρια χωρίς τεχνητό εμπλουτισμό, τα οποία χρησιμεύουν ως σενάρια αναφοράς για την αξιολόγηση του τεχνητού εμπλουτισμού στον υδροφόρο. Τα σενάρια αναφοράς αφορούν το ένα την προσομοίωση του υδροφόρου, όταν η τροφοδοσία του με νερό είναι κανονική και το άλλο όταν η τροφοδοσία του είναι μειωμένη. Η χρονική διάρκεια της προσομοίωσης για κάθε σενάριο είναι περίπου τρία έτη (1188 ημέρες). Ο τεχνητός εμπλουτισμός εφαρμόστηκε στο βασικό σενάριο των μειωμένων εισροών, είχε διάρκεια ενός, δύο, τριών ή έξι μηνών ανά υδρολογικό έτος και εφαρμόστηκε σε διαδοχικά ή μη έτη, με σταθερή παροχή εμπλουτισμού. Μελετήθηκαν συνολικά είκοσι οκτώ (28) διαφορετικά σενάρια τεχνητού εμπλουτισμού

μέσω δεκαπέντε (15) υδρογεωτρήσεων διπλού σκοπού. Υπολογίζεται, για όλα τα σενάρια, η μεταβολή με το χρόνο της πιεζομετρικής στάθμης και η ποσότητα του νερού που αποθηκεύεται στον υδροφορέα κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Προκύπτει ότι προκαλείται ικανοποιητική άνοδος του πιεζομετρικού φορτίου ακόμη και για μικρής χρονικής διάρκειας τεχνητό εμπλουτισμό.

2. ΚΑΤΑΡΤΙΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

2.1. Κώδικας MODFLOW - Εξίσωση κίνησης υπόγειου νερού

Η γενική μορφή της εξίσωσης που περιγράφει την κίνηση του υπόγειου νερού σταθερής πυκνότητας διαμέσου ενός πορώδους υλικού, και χρησιμοποιείται στον κώδικα MODFLOW είναι η παρακάτω μερική διαφορική εξίσωση (McDonald and Harbaugh, 1988):

$$\frac{\partial}{\partial x} (K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z}) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.1)$$

όπου: K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} : οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας κατά τη διεύθυνση των αξόνων συντεταγμένων x , y και z αντίστοιχα, οι οποίοι θεωρούνται ότι είναι παράλληλοι με τους κύριους άξονες της υδραυλικής αγωγιμότητας $[L/T]$, h : το πιεζομετρικό φορτίο $[L]$, W : οι εξωτερικές εισροές ή εκροές ανά μονάδα όγκου $[T^{-1}]$, S_s : η ειδική αποθηκευτικότητα του πορώδους μέσου $[L^{-1}]$ και t : ο χρόνος $[T]$.

Η επίλυση της εξίσωσης ροής του υπόγειου νερού με τον κώδικα MODFLOW γίνεται με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών. Στη μέθοδο αυτή, το συνεχές σύστημα που περιγράφεται από την εξίσωση (2.1) αντικαθίσταται από ένα πεπερασμένο αριθμό σημείων στο χώρο και στο χρόνο, ενώ οι μερικές παράγωγοι αντικαθίστανται από όρους που υπολογίζονται από τις διαφορές των φορτίων στα σημεία αυτά. Η διαδικασία αυτή οδηγεί σε ένα σύστημα γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων, η επίλυση του οποίου δίνει τιμές φορτίου σε συγκεκριμένο χώρο και χρόνο.

2.2. Οριοθέτηση και χωρική διακριτοποίηση του υδροφορέα

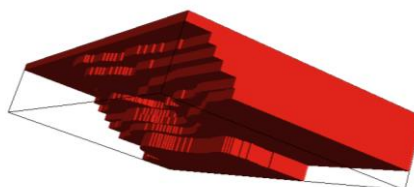
Ο υπόγειος υδροφορέας που μελετήθηκε είναι ένας υπό πίεση υδροφορέας που αποτελείται από επάλληλα κλειστά υπό πίεση γεωλογικά στρώματα με υδραυλική επικοινωνία μεταξύ τους. Το πάχος του υδροφορέα αυξάνεται βαθμιαία από τα 20-40 m στα δυτικά μέχρι τα 160 m στα ανατολικά της περιοχής μελέτης. Τα όρια του υδροφορέα επιλέχθηκαν έτσι ώστε να προσεγγίζουν κατά το δυνατό τα φυσικά γεωγραφικά όρια της περιοχής. Έτσι, ως δυτικό όριο σχεδιάστηκε μία ευθεία γραμμή η οποία ακολουθεί περίπου το σχηματισμό των ορεινών όγκων και διαχωρίζει την υπόλοιπη πεδινή περιοχή. Το όριο αυτό αποτελεί την πηγή φόρτισης του υδροφορέα από τα καρστικά νερά των ασβεστολιθικών πετρωμάτων και το τμήμα των κατακρημνισμάτων που διηθείται πλευρικά. Προσομοιώθηκε στο MODFLOW με το πακέτο Wells (WEL) τοποθετώντας σε όλο το μήκος του πηγάδια φόρτισης (Injection

wells). Ως ανατολικό όριο σχεδιάστηκε επίσης μία ευθεία γραμμή, η οποία ακολουθεί περίπου την ισοπιεζομετρική καμπύλη των 17 m ανατολικά της περιφερειακής τάφρου (T66). Το όριο αυτό προσομοιώθηκε με το πακέτο Constant Head (CHD), ως όριο προκαθορισμένου φορτίου. Ως βόρειο όριο της περιοχής μελέτης σχεδιάστηκε μια ευθεία παράλληλη προς τη διεύθυνση ροής του ποταμού Εδεσσαίου, η οποία είναι παράλληλη και προς τη ροή του υπόγειου νερού. Ως νότιο όριο της περιοχής μελέτης λήφθηκε το γεωγραφικό όριο μεταξύ των Νομών Πέλλας και Ημαθίας, όπου οι γραμμές ροής είναι παράλληλες προς το όριο αυτό. Τόσο το βόρειο όσο και το νότιο όριο, όπως προκύπτει από την πιεζομετρία, αποτελούν όρια μηδενικής ροής.

Με βάση τα όρια του υδροφορέα και αφού πρώτα ορίστηκε το μέγεθος των κελιών κατά τη x και y -διεύθυνση (50×50 m), σχεδιάστηκε στη συνέχεια ο κάρναβος που καλύπτει την υπό μελέτη περιοχή.

Το μεταβλητό πάχος του υδροφορέα προσομοιώθηκε με τη χωρική του διακριτοποίηση κατά τον κατακόρυφο άξονα σε 7 ξεχωριστές γεωλογικές ενότητες (Σχήμα 1), οι οποίες συνδέονται υδραυλικά μεταξύ τους. Οι ενότητες αριθμούνται από πάνω προς τα κάτω.

Η πρώτη γεωλογική ενότητα αντιστοιχεί στην οροφή του υδροφορέα και το υψόμετρο της οροφής της (top elevation) ορίστηκε ίσο με μηδέν. Η βάση κάθε γεωλογικής ενότητας (bottom elevation) συνδέθηκε με την οροφή της επόμενης. Το πάχος των ενότητων είναι 20 m για τις πρώτες έξι γεωλογικές ενότητες και 40 m για την έβδομη. Εκτός από την πρώτη ενότητα η οποία καλύπτει ολόκληρη την επιφάνεια του καννάβου, οι υπόλοιπες έξι καλύπτουν η κάθε μια διαφορετική επιφάνεια στον κάρναβο. Αυτό επιτεύχθηκε ορίζοντας σε κάθε γεωλογική ενότητα μια περιοχή η οποία αποτελείται από κελιά που δεν είναι ενεργά και δε συμμετέχουν στη διαδικασία της προσομοίωσης. Ο ορισμός της περιοχής αυτής έγινε σχηματίζοντας σε κάθε ενότητα δύο διακριτά τμήματα στον κάρναβο, από τα οποία το ένα αποτελεί την ενεργή και το άλλο την ανενεργή περιοχή. Προχωρώντας διαδοχικά προς τις κατώτερες γεωλογικές ενότητες, αυξάνοντας κάθε φορά την έκταση της ανενεργής επιφάνειας, εκείνη που απομένει ως ενεργή σχηματίζει στο σύνολό της το μεταβλητό πάχος του υδροφορέα σε όλη την περιοχή μελέτης, το οποίο αυξάνει από δυτικά προς ανατολικά, όπως δείχνει το Σχήμα 1.

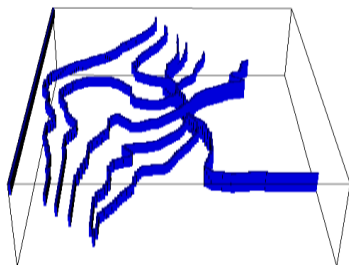


Σχήμα 1. Τριδιάσταση απεικόνιση της γεωμετρίας του υδροφορέα

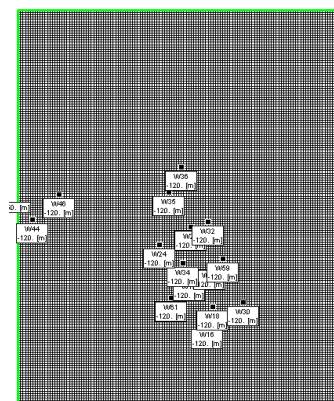
Η πρώτη ενότητα, όπως προαναφέρθηκε, είναι ενεργή σε όλη την έκτασή της. Αποτελείται από κελιά διαστάσεων $50 \text{ m} \times 50 \text{ m} \times 20 \text{ m}$. Συγκεκριμένα, με τις 172 στήλες και τις 131 γραμμές που υπάρχουν,

καλύπτεται έκταση 56,33 km², με τις αποστάσεις στο οριζόντιο επίπεδο να διαμορφώνονται στα 6550 m και στα 8600 m στη x και y-διεύθυνση, αντίστοιχα, ενώ ως προς τη z-διεύθυνση η μία μόνο στρώση κελιών έχει ύψος 20 m.

Στο δυτικό όριο η πρώτη σειρά των ενεργών κελιών απεικονίζει τα πηγάδια της πλευρικής φόρτισης του υδροφορέα (Σχήμα 2).



Σχήμα 2. Απεικόνιση της τοποθέτησης των πηγαδίων πλευρικής φόρτισης του υδροφορέα



Σχήμα 3. Θέση των γεωτρήσεων εμπλουτισμού στον κώνναβο

Για την κατάρτιση και εφαρμογή του μοντέλου του υδροφορέα με σκοπό την αξιολόγηση του τεχνητού εμπλουτισμού, ελήφθησαν υπόψη τα εξής:

- Χρησιμοποιήθηκαν για τον τεχνητό εμπλουτισμό υφιστάμενες υδρογεωτρήσεις στην περιοχή (Σχήμα 3), οι οποίες λειτουργούσαν ως γεωτρήσεις άντλησης, αλλά ταυτόχρονα εξοπλίστηκαν και για την εφαρμογή μέσω αυτών, του νερού εμπλουτισμού.

- Ήταν γνωστή η μέση παροχή άντλησης των γεωτρήσεων, οπότε η παροχή εμπλουτισμού λήφθηκε ίση με το μισό περίπου της παροχής άντλησης. Η τιμή της παροχής άντλησης είναι μία μέση τιμή παροχής των γεωτρήσεων της περιοχής και τα δεδομένα πάρθηκαν από το μητρώο που διατηρεί ο ΤΟΕΒ Εδεσσαίου, στην περιοχή δικαιοδοσίας του οποίου ανήκουν οι γεωτρήσεις της περιοχής μελέτης.

- Χρησιμοποιήθηκε το πακέτο Well Package (WEL) του MODFLOW για την προσομοίωση τόσο της άντλησης όσο και του τεχνητού εμπλουτισμού μέσω αυτών των 15 γεωτρήσεων.

- Για να προσομοιωθεί η άντληση και από την υπόλοιπη περιοχή μελέτης, χρησιμοποιήθηκε το πακέτο Recharge (RCH) του MODFLOW, στο οποίο εισάγεται, για τις περιόδους της άντλησης, η επιλεγμένη παροχή άντλησης με αρνητικό πρόσημο.

Η ποσότητα άντλησης από την υπόλοιπη περιοχή προέρχεται μόνο από την πρώτη γεωλογική ενότητα και θεωρήθηκε ότι είναι ίση με την ποσότητα η οποία αντλείται από τις 15 γεωτρήσεις.

2.3. Χρονική διακριτοποίηση

Επειδή περιγράφεται φαινόμενο ασταθούς ροής, διακριτοποιήθηκε και η μεταβλητή του χρόνου. Η συνολική περίοδος προσομοίωσης (1188 d) χωρίστηκε σε έντεκα (11) χρονικές περιόδους (stress periods) και επιλέχθηκε σταθερό ημερήσιο χρονικό βήμα ($\Delta t=1d$). Ως κριτήριο σύγκλισης λήφθηκε η τιμή 0,001 m για το κριτήριο HCLOSE και η τιμή 100 m³/d για το κριτήριο RCLOSE.

2.4. Ρύθμιση και επαλήθευση

Με βάση τα αποτελέσματα δοκιμαστικών αντλήσεων σε γεωτρήσεις της περιοχής τα οποία παρουσιάζονται στη διδακτορική διατριβή της Ράπτη (1996), ελήφθη η διοχετευτικότητα (T) του υδροφορέα στο δυτικό όριο ίση με 1000 m²/d.

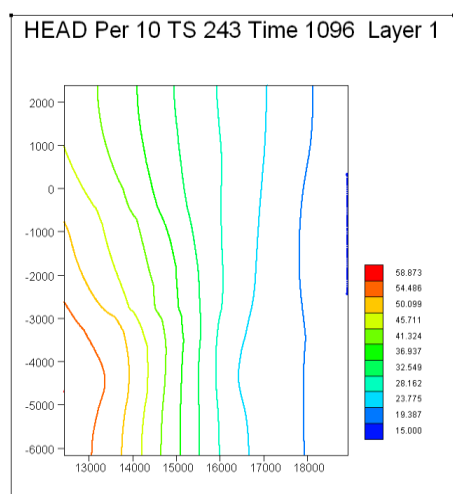
Χρησιμοποιώντας τον πιεζομετρικό χάρτη του Μαΐου 1991 και τη συγκεκριμένη τιμή της διοχετευτικότητας προσδιορίστηκε η πλευρική εισροή (Q) από το δυτικό όριο του υδροφορέα στα 56,000 m³/d. Επιπλέον, η ποσότητα αυτή θεωρήθηκε ότι μεταβάλλεται μέσα στο έτος με μια αναλογία 4/5 (από 56,000 σε 44,800 m³/d). Βρέθηκε ότι με τον τρόπο αυτό υπολογίζεται μία μέση διακύμανση του φορτίου στον υδροφορέα η οποία προσεγγίζει την παρατηρηθείσα διακύμανση στη διάρκεια ενός έτους.

Για την υδραυλική αγωγιμότητα (K) επιλέχθηκε η μέση τιμή των 8 m/d για το μεγαλύτερο μέρος της περιοχής, ενώ με δεδομένη την υπολογισθείσα πλευρική εισροή τροποποιήθηκαν, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της δοκιμής και σφάλματος, οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας σε τρεις υποπεριοχές της περιοχής μελέτης. Οι τιμές διαμορφώθηκαν έτσι στα 2 m/d κοντά στο νότιο όριο, στα 4 m/d στο κέντρο και νότια της περιοχής των γεωτρήσεων (ή της περιοχής όπου βρίσκονται 13 γεωτρήσεις του ΤΟΕΒ) και στα 11,2 m/d στο βορειοδυτικό τμήμα της περιοχής. Αυτό έγινε ώστε να προσεγγίζεται ικανοποιητικά η κατανομή του πιεζομετρικού φορτίου σε όλη την περιοχή, για συνθήκες σταθερής ροής του Μαΐου 1991 (Σχήμα 4).

Το όριο προκαθορισμένου φορτίου το οποίο αντιπροσωπεύει το ανατολικό όριο της περιοχής, μεταβάλλεται τόσο κατά θέσεις όσο και με το χρόνο. Συγκεκριμένα, μεταβάλλεται κατά 0,5 m το μήνα κι έτσι κατά την περίοδο της άρδευσης (Ιούνιο-Ιούλιο-Αύγουστο) μειώνεται από 17 m σε 12,5 m και μέχρι τέλη Μαΐου έχει επανέλθει στα 17 m. Η επιλογή αυτή έγινε γιατί με βάση τις μετρήσεις του έτους 1991, προκύπτει ότι υπάρχει μια διακύμανση του φορτίου μέσα στο έτος, που είναι περίπου 4,5 m. Η υψηλότερη τιμή παρατηρείται το Μάιο και η χαμηλότερη τον Οκτώβριο.

Η επαλήθευση του μοντέλου έγινε με βάση τα δεδομένα ενός πειράματος που πραγματοποιήθηκε στη γεώτρηση Π34 της Πετριάς. Οι τιμές του μετρημένου και του υπολογισμένου πιεζομετρικού φορτίου σε γεώτρηση παρατήρησης είχαν απόκλιση

μισού μέτρου, ακρίβεια η οποία κρίνεται ικανοποιητική, καθώς η τιμή του υπολογισμένου με το πρόγραμμα φορτίου αναφέρεται στο κελί και όχι στο σημείο της γεώτρησης παρατήρησης.



Σχήμα 4. Ισοπιεζομετρικές καμπύλες για τη σταθερή κατάσταση του Μαΐου 1991

3.ΒΑΣΙΚΑ ΣΕΝΑΡΙΑ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ

3.1. Βασικά Σενάρια

Το πρώτο βασικό σενάριο απεικονίζει την κατάσταση του υδροφορέα κατά την οποία οι εισροές εκτιμήθηκαν με βάση τον πιεζομετρικό χάρτη του Μαΐου 1991. Οι εισροές αυτές θεωρήθηκε ότι μεταβάλλονται μέσα στο έτος με μια αναλογία 4/5.

Το δεύτερο σενάριο απεικονίζει την περίπτωση όπου η πλευρική εισροή νερού στον υδροφορέα είναι μειωμένη κατά 20%. Αυτό έγινε καθώς με βάση τα βροχομετρικά στοιχεία της περιοχής μελέτης παρατηρήθηκαν διαδοχικά έτη με μειωμένο ύψος βροχόπτωσης σε σχέση με το μέσο όρο που αναμενόταν στην περιοχή, συχνά και τρία συνεχόμενα χρόνια και συνεπώς θεωρήθηκε ότι και οι εισροές στον υδροφορέα θα είναι μειωμένες.

Η αρδευτική περίοδος θεωρήθηκε ότι διαρκεί 92 ημέρες (Ιούνιο-Ιούλιο-Αύγουστο) και ο ρυθμός άντλησης των γεωτρήσεων είναι $100 \text{ m}^3/\text{hr}$ για 18ωρη λειτουργία τους την ημέρα. Κάθε γεώτρηση αντλεί $165,600 \text{ m}^3$ σε όλη την αρδευτική περίοδο. Επιπλέον, θεωρήθηκε ότι υπάρχει ισόποση άντληση και από άλλες γεωτρήσεις οι οποίες είναι διάσπαρτες και ομοιόμορφα κατανεμημένες σε όλη την περιοχή μελέτης.

Η διάρκεια της προσομοίωσης για τα δύο βασικά σενάρια είναι 1188 ημέρες και χωρίστηκε σε έντεκα (11) χρονικές περιόδους (stress periods).

3.2. Τεχνητός εμπλουτισμός

Ο τεχνητός εμπλουτισμός εφαρμόστηκε στο βασικό σενάριο των μειωμένων εισροών.

Η διάρκεια της προσομοίωσης κάθε φορά είναι 1188 ημέρες. Χωρίστηκε σε δεκατέσσερις (14) χρονικές περιόδους (αντί για 11 των δύο σεναρίων αναφοράς) και εφαρμόστηκε τεχνητός εμπλουτισμός τον ένα χρόνο, τα δύο ή και τα τρία χρόνια, καθώς

και σε διάφορους συνδυασμούς αυτών. Προέκυψε έτσι ένα σύνολο 28 σεναρίων. Ο εμπλουτισμός επιλέχθηκε να διαρκεί 1, 2, 3 ή 6 μήνες ανά έτος. Ο μηνιαίος εμπλουτισμός γίνεται το μήνα Μάιο. Ο δίμηνος τους μήνες Απρίλιο και Μάιο, ο τρίμηνος τους μήνες Μάρτιο-Απρίλιο-Μάιο, και ο εξάμηνος τους μήνες Δεκέμβριο ως Μάιο.

Ο ρυθμός εμπλουτισμού είναι $50 \text{ m}^3/\text{hr}$ ή $900 \text{ m}^3/\text{d}$ για κάθε γεώτρηση. Με τις 15 επιλεγμένες γεωτρήσεις η ημερήσια ποσότητα νερού η οποία διοχετεύεται στον υδροφορέα είναι $13,500 \text{ m}^3$. Η ποσότητα αυτή αντιστοιχεί στη μισή εκείνης που αντλείται από τις 15 υδρογεωτρήσεις.

Στο Σχήμα 5α παρουσιάζεται η επίδραση του εξάμηνου εμπλουτισμού (Δεκέμβριο ως Μάιο) κατά το δεύτερο έτος της προσομοίωσης. Παρατηρείται σημαντική επίδραση κατά το χρόνο στον οποίο αυτός εφαρμόζεται, ενώ στο τέλος της περιόδου αυτής, το φορτίο ξεπερνάει αρκετά την τιμή εκείνου που αντιστοιχεί στο βασικό σενάριο με τις μειωμένες εισροές και φυσική τροφοδοσία του υδροφορέα κατά περίπου 3m, ενώ ξεπερνά ακόμη και το φορτίο που αντιστοιχεί στο βασικό σενάριο με τις κανονικές εισροές κατά 1,16m. Στη συνέχεια σταδιακά μειώνεται και τον τρίτο χρόνο πλησιάζει στα επίπεδα του σεναρίου με τις μειωμένες εισροές.

Στο Σχήμα 5β όπου παρουσιάζεται η εφαρμογή του εξάμηνου εμπλουτισμού και στα τρία χρόνια της προσομοίωσης, φαίνεται ότι αυτός έχει σημαντική επίδραση σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Στα χρονικά διαστήματα κατά τα οποία εφαρμόζεται, το φορτίο είναι υψηλότερο εκείνου και των δύο βασικών σεναρίων. Στο τέλος κάθε χρόνου εμπλουτισμού, η τιμή του πιεζομετρικού φορτίου είναι υψηλότερη τόσο του σεναρίου με τη μειωμένη φυσική τροφοδοσία του υδροφορέα (κατά 3,02m, 3,51m και 3,76m), όσο και του σεναρίου με την κανονική φυσική τροφοδοσία και χωρίς τεχνητό εμπλουτισμό του υδροφορέα (κατά 1,94m, 1,71m και 1,52m).

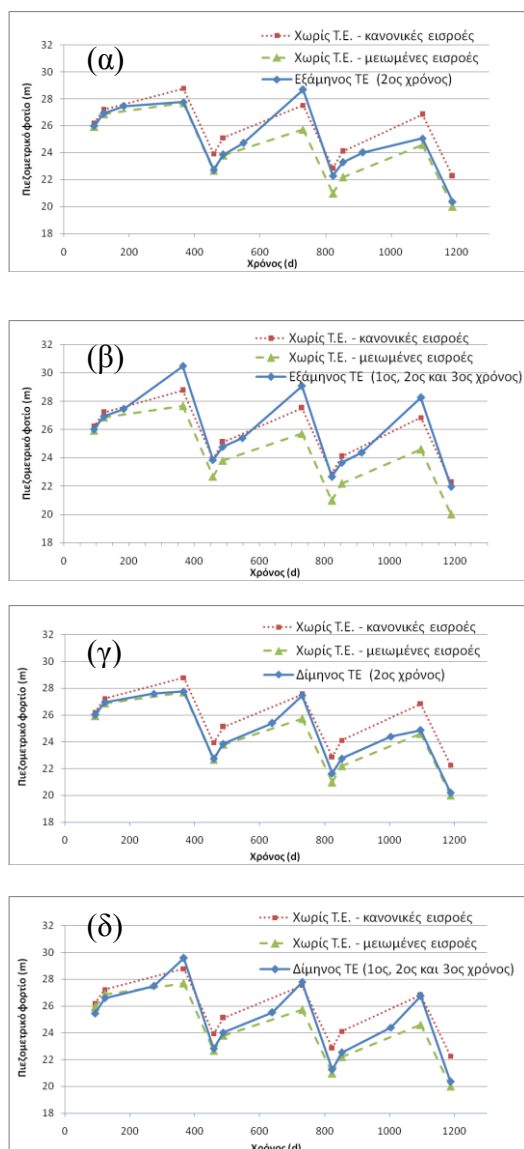
Στο Σχήμα 5γ παρουσιάζεται η επίδραση του δίμηνου εμπλουτισμού (Απρίλιο και Μάιο) κατά το δεύτερο έτος της προσομοίωσης. Στο τέλος της προσομοίωσης το φορτίο βρίσκεται στα επίπεδα του σεναρίου των μειωμένων πλευρικών εισροών χωρίς τεχνητό εμπλουτισμό. Η επίδραση του τεχνητού εμπλουτισμού κράτησε ένα υδρολογικό έτος.

Στο Σχήμα 5δ όπου παρουσιάζεται η εφαρμογή του δίμηνου εμπλουτισμού και στα τρία χρόνια της προσομοίωσης, φαίνεται ότι αυτός έχει επίδραση σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Στο δίμηνο όπου αυτός εφαρμόζεται, το φορτίο φτάνει περίπου εκείνου που αντιστοιχεί στο βασικό σενάριο με τις κανονικές εισροές και χωρίς τεχνητό εμπλουτισμό, ενώ στην υπόλοιπη διάρκεια είναι λίγο πιο ψηλά από το φορτίο του σεναρίου με τις μειωμένες εισροές.

Από τις παραπάνω εφαρμογές παρατηρείται ότι η επίδραση του εξάμηνου τεχνητού εμπλουτισμού είναι σημαντική στο μεγαλύτερο τμήμα του υδροφορέα κατά το έτος εφαρμογής του εμπλουτισμού. Όταν ο τεχνητός εμπλουτισμός εφαρμόζεται συνεχόμενα έτη, η πιεζομετρική στάθμη

διατηρείται διαρκώς σε υψηλά επίπεδα.

Η εφαρμογή **δύμηνου** τεχνητού εμπλουτισμού έχει καλύτερο αποτέλεσμα στην περιοχή όταν γίνεται επί τρία συνεχόμενα έτη καθώς η ποσότητα του νερού εμπλουτισμού που εισέρχεται στον υδροφόρο το διάστημα αυτό, είναι μικρή σε σχέση με εκείνη που απομακρύνεται με τις αντλήσεις. Κατά το χρόνο εφαρμογής του εμπλουτισμού, το φορτίο πλησιάζει εκείνο του σεναρίου με τις κανονικές εισροές, ενώ κατά τις περιόδους των αντλήσεων δεν κατεβαίνει στα επίπεδα του σεναρίου με τις μειωμένες εισροές.



Σχήμα 5. Μεταβολή του πιεζομετρικού φορτίου με το χρόνο στο κελί (109,75) του καννάβου.

Από την εκτέλεση των σεναρίων **τρίμηνου** τεχνητού εμπλουτισμού προέκυψαν τιμές πιεζομετρικού φορτίου οι οποίες κυμαίνονται μεταξύ εκείνων που αντιστοιχούν στα αντίστοιχα σενάρια του εξαμήνου και του δώμηνου τεχνητού εμπλουτισμού.

Τέλος, σε ότι αφορά τον **μηνιαίο** τεχνητό εμπλουτισμό, βρέθηκε ότι αυτός δεν είναι ασήμαντος παρόλο που η ποσότητα του νερού εμπλουτισμού είναι μικρή. Κατά τη διάρκεια του τεχνητού εμπλουτισμού το πιεζομετρικό φορτίο τείνει να

πλησιάζει εκείνο του σεναρίου με τις κανονικές εισροές και μετά το τέλος των αντλήσεων βρίσκεται να είναι ελάχιστα πιο ψηλά από εκείνο του σεναρίου με τις μειωμένες εισροές και χωρίς τεχνητό εμπλουτισμό του υδροφόρου.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο τέλος της προσομοίωσης των 3 ετών ($t=1188d$), μόνο σε ορισμένα σενάρια του εξαμήνου τεχνητού εμπλουτισμού το πιεζομετρικό φορτίο προσεγγίζει το αντίστοιχο του σεναρίου χωρίς τεχνητό εμπλουτισμό αλλά με κανονική πλευρική εισροή νερού στον υδροφόρο. Στα υπόλοιπα το πιεζομετρικό φορτίο βρίσκεται στα επίπεδα του βασικού σεναρίου με τη μειωμένη πλευρική εισροή στον υδροφόρο.

Γενικά, στα έτη κατά τα οποία δεν εφαρμόζεται εμπλουτισμός, παρατηρείται σημαντική πτώση της πιεζομετρικής στάθμης, η οποία στο τέλος της περιόδου των αντλήσεων πλησιάζει εκείνη του σεναρίου με τις μειωμένες εισροές χωρίς τεχνητό εμπλουτισμό.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Βαφειάδης, Π., Πανώρας, Α., και Αναγνωστόπουλος, Κ., 1994. "Πείραμα τεχνητού εμπλουτισμού των υδροφόρων στρωμάτων της περιοχής Πετραίας Ν. Πέλλης με τη χρήση αρδευτικής γέωτρησης". Πρακτικά 7ου συνεδρίου της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας με έμφαση στη Γεωλογία της Μακεδονίας και Θράκης. Θεσσαλονίκη, 25-27/5/1994.
- Βαφειάδης, Π., και Πανώρας, Α., 1996α. "Διερεύνηση εφαρμογής τεχνητού εμπλουτισμού με τη μέθοδο της υπόγειας διήθησης σε ηφαιστειογενή υδροφόρα της περιοχής Ριζού Ν. Πέλλης". 2ο Πανελλήνιο Συνέδριο ΓΕΩΤΕΕ με θέμα "Εγγειοβελτιωτικά Έργα-Διαχείριση Υδατικών Πόρων-Εκμηχάνιση Γεωργίας". Λάρισα, 24-27 Απριλίου 1996.
- Βαφειάδης, Π., και Πανώρας, Α., 1996β. "Εφαρμογή τεχνητού εμπλουτισμού των υδροφόρων στρωμάτων στην περιοχή Ριζού - Πετραίας - Αρσενίου Ν. Πέλλας" - Τελική Έκθεση (Φορέας εκπόνησης: ΕΘ.Ι.ΑΓ.Ε, Νοέμβριος 1996).
- Πανώρας, Α., και Βαφειάδης, Π., 1999. "Εφαρμογές τεχνητού εμπλουτισμού των υδροφόρων στρωμάτων του Νομού Πέλλας". Πρακτικά Ημερίδας της Ελληνικής Επιτροπής Υδρογεωλογίας με θέμα "Τεχνητός εμπλουτισμός υπόγειων υδροφορέων". Ξάνθη, 28/5/1999, σελ. 154-160.
- Ράπτη, Δ., 1996. "Υδρογεωλογικές έρευνες στην περιοχή Σκύδρας - Επισκοπής (Κεντρική Μακεδονία)". Διδακτορική Διατριβή, Θεσσαλονίκη.
- McDonald, M.G., and Harbaugh, A.W., 1988. "A modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model", Techniques of Water-Resources Investigations 06-A1, USGS, pp.576.
- U.S.G.S. MODFLOW-2005, The US Geological Survey Modular Ground-Water Flow Process, Chapter 16 of Book 6, Modeling Techniques, Section A. Ground Water.

ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΔΙΗΘΗΣΗ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΙΚΡΟΥ ΣΤΑΘΕΡΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

Α. Αγγελάκη¹, Σ. Κωνσταντάκος¹, Φ. Καψοσιδέρης¹, Μ. Σακελλαρίου-Μακρυντωνάκη¹

¹Εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής & Αγροτικού Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Πραγματοποιήθηκε προσομοίωση συνθηκών άρδευσης με εφαρμογή μικρού σταθερού φορτίου στην επιφάνεια του εδάφους στο εργαστήριο, ώστε να διερευνηθεί η αθροιστική διήθηση και οι υδροδυναμικές παράμετροι στην ακόρεστη ροή. Χρησιμοποιήθηκε ομογενοποιημένη εδαφική στήλη, για την οποία είχε προηγηθεί μηχανική ανάλυση (το έδαφος χαρακτηρίστηκε πηλώδης άμμος) καθώς και υπολογισμός της υδραυλικής αγωγιμότητας κορεσμού. Στη συνέχεια μελετήθηκε η αθροιστική διήθηση τόσο ογκομετρικά, όσο και με τη μέθοδο TDR, με εφαρμογή μικρού σταθερού φορτίου νερού στην επιφάνεια του εδάφους. Από τις μετρήσεις προέκυψε η καμπύλη αθροιστικής διήθησης σε συνάρτηση με το χρόνο και εξήχθη εξίσωση αθροιστικής διήθησης που προσομοιώνει τα πειραματικά σημεία. Επίσης, προσδιορίστηκαν οι τιμές της εδαφικής υγρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο καθώς και τα μέγιστα εδαφικής υγρασίας. Τέλος εκτιμήθηκε η απορροφητικότητα του εδάφους καθώς και η παράμετρος A της εξίσωσης του Philip.

Λέξεις Κλειδιά: Υδροδυναμικές παράμετροι εδάφους, Αθροιστική διήθηση νερού, απορροφητικότητα εδάφους

CUMULATIVE INFILTRATION UNDER CONSTANT HEAD BOUNDARY CONDITION

¹Laboratory of Agricultural Hydraulics, Department of Agriculture Crop Production and Rural Environment, University of Thessaly, Fytokou Street, N. Ionia, GR-38446, Volos, Greece
anaggel@uth.gr, msak@uth.gr

Cumulative infiltration under constant boundary condition was obtained in the laboratory, in order to investigate hydraulic parameters at vadose zone of a soil column (Loamy Sand). Hydraulic Conductivity at saturation was estimated, while cumulative infiltration data was collected both ways: volumetrically and using TDR probes at specific depths. Experimental data were used in order to design the cumulative infiltration curve. Experimental points were simulated by a 3rd-degree polynomial. Soil moisture profiles and soil moisture versus time were conceived, while soil Sorptivity and Philip's equation A parameter were estimated.

Key words: Hydraulic parameters, Cumulative infiltration, soil sorptivity

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διήθηση είναι μία πολύ σημαντική διαδικασία κατά τη διάρκεια της άρδευσης, γιατί από αυτήν εξαρτάται το ποσό του αρδευτικού νερού που θα εισέλθει στο έδαφος. Η μελέτη της κίνησης του νερού στο έδαφος, προαπαιτεί τη χρήση παραμέτρων και μεταβλητών, ώστε να είναι δυνατή η περιγραφή του φαινομένου από μαθηματική άποψη.

Αθροιστική διήθηση (cumulative infiltration I), είναι το ολοκλήρωμα της στιγμιαίας διηθητικότητας (ή ταχύτητας διήθησης) ως προς το χρόνο:

$$I = \int idt \quad (1)$$

Η αθροιστική διήθηση I ορίζεται και ως το ολοκλήρωμα ως προς το βάθος της εδαφικής υγρασίας $\theta(z,t)$:

$$I = \int_0^z (\theta - \theta_s) dz \quad (2)$$

όπου $\theta(z,t)$ είναι η εδαφική υγρασία στο χρόνο t και θ_s είναι η αρχική υγρασία του εδάφους. Η ταχύτητα διήθησης ή στιγμιαία διηθητικότητα ή απλώς διηθητικότητα δίνεται από τη σχέση $i = dI/dt$. Στην περίπτωση της κατακόρυφης διήθησης τα όρια των μεταβλητών $I(t)$ και $i(t)$ είναι:

$$\lim_{t \rightarrow 0} I(t) = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} I(t) = \infty \quad (3)$$

$$\lim_{t \rightarrow 0} i(t) = \infty, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} i(t) = K_s \quad (4)$$

όπου K_s είναι η υδραυλική αγωγιμότητα κορεσμού, δηλαδή η υδραυλική αγωγιμότητα που αντιστοιχεί στην υγρασία κορεσμού $\theta = \theta_s$.

Η αθροιστική διήθηση είναι συνάρτηση του χρόνου και η κλίση της μειώνεται προοδευτικά με το χρόνο και τείνει σε μία σταθερή τιμή. Η φυσική σημασία της αθροιστικής διήθησης είναι ότι εκφράζει αθροιστικά την ποσότητα του νερού που έχει περάσει σε μια δεδομένη χρονική στιγμή από την επιφάνεια του εδάφους.

Οι καμπύλες $i(t)$ και $I(t)$ είναι μεγάλης σημασίας για τις αρδεύσεις, γιατί από αυτές μπορεί να καθοριστεί τόσο ο ρυθμός εφαρμογής του νερού, όσο και η διάρκεια της άρδευσης.

Η απορροφητικότητα (sorptivity S) του εδάφους, είναι το φυσικό χαρακτηριστικό που έχει το έδαφος να συγκρατεί το νερό εξαιτίας των τριχοειδών δυνάμεων και είναι συνάρτηση της αρχικής υγρασίας του εδάφους και της εφαρμοζόμενης οριακής συνθήκης.

Ο όρος απορροφητικότητα (Sorptivity) δόθηκε από τον Philip (Philip 1958, 1969), ως μια παράμετρος της εξίσωσης διήθησης που εξήγαγε από τα προφίλ υγρασίας και δίνεται από τη σχέση:

$$S^2 = 2K_s(\theta_1 - \theta_0)(H_0 - H_f) \quad (5)$$

όπου K_s είναι η κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα, θ_0 είναι η αρχική υγρασία του εδάφους, θ_1 είναι η εφαρμοζόμενη οριακή συνθήκη, H_0 είναι το μέτωπο πίεσης στην επιφάνεια του εδάφους (δηλαδή το ύψος του νερού στην επιφάνεια του εδάφους) και H_f είναι η ενεργός μύζηση στο υγρό μέτωπο.

Πειραματικά, η απορροφητικότητα μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τη σχέση (Philip 1969, Sakellariou-Makrantonaki 2002):

$$I = St^{1/2} \quad (6)$$

Ο Philip (1957) περιέγραψε την κατακόρυφη διήθηση με τις εξής δύο διπαμετρικές εξισώσεις:

$$I(t) = St^{1/2} + At \quad (7)$$

$$i(t) = \frac{1}{2} St^{-1/2} + A \quad (8)$$

Η εξίσωση (8) είναι η αντίστοιχη εξίσωση της στιγμιαίας διηθητικότητας. Οι δύο παράμετροι είναι η απορροφητικότητα S [$L^2 T^{-1}/2$] και η παράμετρος A [L/T], η οποία βρέθηκε ότι πρέπει να είναι μεταξύ των ορίων: $K_s/3 < A < 2K_s/3$ (Αντωνόπουλος, 1999). Η εξίσωση (7) ισχύει για μικρούς χρόνους διότι για $t \rightarrow \infty$ είναι $i(t) \approx A \neq K_s$.

Οι παράμετροι S και A μπορούν να προσδιοριστούν με διάφορους τρόπους. Ο Philip έχει ασχοληθεί επανειλημμένα με τη φυσική του φαινομένου της διήθησης και γενικότερα με την κίνηση του νερού στο έδαφος (Philip, 1973, 1983).

Σύμφωνα με τον Bouwer (1978) η απορροφητικότητα εξαρτάται από δύο παράγοντες: τη δομή του εδάφους και την αρχική περιεχόμενη στο έδαφος υγρασία.

Η απορροφητικότητα μπορεί επίσης να υπολογιστεί από τη σχέση (Vauclin et Haverkamp, 1985):

$$S^2 = 2 \int_{\theta_i}^{\theta_s} \theta \cdot D(\theta) d\theta \quad (9)$$

η οποία αποτελεί πρώτης τάξης προσέγγιση, ή από τη βέλτιστη (optimum) λύση του Parlange (1975):

$$S^2 = \int_{\theta_i}^{\theta_s} (1 + \theta) \cdot D(\theta) d\theta \quad (10)$$

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Κατά την πειραματική διαδικασία:

- Έγινε μηχανική ανάλυση του εδάφους, από την οποία το έδαφος χαρακτηρίστηκε πηλώδης άμμος.
- Σχεδιάστηκε η κοκκομετρική καμπύλη του εδάφους

- Μετρήθηκε η υδραυλική αγωγιμότητα κορεσμού (K_s) με τη μέθοδο του σταθερού φορτίου

- Μελετήθηκε πειραματικά η αθροιστική διήθηση του νερού σε κατακόρυφη ομογενοποιημένη στήλη εδάφους, με εφαρμογή λεπτού μικρού φορτίου νερού στην επιφάνεια του εδάφους.

Οι εισερχόμενοι όγκοι νερού προσδιορίστηκαν ογκομετρικά και χρησιμοποιήθηκε ταυτόχρονα για τη μέτρηση της εδαφικής υγρασίας σε διάφορα βάθη της εδαφικής στήλης, η μέθοδος TDR (Time Domain Reflectometry). Τοποθετήθηκαν 5 αισθητήρες TDR σε αποστάσεις 7,5 cm, 22,5 cm, 32,5 cm, 42,5 cm και 52,5 cm. Σημειώνεται εδώ ότι για άγνωστο λόγο, ο τελευταίος αισθητήρας (5ος) δεν κατέγραψε την εδαφική υγρασία στο λογισμικό της συσκευής.

Η πειραματική διάταξη εικονίζεται στο Σχ. 1

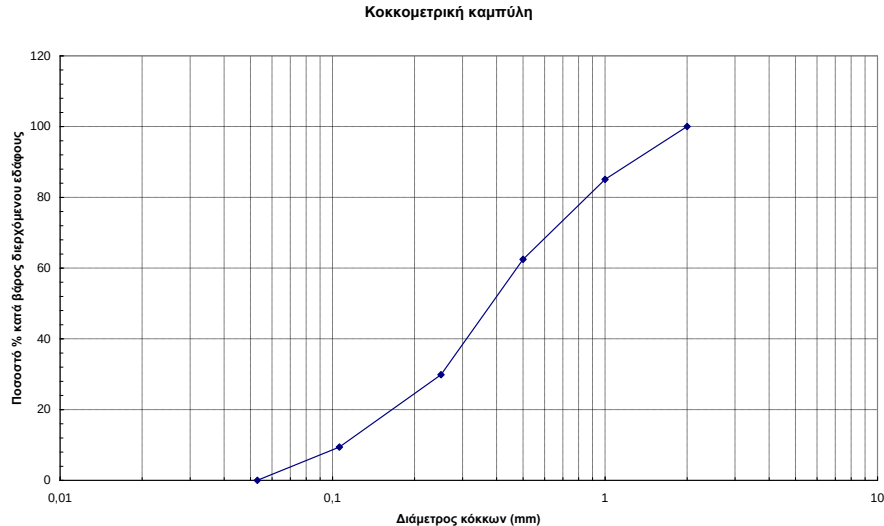


Σχ. 1. Πειραματική διάταξη για τη μελέτη αθροιστικής διήθησης

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ-ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Κατά την πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκε εδαφικό δείγμα με το οποίο πληρώθηκε στήλη από πλέξιγκλας εσωτερικής διαμέτρου 6 cm. Για την πλήρωση της στήλης εφαρμόστηκε ειδική μέθοδος, που να εξασφαλίζει την ομοιογένεια του εδάφους (Σακελλαρίου 1986, 1997). Από τη μηχανική ανάλυση του δείγματος το έδαφος χαρακτηρίστηκε ως πηλώδης άμμος και στη συνέχεια σχεδιάστηκε η κοκκομετρική καμπύλη σε ημιλογαριθμική κλίμακα (Σχ.2).

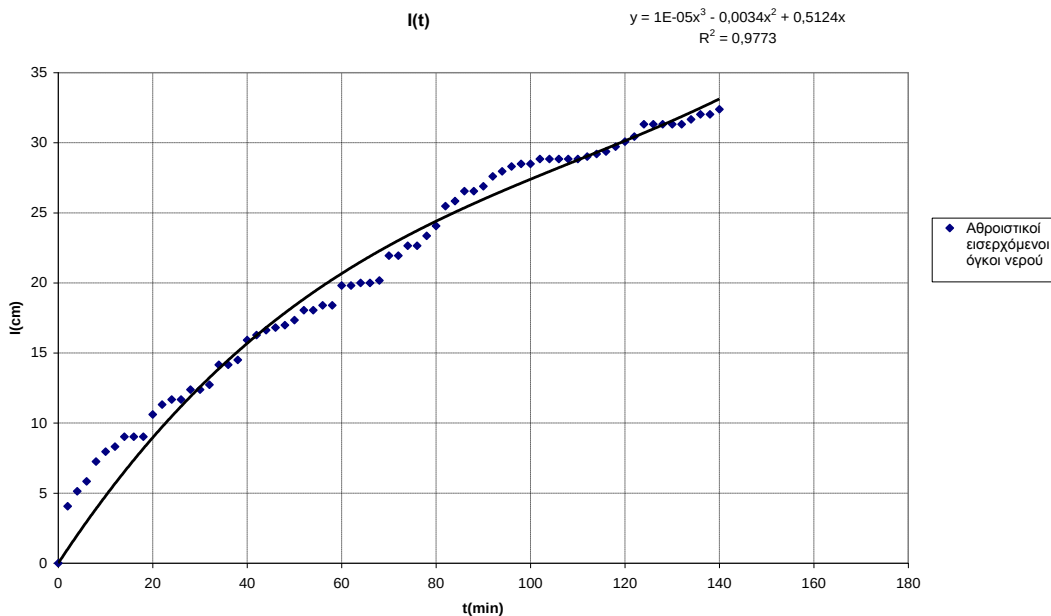
Η υδραυλική αγωγιμότητα κορεσμού μετρήθηκε με τη μέθοδο σταθερού φορτίου και βρέθηκε $K_s = 0,21$ cm/min.



Σχ. 2. Κοκκομετρική καμπύλη εδαφικού δείγματος

Στη συνέχεια, μελετήθηκε πειραματικά η αθροιστική διήθηση του νερού και τα μέτωπα υγρασίας στο εδαφικό δείγμα, εφαρμόζοντας μικρό φορτίο νερού (~ 2 mm) στην επιφάνεια του εδάφους και σημειώθηκαν οι αθροιστικοί εισερχόμενοι όγκοι νερού. Ταυτόχρονα, οι αισθητήρες TDR καταμετρούσαν την

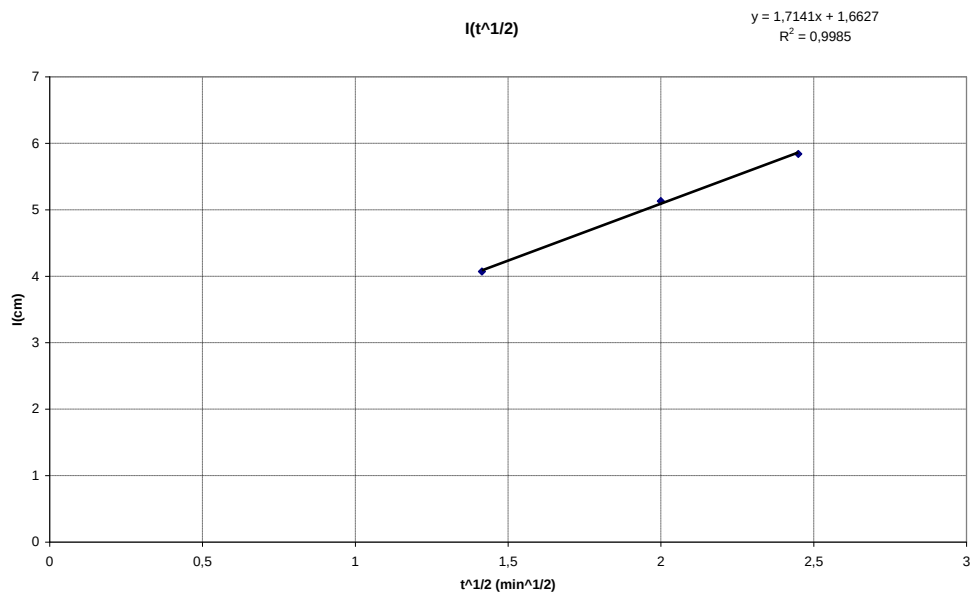
υγρασία σε διάφορα βάθη (Angelaki, 2004). Από τις μετρήσεις προέκυψε η καμπύλη αθροιστικής διήθησης σε συνάρτηση με το χρόνο $I(t)$, η οποία απεικονίζεται στο Σχ. 3 και η οποία προσομοιώθηκε με πολυώνυμο 3ου βαθμού (εξίσωση 9).



Σχ. 3. Αθροιστική διήθηση σε συνάρτηση με το χρόνο (ογκομετρικά)
 $I = 1E-05t^3 - 0,0034t^2 + 0,5124t$, $R^2 = 0,9773$ (9)

Για τους αρχικούς χρόνους διήθησης, όταν δεν έχουν δράσει οι δυνάμεις βαρύτητας, παρά μόνο οι τριχοειδείς δυνάμεις, μπορεί να εκτιμηθεί η απορροφητικότητα του εδάφους (Αγγελάκη, 2004, Angelaki, 2013). Έτσι, για τους αρχικούς χρόνους διήθησης, σχεδιάστηκε η γραφική παράσταση της αθροιστικής διήθησης σε συνάρτηση με την τετραγωνική ρίζα του χρόνου (Σχ. 4), από την κλίση της οποίας υπολογίστηκε η απορροφητικότητα του

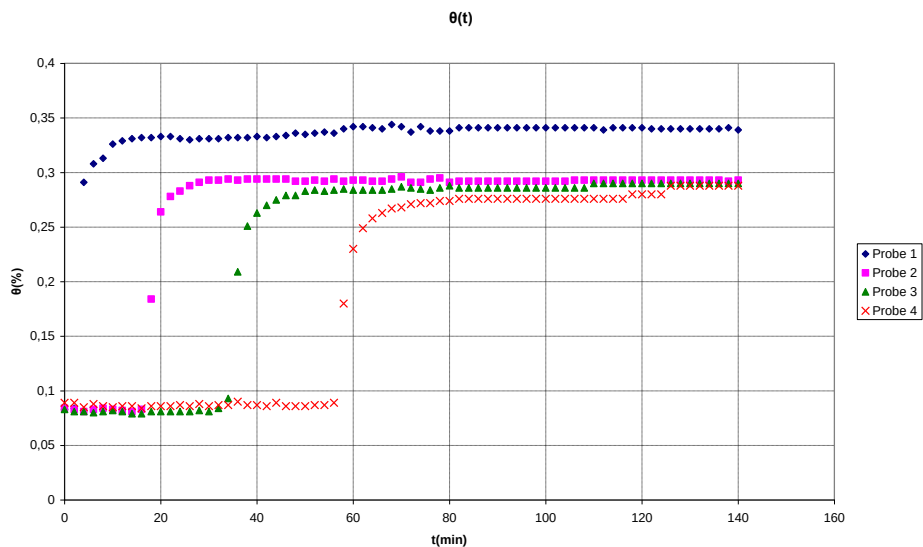
εδάφους, ίση με $S = 1,7141 \text{ cm/min}^{1/2}$. Χρησιμοποιώντας την τιμή απορροφητικότητας που υπολογίστηκε γραφικά, και χρησιμοποιώντας την εξίσωση (7) του Philip, υπολογίστηκε η παράμετρος A της εξίσωσης ίση με $A = 0,1316 \text{ cm/min}$, για την οποία ισχύει $K_s/3 < A < 2K_s/3$ (καθώς για $K_s = 0,21 \text{ cm/min}$ είναι: $K_s/3 = 0,07 \text{ cm/min}$ και $2K_s/3 = 0,14 \text{ cm/min}$).



Σχ. 4. Αθροιστική διήθηση σε συνάρτηση με την τετραγωνική ρίζα του χρόνου.

Κατά την πειραματική διαδικασία της αθροιστικής διήθησης, η εδαφική υγρασία μετρήθηκε καθ' όλη τη διάρκεια του φαινομένου, σε διάφορα βάθη της

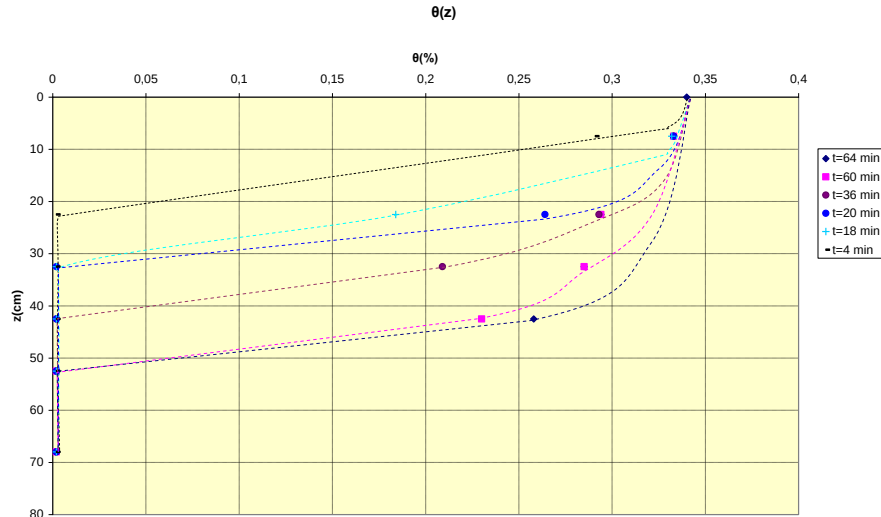
εδαφικής στήλης (7,5 cm, 22,5 cm, 32,5 cm, 42,5 cm). Οι μετρήσεις υγρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο δίνονται στο Σχ. 5.



Σχ. 5. Εδαφική υγρασία των τεσσάρων αισθητήρων TDR σε συνάρτηση με το χρόνο.

Στο Σχ. 6 παρουσιάζονται τα μέτωπα υγρασίας, δηλαδή η εδαφική κατ' όγκο υγρασία, όπως

μετρήθηκε από τους αισθητήρες TDR σε συνάρτηση με το βάθος.



Σχ. 6. Μέτωπα υγρασίας.

3. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Μελετήθηκε πειραματικά η αθροιστική διήθηση, όταν εφαρμόζεται μικρό σταθερό φορτίο νερού στην επιφάνεια εδαφικής στήλης, καταγράφοντας τους εισερχόμενους όγκους νερού, αλλά και καταγράφοντας μέσω συσκευής TDR την εδαφική υγρασία σε διάφορα βάθη. Οι πειραματικές μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν για να σχεδιαστεί η καμπύλη αθροιστικής διήθησης. Τα πειραματικά σημεία της αθροιστικής διήθησης προσομοιώθηκαν με πολυωνυμική εξίσωση 3^{ου} βαθμού. Επίσης εκτιμήθηκε η απορροφητικότητα του εδάφους και σχεδιάστηκαν τα μέτωπα υγρασίας. Τέλος, υπολογίστηκε η παράμετρος A της εξίσωσης αθροιστικής διήθησης του Philip. Όλα τα παραπάνω αποτελούν πολύτιμα εργαλεία για περαιτέρω έρευνα των υδροδυναμικών παραμέτρων, αλλά και για τον προγραμματισμό της άρδευσης.

4. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- A. Angelaki, M. Sakellariou – Makrantonaki, C. Tzimopoulos, 2013, "Theoretical and experimental research of cumulative infiltration", Transport in Porous Media (in press).
- A. Angelaki, M. Sakellariou – Makrantonaki, C. Tzimopoulos, 2004, «Laboratory experiments and estimation of cumulative infiltration and sorptivity», Water, Air and Soil Pollution: Focus (WAFO) entitled: "Protection and Restoration of the Environment", Kluwer Academic Publishers, 4: 241 – 251.
- Αγγελάκη 2004. Διερεύνηση των υδροδυναμικών παραμέτρων σε ακόρεστη ροή με πειραματικές μεθόδους και μαθηματικά μοντέλα. Διδακτορική Διατριβή, Π.Θ. σελ. 239.
- Αντωνόπουλος Β., 1999. Υδρολογία της ακόρεστης ζώνης του εδάφους. Θεσσαλονίκη, 1999, σελ. 264.
- Bouwer H. 1976. Infiltration into increasingly permeable soils. J. Irrigation and Drainage Div., ASCE, (102): 127 – 136.
- Parlange J. – Y., 1975. A note of the Green & Ampt equation. Soil Sci. Vol 119, pp. 466 – 467.
- Philip J.R. 1957a. Theory of infiltration: 1. The infiltration equation and its solution. Soil. Science (83): 435 – 448.
- Philip J.R. 1957b. Theory of infiltration: 4. Sorptivity and algebraic infiltration equations. Soil. Science (84): 257 – 264.
- Philip J.R. 1957c. Numerical solution of equations of the diffusion type with diffusivity concentration – dependent. II. Austr. J. Physics (10): 29 – 42.
- Philip J.R. 1958. Theory of infiltration: 6. Effect of water depth over soil. Soil. Science (85): 278 – 286.
- Philip J.R. 1969. Theory of infiltration. Advances in Hydrosociences. New York: Academic Press (5): 215 – 296.
- Philip J.R. 1973. On solving the unsaturated flow equation: 1. The flux – concentration relation. Soil Science (116): 328 – 335.
- Philip J.R. 1983. Theory of infiltration.. Advances in infiltration, Proceedings of the National Conference on advances in infiltration, December 12 – 13 Chicago, Illinois: 1 – 13.
- Σακελλαρίου – Μακραντωνάκη, Μ., 1986. Επίδραση των υδροδυναμικών παραμέτρων διήθησης – στράγγισης σε προβλήματα αρδεύσεων. Διδακτορική Διατριβή Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, σελ. 215.
- Σακελλαρίου – Μακραντωνάκη, Μ., Τζιμόπουλος Χ., Καλφούντζος Δ., 1997. Μέτρηση της εδαφικής υγρασίας με τη μέθοδο TDR και στατιστική επεξεργασία των μετρήσεων. Πρακτικά 7ου Πανελληνίου Συνεδρίου Ε.Υ.Ε., 14 – 18 Οκτωβρίου 1997, Πάτρα, σελ. 184 – 192.
- Sakellariou – Makrantonaki, M., 1997. Water drainage in layered soils, Laboratory experiments and numerical simulation. Water Resour. Managm., (11): 437 – 444.
- M. Sakellariou – Makrantonaki, A. Angelaki, C. Tzimopoulos «Study of the Cumulative Infiltration of water in a soil sample», 2002, Skiathos Island, Greece, 6th International Conference on the Protection and Restoration of the Environment, pp. 521 – 527
- Vauclin M., Haverkamp R., 1985. Solutions quasi analytiques de l' équation d' absorption de l' eau par les sols non saturés. I. Analyse critique. Agronomie, 5 (7), pp. 597-606.

ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΓΕΝΕΤΙΚΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΚΑΙ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΟΥ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ

Χαράλαμπος Παρασκευάς^{1,*}, Δημήτριος Καρπούζος¹, Ανδρέας Ηλίας², Χρήστος Μπαμπατζιμόπουλος¹

¹Τομέας Εγγείων Βελτιώσεων, Εδαφολογίας και Γεωργικής Μηχανικής, Γεωπονική Σχολή, Α.Π.Θ., 54124, Θεσσαλονίκη

²Ινστιτούτο Εγγείων Βελτιώσεων, Ελληνικός Γεωργικός Οργανισμός "Δήμητρα", 57400, Σίνδος

* paraskevasb@gmail.com

Στην εργασία αυτή γίνεται η βαθμονόμηση ενός αισθητήρα μέτρησης της εδαφικής υγρασίας τεχνολογίας FDR σε ένα λυσίμετρο με τη συνδυασμένη χρήση της κλασικής μεθόδου βαθμονόμησης καθώς και μίας διαδικασίας βελτιστοποίησης με χρήση γενετικών αλγορίθμων και του υδατικού ισοζυγίου. Ο αισθητήρας που χρησιμοποιείται είναι ο Diviner 2000 της εταιρείας Sentek. Η χρήση του παραπάνω αισθητήρα υγρασίας απαιτεί τοπική βαθμονόμηση στο έδαφος που είναι εγκατεστημένος. Η τυπική διαδικασία βαθμονόμησης (που προτείνεται και από τον κατασκευαστή) είναι επίπονη και καταστροφική για το έδαφος στο οποίο πρόκειται να χρησιμοποιηθεί και βασίζεται στη λήψη δειγμάτων και τον βαρυμετρικό υπολογισμό της εδαφικής υγρασίας. Ενδέχεται όμως, μια τέτοια τοπική βαθμονόμηση να μη δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα κυρίως λόγω τοπικών διαφοροποιήσεων του εδαφικού προφίλ. Στην περίπτωση αυτή συχνά επιλέγονται παραπλήσιοι με την τυπική βαθμονόμηση τρόποι βαθμονόμησης που διαφέρουν από την προτεινόμενη διαδικασία βαθμονόμησης. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται στην εργασία αυτή συνδυάζει τη μέθοδο του υδατικού ισοζυγίου, λαμβάνοντας υπόψη εισροές-εκροές νερού στο έδαφος (άρδευση, βροχή, εξατμισοδιαπνοή) και τη βελτιστοποίηση με χρήση γενετικών αλγορίθμων. Μέσω της βελτιστοποίησης αυτής υπολογίζονται οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της εξίσωσης βαθμονόμησης οι οποίες θα ικανοποιούν το ισοζύγιο νερού στην περιοχή του αισθητήρα.

Λέξεις κλειδιά: βελτιστοποίηση, γενετικοί αλγόριθμοι, Diviner 2000, αισθητήρες εδαφικής υγρασίας, μέθοδος υδατικού ισοζυγίου

CALIBRATION OF A SOIL WATER SENSOR USING GENETIC ALGORITHMS AND WATER BALANCE METHOD

Charalampos Paraskevas^{1,*}, Dimitrios Karpouzos¹, Andreas Ilias², Christos Babajimopoulos¹

¹Department of Hydraulics, Soil Science and Agricultural Engineering, School of Agriculture, A.U.Th., 54124, Thessaloniki

²Land Reclamation Institute, Hellenic Agricultural Organization "Demetra", 57400 Sindos,

* paraskevasb@gmail.com

This paper presents the calibration of a FDR soil water sensor in a lysimeter using genetic algorithms and the water balance method. The sensor is the Diviner 2000 by Sentek Pty. The use of the sensor requires a local calibration for specific soil each time. The typical calibration procedure of the sensor is painstaking and destructive to the soil as it is based on the gravimetrically soil water sampling. However, the expected results of such a local calibration may be pointless mainly due to local variations of the soil profile. In this case alternative calibration methods are chosen. These calibration methods may differ considerably from the proposed calibration procedure. The method used in this work combines the water balance method with the optimization using genetic algorithms. Using the genetic algorithm optimization the optimal values of the calibration equation were found in order to fulfill the water balance near the water sensor.

Key words: optimization, genetic algorithms, Diviner 2000, soil water sensors, water budget method

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο προγραμματισμός των αρδεύσεων απαιτεί την ακριβή μέτρηση της χωροχρονικής διακύμανσης της εδαφικής υγρασίας. Η μέτρηση αυτή μπορεί να γίνει με άμεσες ή έμμεσες μεθόδους. Οι έμμεσες μέθοδοι προσδιορίζουν την εδαφική υγρασία από μετρήσεις των φυσικών ιδιοτήτων του εδάφους οι οποίες συναρτώνται με αυτήν. Οι μετρήσεις αυτές γίνονται, είτε με μόνιμα τοποθετημένους στο έδαφος αισθητήρες, ή μέσω της κίνησης των αισθητήρων σε ειδικούς σωλήνες οι οποίοι τοποθετούνται μόνιμα στο έδαφος. Έτσι με τις μεθόδους αυτές καθίσταται δυνατή η λήψη διαδοχικών στο χρόνο μετρήσεων στην ίδια θέση πολύ σύντομα και χωρίς διατάραξη

του εδάφους. Μια από τις πιο διαδομένες από τις έμμεσες μεθόδους είναι η μέθοδος της διηλεκτρικής σταθεράς. Υποκατηγορία της μεθόδου αυτής είναι και η μέθοδος FDR (Frequency-Domain Reflectometry) την οποία χρησιμοποιεί ο αισθητήρας Diviner 2000 της εταιρείας Sentek.

Η χρήση των αισθητήρων υγρασίας απαιτεί τοπική βαθμονόμηση για συγκεκριμένο έδαφος κάθε φορά. Οι κατασκευάστριες εταιρείες των αισθητήρων προτείνουν γενικές εξισώσεις βαθμονόμησης για κάθε όργανο οι οποίες προκύπτουν συνήθως από ένα πλήθος εδαφών. Για το Diviner 2000 αυτές προήλθαν από ένα μέσο όρο δειγμάτων τριών εδαφών (Sands, Loams, Clay Loams) δίνοντας

σχετικές και όχι ακριβείς μετρήσεις υγρασίας (Starr and Paltineanu, 1998, Leib et al., 2003).

Η προτεινόμενη από την εταιρεία διαδικασία βαθμονόμησης (Sentek, 2001) του Diviner 2000 είναι επίπονη αλλά κυρίως καταστροφική για τη δομή του εδάφους στο οποίο πρόκειται να χρησιμοποιηθούν. Αυτό οδήγησε τους επιστήμονες που ασχολήθηκαν με τους αισθητήρες υγρασίας της Sentek να αναζητήσουν άλλους παραπλήσιους εργαστηριακούς τρόπους ή λιγότερο καταστροφικούς για το έδαφος ή ακόμη να και να καταφύγουν στη χρησιμοποίηση κάποιας άλλης βιβλιογραφικής εξίσωσης βαθμονόμησης. Ενδεικτικά αναφέρονται οι εργασίες βαθμονόμησης για τους αισθητήρες της Sentek των Evett et al. (2002) και Gabriel et al. (2010).

Οι γενετικοί αλγόριθμοι αποτελούν μέλος της οικογένειας των μεθόδων τεχνητής νοημοσύνης και είναι στοχαστικοί αλγόριθμοι οι οποίοι προσομοιώνουν τη λειτουργία των φυσικών φαινομένων όπως τη γενετική κληρονομικότητα καθώς και τη μάχη για επιβίωση σύμφωνα με τη Δαρβινική θεωρία (Michalewicz, 1994). Το πεδίο εφαρμογής των γενετικών αλγορίθμων στη διαχείριση των υδατικών πόρων είναι αρκετά εκτεταμένο (Katsifarakis and Karpouzios, 2012), σε σύνθετα προβλήματα βελτιστοποίησης (Karpouzios and Katsifarakis, 2013) και ειδικότερα στην επίλυση αντιστρόφων προβλημάτων (Karpouzios et al., 2001).

Ο σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν : i) η βαθμονόμηση του αισθητήρα Diviner 2000 με τη χρήση γενετικών αλγορίθμων και τη μέθοδο του υδατικού ισοζυγίου, καθώς και ii) η σύγκριση των αποτελεσμάτων αυτών με τις εξισώσεις που εξήχθησαν με τη βαθμονόμηση με τιμές υγρασίας που προήλθαν βαρυμετρικά από εδαφικά δείγματα.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1. Περιγραφή του αισθητήρα Diviner 2000

Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία είναι το Diviner 2000 της εταιρείας Sentek (2007). Ο αισθητήρας χρησιμοποιεί την τεχνολογία FDR για τον προσδιορισμό της εδαφικής υγρασίας και έχει συχνότητα λειτουργίας περίπου τα 100 MHz. Για την μέτρηση της υγρασίας προαπαιτείται η εγκατάσταση σωλήνων PVC στο έδαφος. Η κάθε

μέτρηση γίνεται ανά 10 cm βάθους και η ακτίνα επιρροής έξω από το σωλήνα είναι 5 cm.

Η μετατροπή των μετρήσεων του οργάνου σε κατ' όγκο υγρασία γίνεται μέσω της Scaled Frequency (SF) του οργάνου η οποία δίνεται από τη σχέση :

$$SF = \frac{F_a - F_s}{F_a - F_w} \quad (1)$$

όπου: F_s ένδειξη οργάνου στο έδαφος, F_w ένδειξη οργάνου σε νερό 22 °C, F_a ένδειξη οργάνου στον αέρα (οι τιμές των F_w και F_a θεωρούνται σταθερές για κάθε αισθητήρα).

Η μετατροπή της Scaled Frequency σε μετρήσεις υγρασίας κατ' όγκο θ_v (%) γίνεται με τη σχέση :

$$SF = a\theta_v^b \Leftrightarrow \theta_v = A \cdot SF^B \quad (2)$$

όπου: a , b , A και B οι σταθερές βαθμονόμησης με $A=(1/a)^{1/b}$ και $B=1/b$.

Λόγω του γεγονότος ότι η μέτρηση του οργάνου αφορά ένα ύψος εδάφους 10 cm, οι τιμές της υγρασίας % αντιστοιχούν σε mm ισοδύναμου ύψους νερού.

2.2. Περιγραφή περιοχής μελέτης - Μετρήσεις

Ο πειραματικός αγρός περιείχε τρία λυσίμετρα ελεύθερης στράγγισης διαταραγμένου προφίλ, βάθους 90 cm και εμβαδού 4 m² το καθένα. Στον αγρό αυτό εγκαταστάθηκε σύστημα άρδευσης και καλλιέργεια βαμβακιού (*Gossypium hirsutum* L.). Τα λυσίμετρα αυτά βρίσκονται στη Σίνο Θεσσαλονίκης και συγκεκριμένα στο Ινστιτούτο Εγγείων Βελτιώσεων του Ελληνικού Γεωργικού Οργανισμού "Δήμητρα". Η μηχανική σύσταση του εδάφους των τριών λυσίμετρων παρουσιάζει πολύ μικρές διαφορές, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 1). Η μέτρηση της εδαφικής υγρασίας στα λυσίμετρα 1 και 3 γινόταν με το Diviner 2000, ενώ στο λυσίμετρο 2 με το EnviroScan (Sentek 2006). Το EnviroScan τεχνολογίας FDR αποτελείται από δέκα αισθητήρες παρόμοιους με αυτούς του Diviner 2000. Οι αισθητήρες αυτοί έχουν ίδια συχνότητα λειτουργίας με αυτή του Diviner 2000 και ήταν μόνιμα τοποθετημένοι στο έδαφος του λυσίμετρου 2. Η μέτρηση της υγρασίας γίνεται (όπως και στο Diviner 2000) ανά 10 cm βάθους και η ακτίνα επιρροής των αισθητήρων έξω από το σωλήνα είναι 5 cm. Το βήμα λήψης μετρήσεων ήταν μία ώρα.

Πίνακας 1. Μηχανική ανάλυση και φαινόμενο ειδικό βάρος ρ_b εδάφους λυσίμετρων

Λυσίμετρο / Αισθητήρας	Εδαφική στρώση (cm)	Άμμος	Ιλύς	Άργιλος	Χαρακτηρισμός	ρ_b (gr cm ⁻³)
		(%)				
Λυσίμετρο 1 / Diviner 2000	0-30	31.2	40.8	28	Clay Loam (CL)	1.043
	30-60	35.6	38.4	26	Loam (L)	1.220
	60-90	43.2	32.4	24.4	Loam (L)	1.228
Λυσίμετρο 2 / EnviroScan	0-30	39.2	36	24.8	Loam (L)	1.083
	30-65	41.2	32	26.8	Loam (L)	1.296
	65-90	45.2	36	18.8	Loam (L)	1.112
Λυσίμετρο 3 / Diviner 2000	0-30	37.2	34.4	28.4	Clay Loam (CL)	1.134
	30-60	41.2	34.4	24.4	Loam (L)	1.186
	60-90	47.6	28	24.4	Loam (L)	1.239

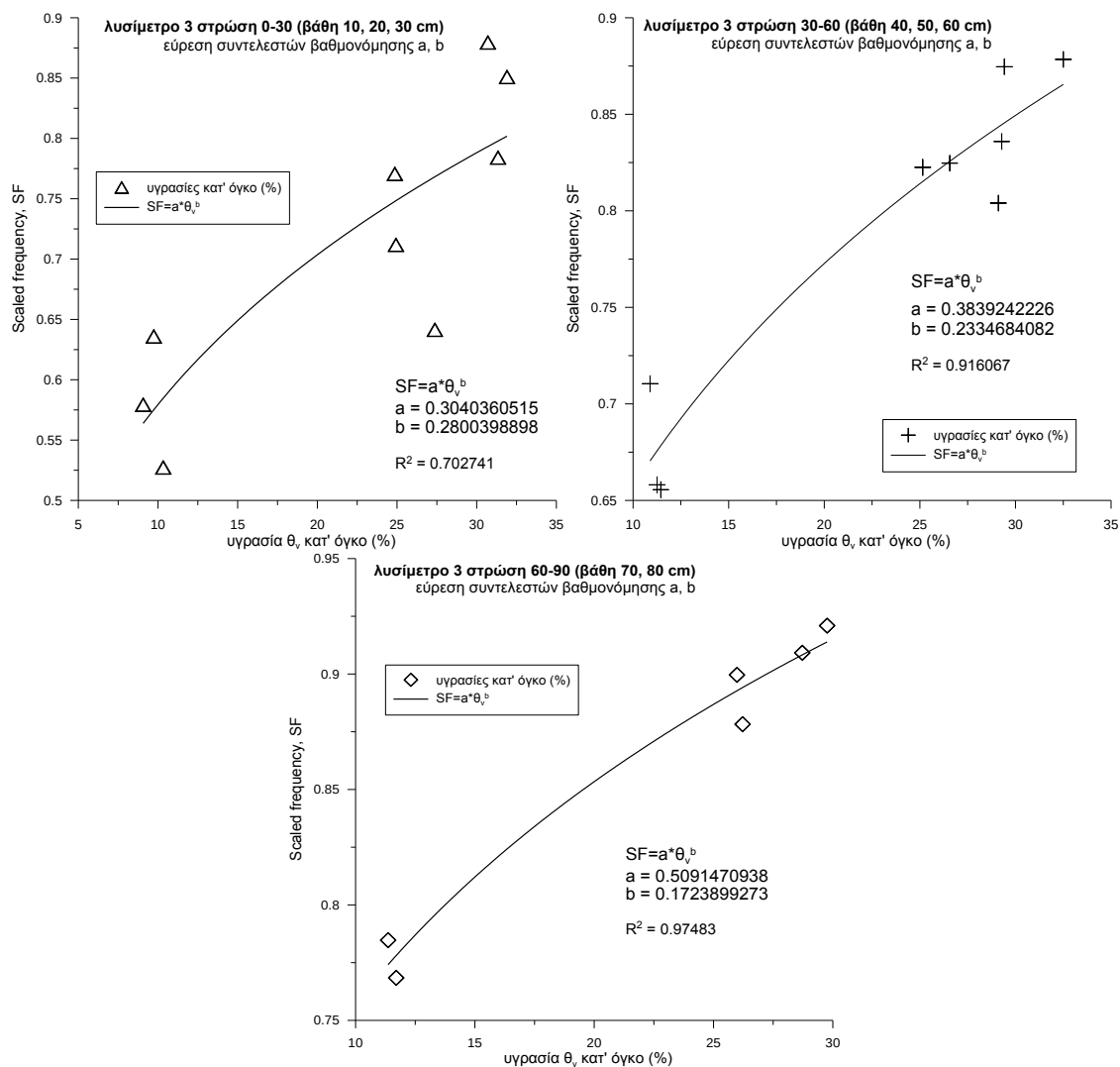
Η προτεινόμενη από την εταιρεία κατασκευής των αισθητήρων υγρασίας βαθμονόμηση (Sentek 2001), θα ήταν αδύνατο να εφαρμοσθεί στο πειραματικό διότι θα ήταν καταστροφική για το έδαφος των λυσιμέτρων. Για το λόγο αυτό προτιμήθηκε μια βαθμονόμηση παρόμοια με την προτεινόμενη από την εταιρεία κατασκευής των οργάνων και με γνώμονα την ελάχιστη δυνατή διαταραχή του εδαφικού προφίλ πλησίον του αισθητήρα. Σύμφωνα με αυτή, η λήψη δειγμάτων γινόταν περιφερειακά της θέσης μέτρησης και όχι εφάπτομενα αυτής, διασφαλίζοντας έτσι την μη καταστροφή του όγκου εδάφους που εφάπτεται στον αισθητήρα. Έτσι, για τη βαθμονόμηση των οργάνων ελήφθησαν δείγματα για τον υπολογισμό της περιεχόμενης υγρασίας με τη βαρυμετρική μέθοδο σε τρεις υγρασιακές καταστάσεις (ξηρή, μέση και υγρή) και για όλα τα βάθη (10...80 cm). Τα δείγματα λαμβάνονταν περιμετρικά του σωλήνα υγρασίας σε ακτίνα 20-30 cm. Παράλληλα με τη λήψη των δειγμάτων γινόταν μέτρηση υγρασίας με τους αισθητήρες.

Ακολουθώντας, μέσω μιας παλινδρόμησης έγινε η

συσχέτιση των μετρήσεων του αισθητήρα με τις τιμές υγρασίας που προκύπτουν βαρυμετρικά από τα εδαφικά δείγματα. Κατάληξη της συσχέτισης αυτής είναι η εύρεση των συντελεστών της Σχέσης (2), οι οποίοι είναι και το ζητούμενο κάθε βαθμονόμησης.

Η παραπάνω διαδικασία βαθμονόμησης ακολουθήθηκε και στα τρία λυσίμετρα. Συγκεκριμένα στα λυσίμετρα 1 και 2 είχε πολύ καλά αποτελέσματα παρουσιάζοντας υψηλούς συντελεστές προσδιορισμού ($R^2 > 0.9$). Οι συντελεστές αυτοί δοκιμάστηκαν μέσω της Εξίσωσης (2) και του υδατικού ισοζυγίου των δύο λυσιμέτρων δίνοντας πολύ καλή ποσοτική αποτύπωση των εισροών. Περισσότερες πληροφορίες για τα αποτελέσματα της παραπάνω βαθμονόμησης (λυσίμετρα 1 και 2) βρίσκονται στις εργασίες των Παρασκευάς κ.άλ. (2011) και Paraskevas et al. (2012).

Ανάλογη διαδικασία βαθμονόμησης με τα λυσίμετρα 1 και 2 ακολουθήθηκε στο λυσίμετρο 3. Τα αποτελέσματα της οποίας και για τις τρεις στρώσεις του λυσιμέτρου 3 παρουσιάζονται στο Σχήμα 1 και στον Πίνακα 2.



Σχήμα 1. Εξαγωγή εξισώσεων βαθμονόμησης του λυσιμέτρου 3 (για τις τρεις στρώσεις) κάνοντας χρήση των τιμών υγρασίας που πρόεκυψαν βαρυμετρικά από εδαφικά δείγματα μαζί με τους συντελεστές προσδιορισμού R^2 της συσχέτισης

Πίνακας 2. Συντελεστές εξίσωσης βαθμονόμησης λυσίμετρου 3 κάθε εδαφικής στρώσης κάνοντας χρήση των τιμών υγρασίας που πρόεκυψαν βαρυμετρικά από εδαφικά δείγματα μαζί με τους συντελεστές προσδιορισμού R^2 της συσχέτισης

0-30 (cm)		R^2	30-60 (cm)		R^2	60-90 (cm)		R^2
a=0.304	A=70.288	0.703	a=0.3839	A=60.346	0.916	a=0.5091	A=50.197	0.975
b=0.28	B=3.571		b=0.2335	B=4.283		b=0.1724	B=5.8	

Παρά το γεγονός πως ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία στο λυσίμετρο 3 τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης στην επιφανειακή στρώση (0-30 cm) δεν θεωρήθηκαν ικανοποιητικά ($R^2=0.703$). Αυτό ενδέχεται να οφείλεται σε πιθανές τοπικές διαφοροποιήσεις του εδαφικού προφίλ ή στην αστοχία λήψης ενός αντιπροσωπευτικού δείγματος υγρασίας με αυτό του οργάνου. Αντίθετα στις υπόλοιπες στρώσεις (30-60 και 60-90 cm) τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης είναι πολύ ικανοποιητικά ($R^2>0.9$). Η χαμηλή τιμή του συντελεστή προσδιορισμού αποτυπώνεται και στις μεγάλες αποκλίσεις που παρουσιάζει το υδατικό ισοζύγιο (κάνοντας χρήση των συντελεστών του Πίνακα 2) σε σχέση με τις εισροές. Η σπουδαιότητα αυτής της στρώσης λόγω του ότι παρουσιάζει τις μεγαλύτερες αυξομειώσεις στην περιεχόμενη υγρασία οδήγησε στην αναζήτηση ενός νέου βέλτιστου set παραμέτρων βαθμονόμησης για την επιφανειακή στρώση (0-30 cm) το οποίο θα ικανοποιεί το ισοζύγιο νερού στην περιοχή του αισθητήρα.

2.3. Βελτιστοποίηση με γενετικούς αλγόριθμους

Οι γενετικοί αλγόριθμοι στην εργασία αυτή χρησιμοποιούνται ως μέθοδος βελτιστοποίησης μέσω της οποίας επιχειρείται η επίλυση του αντίστροφου προβλήματος. Στην πρώτη γενιά ξεκινούν με ένα πληθυσμό τυχαίων ατόμων-λύσεων η εξέλιξη του οποίου γίνεται συνεχώς κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης (επόμενες γενιές) με τη βοήθεια των γενετικών τελεστών και την αξιολόγηση των λύσεων βάσει της αντικειμενικής συνάρτησης.

Για τον προσδιορισμό της προς ελαχιστοποίηση αντικειμενικής συνάρτησης χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση του υδατικού ισοζυγίου:

$$P + I - ET_c - \Delta\theta = 0 \Leftrightarrow$$

$$P^t + I^t - ET_c^t - \left(\int_0^L \theta(z, t+1) dz - \int_0^L \theta(z, t) dz \right) = 0 \Leftrightarrow \quad (3)$$

$$P^t + I^t - ET_c^t - \left(\theta_{(10)}^{t+1} + \theta_{(20)}^{t+1} + \theta_{(30)}^{t+1} - \theta_{(10)}^t - \theta_{(20)}^t - \theta_{(30)}^t + \dots + \theta_{(70)}^{t+1} + \theta_{(80)}^{t+1} - \theta_{(70)}^t - \theta_{(80)}^t \right) = 0$$

όπου: P^t και I^t η βροχόπτωση και η άρδευση αντίστοιχα την ημέρα t , ET_c^t η πραγματική εξατμισοδιαπνοή (Penman-Monteith κατά FAO (Allen et al., 1998)) την ημέρα t , $\Delta\theta$ η μεταβολή της συνολικής υγρασίας σε όλο το εδαφικό προφίλ μεταξύ των ημερών $t+1$ και t , L το βάθος του λυσίμετρου, $\theta_{(10)}^{t+1}$ η μέτρηση του Diviner 2000 στο βάθος 10 cm την ημέρα $t+1$, $\theta_{(20)}^{t+1}$ η μέτρηση του στο βάθος των 20 cm την ημέρα $t+1$ κ.ό.κ. Όλες οι μονάδες των παραμέτρων της Εξίσωσης (3) είναι σε mm.

Αντικαθιστώντας στην Εξίσωση (3) τη σχέση (2) της βαθμονόμησης του οργάνου καταλήγουμε στην αντικειμενική συνάρτηση:

$$\sum_{i=1}^{n+1} \left(P^t + I^t - ET_c^t - A_1 (SF_{10}^{t+1})^{B_1} - \dots - A_3 (SF_{80}^{t+1})^{B_3} + A_1 (SF_{10}^t)^{B_1} + \dots + A_3 (SF_{80}^t)^{B_3} \right)^2 \rightarrow 0 \quad (4)$$

όπου: SF_i^{t+1} και SF_i^t οι scaled frequencies τις ημέρες $t+1$ και t αντίστοιχα ($i=10 \dots 80$) και $A_1, B_1, A_2, B_2, A_3, B_3$ σταθερές βαθμονόμησης για τα βάθη 0-30, 30-60, 60-90 cm αντίστοιχα.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ

3.1. Βαθμονόμηση

Η ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης έγινε με τη μέθοδο των γενετικών αλγόριθμων. Ζητούμενο της ελαχιστοποίησης αυτής είναι οι συντελεστές A_1 και B_1 της πρώτης στρώσης 0-30 cm. Για τους συντελεστές A_2, B_2 και A_3, B_3 των επόμενων στρώσεων (30-60 και 60-90 cm) διατηρήθηκαν οι τιμές του Πίνακα 2 οι οποίες παρουσίαζαν πολύ υψηλό συντελεστή προσδιορισμού R^2 .

Ως ελάχιστη και μέγιστη δυνατή τιμή των παραμέτρων A_1, B_1 στην κωδικοποίηση των λύσεων του γενετικού αλγορίθμου, πάρθηκαν οι τιμές 1, 1 και 100, 10 αντίστοιχα. Σύμφωνα με την ανασκόπηση της βιβλιογραφίας οι τιμές 1, 1 και 100, 10 είναι πολύ μικρότερες και αντίστοιχα πολύ μεγαλύτερες από τις τιμές που έχουν προταθεί για οποιαδήποτε εδάφη. Ακόμη για την καλύτερη τοποθέτηση του προβλήματος επιλέχθηκε η τιμή των υγρασιών που προκύπτουν από την ελαχιστοποίηση να μην υπερβαίνουν την υγρασία κορεσμού θ_s της στρώσης 0-30 cm η οποία προσδιορίστηκε με τη λήψη αδιατάρακτου δείγματος εδάφους και η τιμή της είναι $\theta_s=54.71\%$. Ο περιορισμός αυτός, εισήχθηκε στην αντικειμενική συνάρτηση του γενετικού αλγορίθμου με τη μέθοδο της ποινή.

Οι τιμές της ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής πάρθηκαν από τα λυσίμετρα 1 και 2 μέσω της εύρεσης ενός τοπικού φυτικού συντελεστή ο οποίος και ικανοποιούσε το ημερήσιο και το συνολικό υδατικό ισοζύγιο των λυσίμετρων (Paraskevas et al., 2013). Οι τιμές των αρδεύσεων ήταν ίδιες και για τα τρία λυσίμετρα ενώ οι τιμές των βροχοπτώσεων πάρθηκαν από τον μετεωρολογικό σταθμό του πειραματικού. Οι γενετικοί τελεστές που χρησιμοποιήθηκαν ήταν η επιλογή με τη μέθοδο του διαγωνισμού, η διασταύρωση διανυσμάτων και η μετάλλαξη. Η κωδικοποίηση των λύσεων έγινε με διανύσματα πραγματικών αριθμών, το μέγεθος του διαγωνισμού επιλέχθηκε ίσο με 3 ενώ προστέθηκε στον τελεστή της επιλογής και η ιδιότητα του ελιτισμού. Η πιθανότητα διασταύρωσης λήφθηκε ίση με 0.80 και η μετάλλαξη, εντός του πεδίου τιμών των συντελεστών A_1 και B_1 , εφαρμόστηκε στις παραμέτρους των λύσεων

αυτών που δεν είχαν υποστεί διασταύρωση.

Τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης με γενετικό αλγόριθμο μετά από 500 γενεές και για μέγεθος πληθυσμού λύσεων ίσο με 50 παρουσιάζονται στον Πίνακα 3. Παράλληλα παρουσιάζεται και η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για τις τιμές A_1 , B_1 της βαθμονόμησης με υγρασίες που πρόέκυψαν βαρυμετρικά από εδαφικά δείγματα του Πίνακα 2.

Πίνακας 3. Συντελεστές εξίσωσης βαθμονόμησης που πρόέκυψαν από τη βελτιστοποίηση με γενετικούς αλγόριθμους και από τη βαθμονόμηση με υγρασίες που πρόέκυψαν βαρυμετρικά καθώς και οι τιμές των αντίστοιχων αντικειμενικών συναρτήσεων

	A_1	B_1	Αντικειμενική συνάρτηση
Γενετικοί αλγόριθμοι	64.159	1.513	1678.811
Βαρυμετρική βαθμονόμηση	70.288	3.571	4827.111

3.2. Σύγκριση αποτελεσμάτων

Η αξιολόγηση της βελτιστοποίησης γίνεται με σύγκριση μεταξύ των μετρημένων τιμών και των υπολογισμένων τιμών με τη χρήση τόσο ποιοτικών όσο και ποσοτικών διαδικασιών. Οι ποιοτικές διαδικασίες αφορούν τη γραφική σύγκριση των μετρημένων τιμών και των αποτελεσμάτων, ενώ οι ποσοτικές αφορούν την ανάλυση στατιστικών κριτηρίων.

Οι μετρημένες τιμές αφορούν τη διαφορά των εισροών (βροχόπτωση και άρδευση) από την εξατμισοδιαπνοή και οι υπολογισμένες τιμές την μεταβολή της εδαφικής υγρασίας $\Delta\theta$ κάνοντας χρήση των αντίστοιχων συντελεστών A , B (Εξίσωση 2).

Τα στατιστικά κριτήρια που επιλέχθηκαν αφορούν το μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE, mean absolute error) και το μέσο τετραγωνικό ποσοστιαίο σφάλμα (RMSPE, root mean square percentage error) το οποία δίνονται από τους τύπους (Hyndman and Koehler, 2006):

$$MAE = \frac{\sum |O_i - P_i|}{n} \quad (5)$$

$$RMSPE(\%) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum \left(100 \frac{O_i - P_i}{O_i} \right)^2} \quad (6)$$

όπου: O_i οι μετρημένες τιμές, P_i οι υπολογισμένες τιμές, n το πλήθος των τιμών των παραπάνω τιμών.

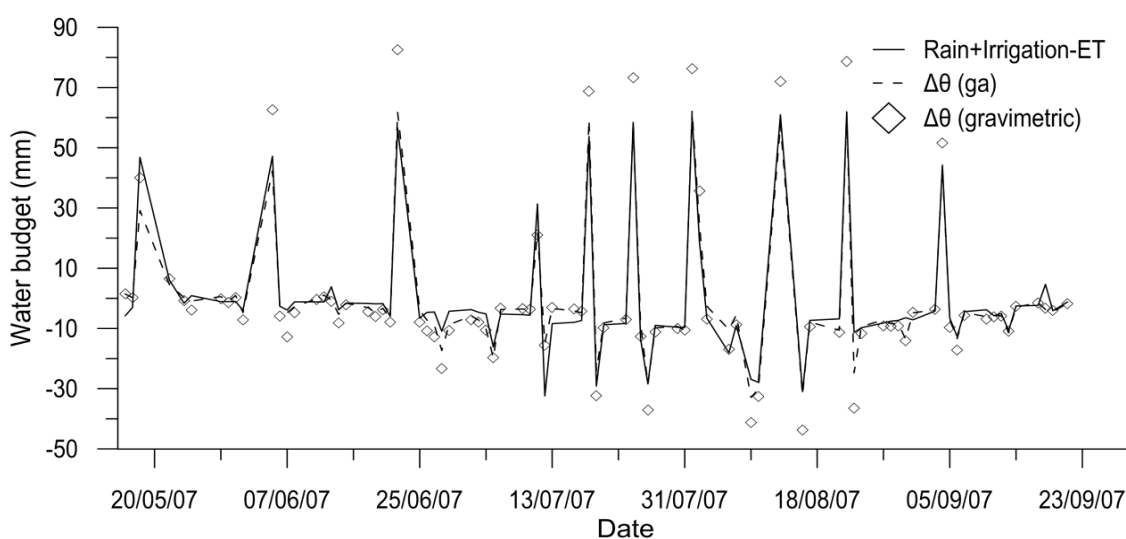
Τα αποτελέσματα της εφαρμογής των Εξισώσεων 5 και 6 παρουσιάζονται στον Πίνακα 4. Οι βέλτιστες τιμές των κριτηρίων MAE και RMSPE είναι το μηδέν.

Πίνακας 4. Σύγκριση στατιστικών κριτηρίων αποτελεσμάτων χρήσης συντελεστών εξίσωσης βαθμονόμησης που πρόέκυψαν από τη βελτιστοποίηση με γενετικούς αλγόριθμους και από τη βαθμονόμηση με υγρασίες που πρόέκυψαν βαρυμετρικά

	MAE (mm)	RMSPE (%)
Γενετικοί αλγόριθμοι	2.94	6.91
Βαρυμετρική βαθμονόμηση	5.08	10.47

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 4 η βελτίωση που προκαλείται στα αποτελέσματα που πρόέκυψαν από τη βελτιστοποίηση με τη βοήθεια των γενετικών αλγορίθμων ξεπερνά το 40% το οποίο εμφανίζεται και στα δύο στατιστικά κριτήρια που επιλέχθηκαν.

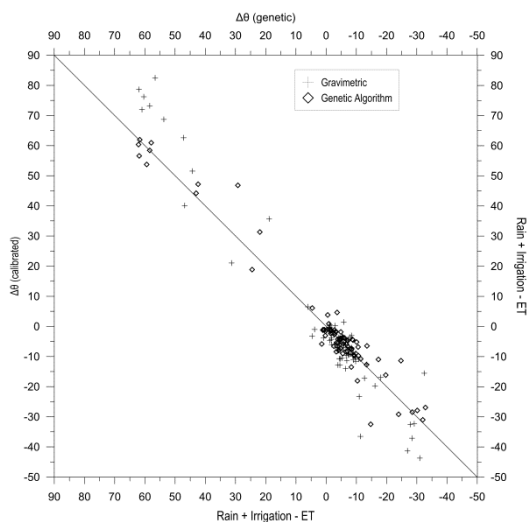
Η γραφική σύγκριση των παραπάνω αποτελεσμάτων γίνεται στο Σχήμα 2. Συγκεκριμένα παρουσιάζεται η μεταβολή της υγρασίας κάνοντας χρήση των συντελεστών βαθμονόμησης οι οποίες πρόέκυψαν από τη βελτιστοποίηση με γενετικούς αλγόριθμους ($\Delta\theta(ga)$) σε σχέση με τη διαφορά της εξατμισοδιαπνοής από τις εισροές (βροχόπτωση και άρδευση). Στο ίδιο Σχήμα παρουσιάζεται και η μεταβολή της υγρασίας χρησιμοποιώντας τους συντελεστές βαθμονόμησης του Πίνακα 2 ($\Delta\theta(gravimetric)$).



Σχήμα 2. Σύγκριση ημερήσιου υδατικού ισοζυγίου (βροχόπτωση + άρδευση - εξατμισοδιαπνοή) με τη μεταβολή της υγρασίας κάνοντας χρήση των συντελεστών βαθμονόμησης οι οποίες πρόέκυψαν από τη βελτιστοποίηση με γεν. αλγόριθμους ($\Delta\theta(ga)$) και αυτής που προέκυψε από υγρασίες βαρυμετρικά προσδιορισμένες ($\Delta\theta(gravimetric)$)

Στο Σχήμα 2 φαίνεται η υπεροχή των τιμών υγρασίας χρησιμοποιώντας τους συντελεστές βαθμονόμησης οι οποίοι προέκυψαν από τη βελτιστοποίηση με γενετικούς αλγόριθμους ($\Delta\theta$ (ga)) έναντι των αντίστοιχων που προέκυψαν από τη βαθμονόμηση με τιμές υγρασίας βαρυμετρικά προσδιορισμένες ($\Delta\theta$ (gravimetric)). Η απόκλιση που παρουσιάζουν οι τελευταίες ειδικά για τα συμβάντα εισροών (βροχοπτώσεων και αρδεύσεων) είναι ιδιαίτερα μεγάλη.

Αντίστοιχα αποτελέσματα με αυτά του Σχήματος 2 παρουσιάζονται και στο Σχήμα 3. Μεγαλύτερη διασπορά και απόκλιση παρουσιάζουν οι τιμές της υγρασίας που προέκυψαν από τη βαθμονόμηση (+) του Πίνακα 2 σε σχέση με τη βαθμονόμηση με τους βελτιστοποιημένους με γενετικούς αλγόριθμους ($\diamond$) συντελεστές A, B.



Σχήμα 3. Σύγκριση ημερήσιου υδατικού ισοζυγίου με τη μεταβολή της υγρασίας κάνοντας χρήση βελτιστοποιημένων με γενετικούς συντελεστές βαθμονόμησης και με τους συντελεστές που προέκυψαν από υγρασίες βαρυμετρικά προσδιορισμένες

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η βελτιστοποίηση με γενετικούς αλγόριθμους αντικειμενικής συνάρτησης που στηρίζεται στο υδατικό ισοζύγιο για τη βαθμονόμηση του αισθητήρα Diviner 2000, η οποία εφαρμόστηκε στην παρούσα εργασία, φαίνεται να δίνει πολύ καλά αποτελέσματα. Το πλεονέκτημα που παρέχει η χρήση των γενετικών αλγορίθμων είναι πως δεν απαιτεί την ύπαρξη κάποιων τιμών A, B ως αρχική συνθήκη. Η μέθοδος που εφαρμόστηκε απαιτεί την ύπαρξη αξιόπιστων μετρήσεων των κλασμάτων του υδατικού ισοζυγίου (βροχοπτώσεων, αρδεύσεων, εξατμισοδιαπνοής) τα οποία είναι εύκολο να μετρηθούν. Παράλληλα με αυτό απαιτείται και η γνώση της υγρασίας κορεσμού θ_s εδάφους για τον περιορισμό του εύρους τιμών των λύσεων. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να αποφευχθεί η επίπονη, όχι πάντοτε επιτυχημένη αλλά και καταστροφική για το έδαφος που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν βαθμονόμηση των αισθητήρων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M., 1998. Crop Evapotranspiration : Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No 56, pp. 300.
- Evelt S., Laurent J., Cepuder P., Hignett C., 2002. Neutron scattering, capacitance and TDR soil water content measurements compared on four continents. 17th World Congress of Soil Science in Thailand, Symposium 59, Paper 1021.
- Gabriel J.L., Lizaso J.I., Quemada M., 2010. Laboratory versus Field Calibration of Capacitance Probes. Soil Sci Soc Am J, 74(2): 593-601.
- Hyndman R., Koehler A., 2006. Another look at measures of forecast accuracy. Int J Forecasting, 22(4): 679-688.
- Karpouzou D.K., Delay F., Katsifarakis K.L., Marsily G. de, 2001. A multi-population genetic algorithm to solve the inverse problem in hydrogeology. Water Resour Res, 37(9): 2291-2302.
- Katsifarakis K.L., Karpouzou D.K., 2012. Genetic algorithms and water resources management: An established-yet evolving- relationship. Hydrology, Hydraulics and Water Resources Management: A Heuristic Optimisation Approach (Editor: K.L. Katsifarakis), WIT Press, Southampton, UK, pp. 7-38.
- Karpouzou D.K., Katsifarakis K.L., 2013. A Set of New Benchmark Optimization Problems for Water Resources Management. Water Resour Manag, 27(9): 3333-3348.
- Leib G., Jabro J., Matthews G., 2003. Field evaluation and preference comparison of soil moisture sensors. Soil Sci, 168(6): 396-408.
- Michalewicz Z., 1994. Genetic algorithms + Data structures = Evolution programs, (2nd ed.), Springer Verlag, New York, pp. 340.
- Paraskevas C., Georgiou P., Ilias A., Panoras A., Babajimopoulos C., 2012. Calibration equations for two capacitance water content probes. Int Agrophys, 26(3): 285-293.
- Paraskevas C., Georgiou P., Ilias A., Panoras A., Babajimopoulos C., 2013. Evapotranspiration and simulation of soil water movement in small area vegetation. Int. Agrophys, 27(4), Accepted Article.
- Sentek, 2001. Calibration of Sentek Soil Moisture Sensors. Sentek, Stepney, Australia.
- Sentek, 2006. EnviroScan Solo Manual. Sentek, Stepney, Australia.
- Sentek, 2007. Sentek Diviner 2000 User Guide. Sentek, Stepney, Australia.
- Starr J.L. and Paltineanu I.J., 1998. Soil water dynamics using multisensory capacitance probe in non-traffic interrows of corn. Soil Sci Soc Am J, 62: 114-122.
- Παρασκευάς Χ., Γεωργίου Π., Ηλίας Α., Πανώρας Α., Μπαμπατζιμόπουλος Χ., 2011. Εξισώσεις βαθμονόμησης δύο αισθητήρων μέτρησης εδαφικής υγρασίας σε λυσίμετρα. 7^ο Πανελλήνιο Συνέδριο της Εταιρείας Γεωργικών Μηχανικών Ελλάδας, 24-27/11/2011, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών.

Ο ΡΟΛΟΣ ΤΩΝ ΒΟΗΘΗΤΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΣΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕΡΩΝ ΜΕ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

Σοφία Καβαλιεράτου¹ και Χρήστος Μπαμπατζιμόπουλος¹

¹Εργαστήριο Γενικής και Γεωργικής Υδραυλικής και Βελτιώσεων, Γεωπονική Σχολή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο
Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη, Τ.Κ. 54124

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση της επίδρασης των βοηθητικών συνθηκών στη δυνατότητα ενός μοντέλου υπόγειας ροής να προσεγγίσει ικανοποιητικά τη λειτουργία του φυσικού συστήματος που προσομοιώνει. Η διερεύνηση αυτή πραγματοποιήθηκε κατά την κατάρτιση ενός διδιάστατου μοντέλου μη μόνιμης ροής για τα υπόγεια νερά της πεδιάδας Πιερίας. Χρησιμοποιήθηκε το MODFLOW 2000 για τη δόμηση του μοντέλου και το PEST (μέθοδος Gauss-Levenberg-Marquardt) για τη ρύθμισή του. Για τη διερεύνηση της επίδρασης της αρχικής συνθήκης εφαρμόστηκαν διαφορετικές αρχικές κατανομές του φορτίου, ενώ ο ρόλος των οριακών συνθηκών ελέγχθηκε μεταβάλλοντας τις οριακές συνθήκες κατά $\pm 10\%$ και $\pm 20\%$. Εξετάστηκε η επίδραση αυτών των μεταβολών στην κατανομή του φορτίου και στο συνολικό υδατικό ισοζύγιο και τις συνιστώσες του. Από τις διερευνήσεις προέκυψε ότι ο έλεγχος της διάρκειας επίδρασης της αρχικής συνθήκης σε σχέση με τη διάρκεια της προσομοίωσης, καθώς και η ανάλυση ευαισθησίας των οριακών συνθηκών, θα πρέπει να αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι της επαναληπτικής διαδικασίας κατάρτισης και ρύθμισης των μαθηματικών μοντέλων υπόγειων νερών. Κατά τη χρήση ενός ρυθμισμένου μοντέλου ως εργαλείου διαχείρισης, τα αποτελέσματα αυτών των διερευνήσεων συμβάλλουν στην εκτίμηση της αβεβαιότητας των προβλέψεων του μοντέλου που οφείλεται στην αρχική και τις οριακές συνθήκες.

Λέξεις κλειδιά: μαθηματικά μοντέλα, υπόγεια νερά, βοηθητικές συνθήκες, οριακές συνθήκες, αρχικές συνθήκες

THE ROLE OF BOUNDARY CONDITIONS IN GROUNDWATER MODELLING AND MANAGEMENT

Sofia Kavalieratou¹ and Christos Babajimopoulos¹

¹Laboratory of General and Agricultural Hydraulics and Land Reclamation, School of Agriculture, Aristotle University of Thessaloniki, Thessaloniki 54124, Greece
kavalier@agro.auth.gr, babajim@agro.auth.gr

This paper investigates the role of boundary conditions on groundwater flow modelling. The investigation was conducted during the development and calibration of a two-dimensional finite-difference transient flow model for the Pieria-plain aquifer. The software applied for model development and calibration was MODFLOW 2000 and PEST, respectively. To investigate the impact of the initial condition on model results, three different initial head distributions were applied and the resulting head-contours were compared. The role of boundary conditions was explored through a sensitivity analysis process: the reference values were altered by a percentage of $\pm 10\%$ and $\pm 20\%$, and the resulting head distributions and water balances were compared. It was shown that sensitivity analysis of the initial and boundary conditions is necessary in the calibration process of a mathematical model. When a calibrated model is used for groundwater management, the results of this analysis can assist in the assessment of model predictions uncertainty.

Key words: ground water modelling, boundary conditions, initial conditions

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ποσοτική και ποιοτική υποβάθμιση των υπόγειων νερών δύσκολα αναστρέφεται, γι' αυτό είναι απαραίτητη η ένταξη της εκμετάλλευσής τους στα πλαίσια κατάλληλων σχεδίων διαχείρισης (Gleeson et al., 2012). Η κατάρτιση των σχεδίων διαχείρισης ενός υδροφορέα στηρίζεται σε μαθηματικά μοντέλα προσομοίωσης της λειτουργίας του (Karamouz et al., 2011). Συχνά όμως παρουσιάζονται μοντέλα στηριγμένα σε ανεπαρκή δεδομένα πεδίου, με σφάλματα ή αδιαφάνεια στα ενδιάμεσα στάδια κατάρτισης και ελλιπή αξιολόγηση, που παραβιάζουν τις παραδοχές και τις οριακές συνθήκες που ενυπάρχουν σ' αυτά (Middlemis, 2000, Ardito et al., 2004). Οι αποφάσεις διαχείρισης των υπόγειων νερών που στηρίζονται σε τέτοιου είδους μοντέλα και στα αποτελέσματά τους, μπορεί να είναι καταστροφικές.

Ο προσδιορισμός των κατάλληλων βοηθητικών συνθηκών (αρχικής και οριακών) αποτελεί βασικό τμήμα της διαδικασίας κατάρτισης ενός μαθηματικού μοντέλου υπόγειων νερών, συχνά όμως υπόκειται σε σημαντικά σφάλματα (Reilly, 2001). Τα τελευταία χρόνια, η γενίκευση της χρήσης των μοντέλων υπόγειων νερών ως διαχειριστικών εργαλείων και η ανάγκη βελτίωσης της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων τους, έχουν επαναφέρει το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας στη μελέτη του ρόλου των βοηθητικών συνθηκών (Mazzilli et al., 2010, Carrera-Hernandez et al., 2012).

Στην παρούσα εργασία διερευνήθηκαν η διάρκεια επίδρασης της αρχικής συνθήκης και ο ρόλος των οριακών συνθηκών (γνωστής πλευρικής εισροής, γνωστού οριακού φορτίου και γνωστής εισροής από το άνω όριο ενός υδροφορέα) στη δυνατότητα ενός

μοντέλου υπόγειας ροής να προσεγγίσει ικανοποιητικά τη λειτουργία του φυσικού συστήματος που προσομοιώνει.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Η διερεύνηση του ρόλου των βοηθητικών συνθηκών πραγματοποιήθηκε κατά τη διαδικασία δόμησης, ρύθμισης κι εφαρμογής ενός διδιάστατου μοντέλου μη μόνιμης ροής για τα υπόγεια νερά της πεδιάδας Πιερίας. Για την κατάρτισή του μοντέλου χρησιμοποιήθηκε το MODFLOW 2000 (Harbaugh et al, 2000). Το μοντέλο καλύπτει έκταση 256 km² και αποτελείται από 1759 ενεργά κελιά, διαστάσεων 350m x 350m. Προσομοιώνει τη λειτουργία ενός συστήματος δύο υδροφορέων, ενός κλειστού στο βόρειο και κεντρικό τμήμα της περιοχής μελέτης και ενός ελεύθερου στο νότιο τμήμα. Για την περιγραφή της χωρικής δομής των υδρογεωλογικών παραμέτρων χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος διαχωρισμού σε ζώνες ίσης τιμής. Οι τιμές των 25 υδρογεωλογικών παραμέτρων προσδιορίστηκαν κατά τη ρύθμιση του μοντέλου, η οποία έγινε με τη μέθοδο Gauss – Levenberg - Marquardt με περιορισμούς, όπως αυτή εφαρμόζεται με το PEST (Doherty, 2004). Η ρύθμιση και η επαλήθευση του μοντέλου βασίστηκαν σε μηνιαία δεδομένα της περιόδου 9/1992–8/1995. Χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 1291 παρατηρήσεις φορτίου σε 43 γεωτρήσεις της περιοχής μελέτης και 30 παρατηρήσεις παροχής των πηγών Δίου-Καρίτσας. Ως αντικειμενική συνάρτηση (F_t) χρησιμοποιήθηκε το άθροισμα των τετραγώνων των σταθμισμένων υπολοίπων φορτίου και παροχής. Από την αξιολόγηση προέκυψε ότι το μοντέλο προσομοιώνει ικανοποιητικά τη λειτουργία του φυσικού συστήματος (Καβαλιεράτου, 2007).

2.1. Αρχική συνθήκη

Στα μοντέλα υπόγειων νερών μη μόνιμης ροής, είναι απαραίτητο να οριστεί μια αρχική κατανομή του φορτίου σε κάθε κόμβο του δικτύου υπολογισμών, η οποία όμως μπορεί να μην είναι συμβατή με το μοντέλο μη μόνιμης ροής. Η επίδραση αυτής της αρχικής συνθήκης ελαττώνεται όσο προχωρά η προσομοίωση. Αν η διάρκεια επίδρασης της αρχικής συνθήκης είναι μεγαλύτερη από τη διάρκεια της περιόδου ρύθμισης, εισάγεται ένα σφάλμα στα φορτία που υπολογίζονται από το μοντέλο. Το σφάλμα αυτό μειώνει την αξιοπιστία και αυξάνει την αβεβαιότητα των προβλέψεων του μοντέλου.

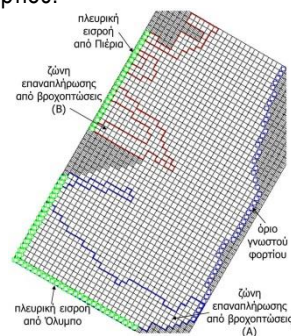
Κατά την κατάρτιση του μαθηματικού μοντέλου της πεδιάδας Πιερίας, εξετάστηκε η διάρκεια επίδρασης της αρχικής συνθήκης δοκιμάζοντας τρεις διαφορετικές αρχικές κατανομές φορτίου. Και οι τρεις προέκυψαν από μετρήσεις στάθμης 32 γεωτρήσεων της περιοχής, με παρεμβολή. Η πρώτη (αρχική συνθήκη αναφοράς) υπολογίστηκε με τη μέθοδο Kriging, χρησιμοποιώντας το γραμμικό μοντέλο για την περιγραφή της χωρικής δομής του φορτίου. Η δεύτερη (test1) υπολογίστηκε επίσης με τη μέθοδο kriging, χρησιμοποιώντας όμως το γραμμικό μοντέλο με γραμμική τάση. Η τρίτη (test2) βασίστηκε σε κατανομή φορτίου που είχε υπολογιστεί για τις ανάγκες ενός άλλου μαθηματικού μοντέλου που είχε αναπτυχθεί από το Εργαστήριο Γεν. και Γεωργ.

Υδραυλικής και Βελτιώσεων για την ίδια περιοχή (Τερζίδης και Μπαμπατζιμόπουλος, 1995). Η διάρκεια της προσομοίωσης ήταν 32 μήνες και ταυτίζονταν με την περίοδο ρύθμισης του μοντέλου (9/1992–4/1995).

Η σύγκριση των αρχικών συνθηκών test1 και test2 με την αρχική συνθήκη αναφοράς έγινε σχεδιάζοντας τις ισοπιεζομετρικές καμπύλες στο τέλος κάθε μήνα.

2.2. Οριακές συνθήκες

Οι οριακές συνθήκες του μοντέλου υπόγειων νερών πεδιάδας Πιερίας παρουσιάζονται στην Εικόνα 1. Το σύστημα των δύο υδροφορέων τροφοδοτείται πλευρικά, κατά μήκος του νότιου και του δυτικού ορίου. Στο νότιο τμήμα του (ελεύθερος υδροφορέας) και εν μέρει στο βορειοδυτικό (ζώνες με υψηλή περατότητα κατά μήκος ρεμάτων), εμπλουτίζεται και από τη διήθηση μέρους των βροχοπτώσεων. Σε μικρό βαθμό εκφορτίζεται στην περιοχή των πηγών. Το ανατολικό όριο του μοντέλου (κατά μήκος της ακτής) προσομοιώθηκε ως όριο γνωστού φορτίου.



Εικόνα 1. Οριακές συνθήκες του μοντέλου υπόγειων νερών πεδιάδας Πιερίας.

2.2.1 Οριακή συνθήκη γνωστού φορτίου

Το ανατολικό όριο του μοντέλου, κατά μήκος της ακτής, θεωρήθηκε όριο γνωστού φορτίου μεταβαλλόμενου με το χρόνο. Ανανεωμένες τιμές φορτίου δίνονταν στο τέλος κάθε μήνα. Οι τιμές αυτές υπολογίστηκαν με kriging από τις διαθέσιμες μετρήσεις φορτίου στις γεωτρήσεις της περιοχής μελέτης (γνωστό φορτίο αναφοράς).

Για να ελεγχθεί η επίδραση αυτής της οριακής συνθήκης, έγιναν δοκιμαστικές εκτελέσεις με οριακά φορτία $\pm 10\%$ και $\pm 20\%$ του γνωστού φορτίου αναφοράς. Η ιδιαιτερότητα αυτού του τύπου οριακής συνθήκης είναι ότι αποτελεί μια ανεξάντλητη πηγή νερού για τον υδροφόρα. Γι' αυτό, κατά τον έλεγχο της επίδρασης αυτής της οριακής συνθήκης, εξετάστηκαν, εκτός από τις προκύπτουσες μεταβολές φορτίου και τη χωρική κατανομή τους, και οι μεταβολές στις συνιστώσες του υδατικού ισοζυγίου του μοντέλου.

Επισημαίνεται ότι στο μοντέλο υπόγειων νερών της πεδιάδας Πιερίας η εισροή από το όριο γνωστού φορτίου θεωρήθηκε σχεδόν μηδενική. Αυτό λήφθηκε υπόψη κατά την ρύθμιση του μοντέλου και η εισροή από το όριο γνωστού φορτίου σε καμία χρονική περίοδο (μήνα) δεν ξεπέρασε το 1% του συνολικού υδατικού ισοζυγίου. Έτσι, κατά τη διερεύνηση αυτής της οριακής συνθήκης, οι αποκλίσεις που προέκυψαν στα υπολογιζόμενα φορτία και στις συνιστώσες του υδατικού ισοζυγίου ήταν ποσοτικά μικρές αλλά ποιοτικά σημαντικές.

2.2.2. Οριακή συνθήκη γνωστής πλευρικής εισροής

Ο υπολογισμός των ετήσιων πλευρικών εισροών (Πίνακας 1) βασίστηκε: στις ετήσιες βροχοπτώσεις-χιονοπτώσεις, στην έκταση που συνεισφέρει στην τροφοδοσία του υδροφορέα, και στο ποσοστό κατείσδυσης, που εξαρτάται από το είδος των πετρωμάτων. Στην περιοχή του Ολύμπου (καρστικά πετρώματα) το ποσοστό κατείσδυσης θεωρήθηκε ίσο με 45%, ενώ στην περιοχή των Πιερίων (νεογενή πετρώματα) θεωρήθηκε ίσο με 15%.

Πίνακας 1. Ετήσιες πλευρικές εισροές από Όλυμπο και Πιέρια

	Όλυμπος (m ³)	Πιέρια (m ³)
1 ^ο έτος	101,557,080	27,557,200
2 ^ο έτος	180,000,000	31,028,800
3 ^ο έτος	125,734,500	26,840,000

Κάθε ετήσια πλευρική εισροή μεταβλήθηκε κατά $\pm 10\%$ και $\pm 20\%$. Ελέγχθηκε η επίδραση κάθε μεταβολής στην ολική τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης (F_i) και στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης που αναλογεί στις παρατηρήσεις φορτίου (F).

2.2.3. Οριακή συνθήκη επαναπλήρωσης από βροχοπτώσεις

Επαναπλήρωση του υδροφορέα από βροχοπτώσεις παρατηρείται στο νότιο τμήμα (ζώνη Α) και σε περιοχές με υψηλή περατότητα στο βορειοδυτικό τμήμα (ζώνη Β), όπως φαίνεται στην Εικόνα 1. Οι ετήσιες τιμές επαναπλήρωσης από βροχοπτώσεις για κάθε ζώνη παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.

Κάθε τιμή του Πίνακα 2 μεταβλήθηκε κατά $\pm 10\%$ και $\pm 20\%$ (διατηρώντας τις υπόλοιπες σταθερές). Ελέγχθηκε η επίδραση κάθε μεταβολής στην ολική τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης (F_i) και στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης που αναλογεί στις παρατηρήσεις φορτίου (F).

Πίνακας 2. Ετήσιες τιμές επαναπλήρωσης από βροχοπτώσεις

	Ζώνη Α (m ³)	Ζώνη Β (m ³)
1 ^ο έτος	5,194,000	4,978,400
2 ^ο έτος	20,776,000	5,756,275
3 ^ο έτος	11,426,800	6,223,000

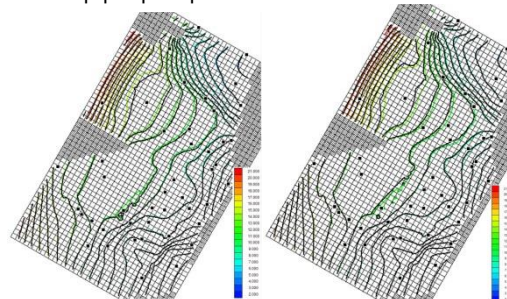
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΣΥΖΗΤΗΣΗ

3.1. Αρχική συνθήκη

Στην Εικόνα 2 παρουσιάζονται οι ισοπιεζομετρικές καμπύλες που προκύπτουν με την αρχική συνθήκη αναφοράς (έγχρωμες καμπύλες) και με τις αρχικές συνθήκες test1 και test2 (μαύρες καμπύλες), στο τέλος του 32^{ου} μήνα της προσομοίωσης. Επίσης φαίνονται οι θέσεις των γεωτρήσεων στις οποίες υπάρχουν μετρήσεις στάθμης/φορτίου.

Όπως φαίνεται στην εικόνα, και στις δύο δοκιμαστικές εκτελέσεις, σ' ένα τμήμα του μοντέλου η επίδραση της αρχικής συνθήκης δεν έχει απαλειφθεί

μέχρι το τέλος της προσομοίωσης (οι έγχρωμες καμπύλες δεν ταυτίζονται με τις μαύρες). Το τμήμα αυτό βρίσκεται προς το κέντρο του μοντέλου και στην περιοχή όπου υπάρχουν λιγότερες θέσεις μέτρησης της στάθμης/φορτίου. Αντίθετα, κοντά στα όρια του μοντέλου, και όπου η πυκνότητα των θέσεων μέτρησης είναι μεγαλύτερη, η επίδραση της αρχικής συνθήκης εξουδετερώθηκε μετά τον 20^ο μήνα για την test1 και μετά τον 14^ο μήνα για την test2.

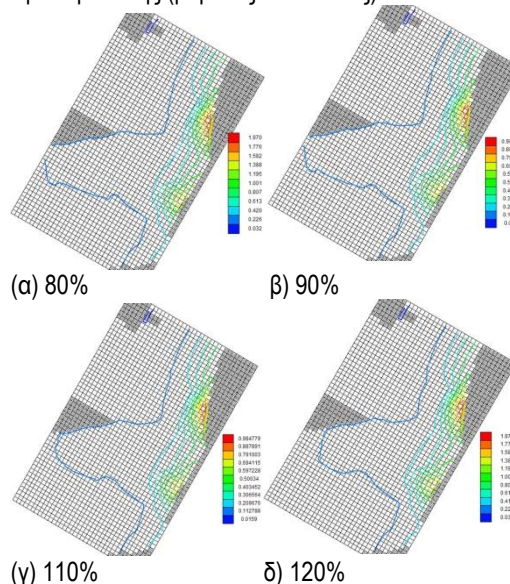


Εικόνα 2. Σύγκριση ισοπιεζομετρικών καμπυλών στο τέλος του 32^{ου} μήνα. Οι έγχρωμες καμπύλες προέκυψαν με την αρχική συνθήκη αναφοράς, ενώ οι μαύρες καμπύλες προέκυψαν με τις αρχικές συνθήκες test1 (αριστερά) και test2 (δεξιά).

3.2 Οριακές συνθήκες

3.2.1 Οριακή συνθήκη γνωστού φορτίου

Στην Εικόνα 3 παρουσιάζεται η χωρική κατανομή των απόλυτων τιμών των αποκλίσεων μεταξύ των φορτίων που υπολογίστηκαν με το γνωστό φορτίο αναφοράς και των φορτίων που υπολογίστηκαν μεταβάλλοντας αυτή την οριακή συνθήκη κατά $\pm 10\%$ και $\pm 20\%$. Τα αποτελέσματα αφορούν τον 20^ο μήνα της προσομοίωσης (μέγιστες αποκλίσεις).



Εικόνα 3. Χωρική κατανομή των απόλυτων τιμών των αποκλίσεων (m) μεταξύ των φορτίων που υπολογίστηκαν με το γνωστό οριακό φορτίο αναφοράς και των φορτίων που υπολογίστηκαν με ποσοστιαίες μεταβολές αυτού (20^{ος} μήνας).

Παρατηρήθηκε ότι ίσες κατά απόλυτη τιμή μεταβολές του οριακού φορτίου προκάλεσαν ίσες κατά απόλυτη τιμή αποκλίσεις του υπολογιζόμενου φορτίου. Η χωρική κατανομή των αποκλίσεων όμως

διαφοροποιήθηκε στο νοτιοδυτικό τμήμα του μοντέλου: στην περιοχή αυτή η επίδραση της μείωσης του οριακού φορτίου εκτεινόταν μακρύτερα από την επίδραση της αύξησής του. Στην υπόλοιπη περιοχή, η χωρική κατανομή των αποκλίσεων ήταν η ίδια και στις τέσσερις δοκιμές.

Στον Πίνακα 4 παρουσιάζονται οι ποσοστιαίες μεταβολές των συνιστωσών του υδατικού ισοζυγίου του μοντέλου, για τις τέσσερις δοκιμαστικές εκτελέσεις.

Πίνακας 4. Ποσοστιαίες μεταβολές των συνιστωσών του υδατικού ισοζυγίου λόγω της μεταβολής της οριακής συνθήκης γνωστού φορτίου

	-20%	-10%	+10%	+20%
Εισροές				
αποθήκευση	1.0%	0.5%	-0.5%	-0.8%
όριο γν. φορτίου	-57%	-35%	52 %	131%
πλευρ. εισροές	0%	0%	0%	0%
βροχοπτώσεις	0%	0%	0%	0%
Εκροές				
αποθήκευση	-5.5%	-2.5%	2.8%	5.5%
όριο γν. φορτίου	13%	6%	-5.7%	-10.5%
αντλήσεις	0%	0%	0%	0%
πηγές	-7.6%	-3.8%	3.8%	7.7%

Στο συνολικό ισοζύγιο, η εισροή από το όριο γνωστού φορτίου αντιπροσώπευε το 0.7% του συνόλου των εισροών, ενώ η εκροή περίπου το 20% του συνόλου των εκροών.

Είναι εμφανές ότι η μεταβολή του οριακού φορτίου επηρεάζει πολύ περισσότερο την εισροή από αυτό το όριο παρά την εκροή.

Όσον αφορά την εισροή από το όριο γνωστού φορτίου, παρατηρείται ότι η επίδραση της αύξησης του οριακού φορτίου είναι πολύ μεγαλύτερη από την επίδραση της αντίστοιχης μείωσης.

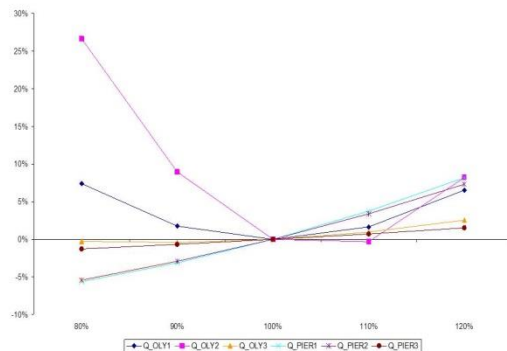
3.2.2 Οριακή συνθήκη γνωστής πλευρικής εισροής

Στα Σχήματα 1 και 2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διερεύνησης για την επίδραση της οριακής συνθήκης γνωστής πλευρικής εισροής. Το Σχήμα 1 αφορά στην επίδραση της μεταβολής των παροχών πλευρικής εισροής στην ολική τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης (F_i). Το Σχήμα 2 δείχνει την επίδραση στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης που αναλογεί μόνο στις παρατηρήσεις φορτίου (F).

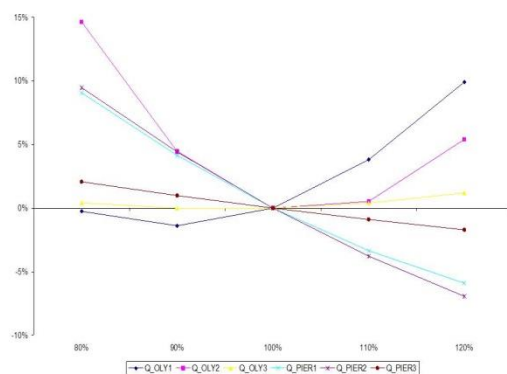
Για την πλευρική εισροή από τον Όλυμπο κατά το πρώτο έτος (Q_{OLY1}) της προσομοίωσης, παρατηρούμε ότι είτε αύξηση είτε μείωσή της αυξάνει την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, αν και η μείωσή της βελτιώνει λίγο την προσέγγιση των φορτίων. Το ίδιο περίπου ισχύει για τις πλευρικές εισροές από τον Όλυμπο και για τα δύο επόμενα έτη της προσομοίωσης (Q_{OLY2} και Q_{OLY3}).

Η επίδραση όμως της μεταβολής των ετήσιων πλευρικών εισροών από τα Πιέρια (Q_{PIER1} , Q_{PIER2} , Q_{PIER3}), παρουσιάζεται διαφορετική: όσο μειώνονται οι τιμές αυτών των ετήσιων εισροών, μειώνεται και η συνολική τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης (F_i). Η μείωσή τους όμως συνεπάγεται πολύ μεγάλη αύξηση της συνιστώσας της αντικειμενικής συνάρτησης που οφείλεται στις παρατηρήσεις φορτίου (F). Αντίστοιχα, η μείωση της F

που προκαλείται από την αύξηση αυτών των παραμέτρων, αντισταθμίζεται από την αύξηση της F_i .



Σχήμα 1. Επίδραση της μεταβολής των τιμών των παροχών πλευρικής εισροής στην ολική τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης

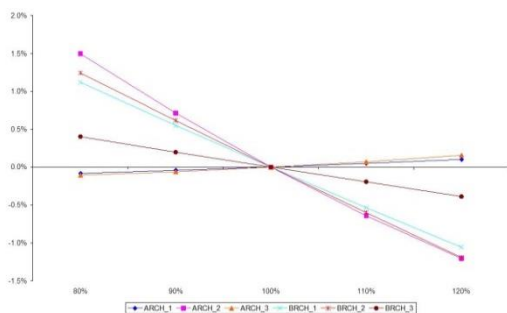


Σχήμα 2. Επίδραση της μεταβολής των τιμών των παροχών πλευρικής εισροής στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης που αναλογεί στις παρατηρήσεις φορτίου

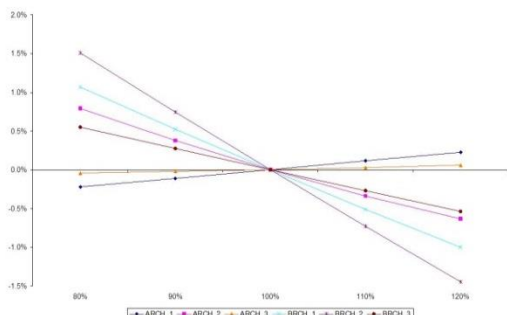
Οι ετήσιες πλευρικές εισροές από τα Πιέρια τροφοδοτούν το βόρειο μισό τμήμα του μοντέλου, στο οποίο παρατηρείται και η μεγαλύτερη υποεκτίμηση του φορτίου σε σχέση με τις υπάρχουσες μετρήσεις. Βελτίωση της προσέγγισης των μετρήσεων φορτίου σ' αυτό το τμήμα μπορεί να επιτευχθεί με αύξηση των ετήσιων πλευρικών εισροών από τα Πιέρια. Η αύξηση αυτή όμως έρχεται σε αντίθεση με τις υπάρχουσες υδρογεωλογικές μελέτες. Είναι επομένως απαραίτητο να συλλεχθούν περισσότερα υδρογεωλογικά δεδομένα για το τμήμα αυτό του υδροφορέα, βάσει αυτών να αναπροσαρμοστεί το θεωρητικό μοντέλο λειτουργίας του υδροφορέα (conceptual model) και στη συνέχεια να τροποποιηθεί αντίστοιχα και το αριθμητικό μοντέλο.

3.2.3. Οριακή συνθήκη επαναπλήρωσης από βροχοπτώσεις

Στα Σχήματα 3 και 4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διερεύνησης για την οριακή συνθήκη επαναπλήρωσης από βροχοπτώσεις. Το Σχήμα 3 αφορά στην επίδραση της μεταβολής της ετήσιας επαναπλήρωσης από βροχοπτώσεις στην ολική τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης (F_i). Το Σχήμα 4 δείχνει την αντίστοιχη επίδραση στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης που αναλογεί μόνο στις παρατηρήσεις φορτίου (F).



Σχήμα 3. Επίδραση της μεταβολής της ετήσιας επαναπλήρωσης από βροχοπτώσεις στην ολική τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης



Σχήμα 4. Επίδραση της μεταβολής της ετήσιας επαναπλήρωσης από βροχοπτώσεις στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης που αναλογεί στις παρατηρήσεις φορτίου

Η επίδραση της επαναπλήρωσης από βροχοπτώσεις στη ζώνη Β είναι μεγαλύτερη από αυτή στη ζώνη Α. Όσο αυξάνονται οι ετήσιες τιμές επαναπλήρωσης από βροχοπτώσεις στη ζώνη Β, μειώνονται και η F_t και η F . Αυτό ενισχύει το συμπέρασμα που προέκυψε από τη διερεύνηση των πλευρικών εισροών, ότι αύξηση της εισροής στο βορειοδυτικό τμήμα του μοντέλου θα βελτίωνε την προσέγγιση των μετρήσεων φορτίου.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στα μοντέλα που προσομοιώνουν μη μόνιμη ροή, είναι απαραίτητος ο έλεγχος της διάρκειας επίδρασης της αρχικής συνθήκης σε σχέση με τη συνολική διάρκεια της ρύθμισης. Είναι πιθανό αυτή η αρχική κατανομή του φορτίου να επηρεάζει τα υπολογιζόμενα φορτία των εκτελέσεων πρόβλεψης, όταν το μοντέλο, μετά την ρύθμισή του, χρησιμοποιείται ως διαχειριστικό εργαλείο.

Όταν κάποιο από τα όρια του μοντέλου θεωρείται όριο γνωστού φορτίου, πρέπει να ελέγχεται η επίδραση αυτής της οριακής συνθήκης (και της χωρικής κατανομής της) τόσο στο υδατικό ισοζύγιο του μοντέλου, όσο και στα υπολογιζόμενα φορτία. Η διερεύνηση αυτή είναι απαραίτητη για την εκτίμηση της αυξημένης αβεβαιότητας που χαρακτηρίζει τα αποτελέσματα των εκτελέσεων πρόβλεψης, λόγω της χρήσης της αυτού του τύπου οριακής συνθήκης.

Κατά την κατάρτιση και ρύθμιση ενός μοντέλου υπόγειων νερών πρέπει επίσης να εξετάζεται η επίδραση των οριακών συνθηκών γνωστής εισροής στην προσέγγιση των παρατηρήσεων πεδίου. Ο υπολογισμός του πλευρικού εμπλουτισμού ενός

υδροφορέα στηρίζεται σε εκτιμήσεις με βάση τα υδρολογικά και υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά της ευρύτερης περιοχής και χαρακτηρίζεται από μεγάλη αβεβαιότητα. Αν από τη διερεύνηση των οριακών συνθηκών γνωστής εισροής προκύπτει η ανάγκη τροποποίησης του θεωρητικού μοντέλου λειτουργίας του υδροφορέα, η τροποποίηση αυτή θα πρέπει να στηριχτεί σε νέα υδρολογικά και υδρογεωλογικά δεδομένα. Σ' αυτήν την περίπτωση, το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως διαχειριστικό εργαλείο, για την σωστότερη όμως εκτίμηση της αξιοπιστίας των προβλέψεων θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η αβεβαιότητα που σχετίζεται με το θεωρητικό μοντέλο λειτουργίας του υδροφορέα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Καβαλιεράτου, Σ., 2007. Ανάλυση και διερεύνηση της βιώσιμης διαχείρισης των υπόγειων νερών με μαθηματικά μοντέλα σε περιβάλλον GIS. Διδακτορική Διατριβή, ΑΠΘ.
- Τερζίδης, Γ., Μπαμπατζιμόπουλος, Χ., 1995. Αναρρύθμιση Μαθηματικού Μοντέλου πεδιάδας Πιερίας (Κατερίνης). Τελική Έκθεση.
- Ardito, C., Jordan, D., Lavenue, M., Ruskau, G., 2004. Requirements for defensible ground water modeling. INTERA Inc.
- Carrera-Hernandez, J.J., Smerdon, B.D., Mendoza, C.A., 2012. Estimating groundwater recharge through unsaturated flow modeling: Sensitivity to boundary conditions and vertical discretization. Journal of Hydrology, 452-453:90-101.
- Doherty, J., 2004. 'PEST Model-Independent Parameter Estimation', User Manual 5th edition, Watermark Numerical Computing.
- Gleeson, T., Alley, W.M., Allen, D.M., Sophocleous, M.A., Zhou, Y., Taniguchi, M., VanderSteen, J., 2012. Towards Sustainable Groundwater Use: Setting Long-Term Goals, Backcasting, and Managing Adaptively. Ground Water, 50(1):19-26.
- Harbaugh, A.W., Banta, E.R., Hill, M.C., McDonald, M.G., 2000. MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey modular ground-water model - User guide to modularization concepts and the ground-water flow process. U.S. Geological Survey Open-File Report 00-92.
- Karamouz, M., Ahmadi, A., Akhbari, M., 2011. Groundwater Hydrology. CRC Publishing, Boca Raton, New York.
- Mazzilli, N., Guinot, V., Jourde, H., 2010. Sensitivity analysis of two-dimensional steady-state aquifer flow equations. Implications for groundwater flow model calibration and validation. Advances in Water Resources, 33:905-922.
- Middlemis, H., 2000. Groundwater flow modelling guideline. Murray-Darling Basin Commission, Aquaterra Consulting Pty Ltd., South Perth, Western Australia.
- Reilly, T.E., 2001. System and boundary conceptualization in ground-water flow simulation. U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, Book 3, Applications of Hydraulics, Chapter B8

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ 4 ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΣΤΑΓΔΗΝ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΟΤΗΤΑ ΖΑΧΑΡΟΤΕΥΤΛΩΝ, ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥΣ

Π. Ντιούδης¹, Α. Φιλίντας¹, Μ. Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη², Δ. Καλφούντζος¹, Α. Παπαδόπουλος³

¹ Τομέας Αρδεύσεων-Διαχείρισης Αγροτικών Προϊόντων και Βιοπεριβάλλοντος, Τμήμα Μηχανικής Βιοσυστημάτων, ΤΕΙ Λάρισας, Περιφερειακή οδός Λάρισας-Τρικάλων, Τ.Κ.41110 Λάρισα, e-mail: filintas@teilar.gr

² Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγρ. Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Οδός Φυτόκου, Ν. Ιωνία Μαγνησίας, Τ.Κ. 38446

³ ΕΘΙΑΓΕ / Ινστιτούτο Εδαφολογίας Θεσσαλονίκης, 570 01 Θέρμη-Θεσσαλονίκης

Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση της επίδρασης 4 διαφορετικών διατάξεων στάγδην άρδευσης και της εδαφικής υγρασίας στην παραγωγικότητα της καλλιέργειας ζαχαροτεύτλων (*Beta vulgaris* L.) και στην εύρεση της φιλικότερης περιβαλλοντικά καθώς και της οικονομικότερης διάταξης (θέμα ιδιαίτερα σημαντικό για τους Έλληνες αγρότες στους τωρινούς καιρούς οικονομικής κρίσης).

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε σε αγροτική περιοχή του χωριού Ματαράγκα, του Νομού Καρδίτσας στην Κεντρική Ελλάδα. Έγιναν δειγματοληψίες εδάφους και ανάλυση των εδαφικών χαρακτηριστικών στο εργαστήριο σύμφωνα με SSSA. Μελετήθηκαν διάφοροι συνδυασμοί διατάξεων στάγδην άρδευσης (σε 4 επεμβάσεις (1x0,50m, 1x0,75m, 1,5x0,50m, και 1,5x0,75m) επί 6 επαναλήψεις), παρακολούθηθηκε ο όγκος διαβροχής του εδάφους και αξιολογήθηκαν οι συνέπειες στην παραγωγική συμπεριφορά των ζαχαροτεύτλων (Βάρος ριζών, ζαχαρικός τίτλος, ακατέργαστη ζάχαρη). Επίσης μετρήθηκε σε τακτά χρονικά διαστήματα η εδαφική υγρασία των επεμβάσεων με χρήση αισθητήρων μέτρησης εδαφικής υγρασίας (AMEY) σε συνδυασμό με συσκευή TDR (Time Domain Reflectometry).

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι μεταξύ των επεμβάσεων δεν παρατηρήθηκε στατιστικά σημαντική διαφορά ($p < 0,05$), στην παραγωγικότητα (Βάρος ριζών, ζαχαρικός τίτλος, ακατέργαστη ζάχαρη) των ζαχαροτεύτλων. Βάσει των ανωτέρω προτείνεται εφαρμογή της διάταξης 1,5x0,75m ως περισσότερο περιβαλλοντικής και οικονομικής αντί της χρησιμοποιούμενης 1x0,50m, διότι συνεπάγεται σημαντική οικονομία κόστους υλικών (42,94%), εργατικών, μεταφορικών, αποθήκευσης, συντήρησης, μειωμένης περιβαλλοντικής όχλησης, κλπ.

Λέξεις κλειδιά: Στάγδην άρδευση, παραγωγικότητα ζαχαροτεύτλων, εδαφική υγρασία, TDR, περιβαλλοντική και οικονομική ανάλυση.

STUDY OF THE INFLUENCE OF 4 DRIP IRRIGATION LAYOUT DESIGNS ON SUGAR BEET YIELD, AND ENVIRONMENTAL-ECONOMICAL ANALYSIS

P. Dioudis¹, A. Filintas¹, M. Sakellariou-Makrantonaki², D. Kalfountzos¹, A. Papadopoulos³

¹ Sector of Irrigation-Agricultural Products Management and Bioenvironment, Department of Biosystems Engineering, TEI of Larissa, Periferiaki Street Larissa-Trikala, GR-41110, Larissa, Greece, e-mail: filintas@teilar.gr

² Department of Agriculture Crop Production and Rural Environment, University of Thessaly, Fytokou Street, N. Ionia, GR-38446, Volos, Greece

³ NAGREF/ Soil Institute of Thessaloniki, GR-570 01, Thermi-Thessaloniki, Greece.

The aim of the present work is to study the influence of 4 different drip irrigation layout designs and soil moisture on sugar beet (*Beta vulgaris* L.) productivity and also to find the most environmental friendly and most economical layout design (a very important theme for Greek farmers in now days economical crisis).

The experiment took place in an agricultural area of village Mataragka, in Karditsa prefecture-Central Greece. Soil sampling was performed in the field and soil analysis in the laboratory according to SSSA. Various combinations of drip irrigation layout designs were studied (in 4 treatments (1x0,50m, 1x0,75m, 1,5x0,50m, and 1,5x0,75m) upon 6 replications), soil's wet volume was monitored and the effects on sugar beet productivity (roots weight, sugar content, raw sugar) were evaluated.

Also, treatments' soil moisture was measured in frequent time intervals by the use of soil moisture sensors in conjunction with a TDR (Time Domain Reflectometry) device.

Results show that between treatments it was not observed statistically significant difference ($p < 0,05$), on sugar beet productivity (roots weight, sugar content, raw sugar). Based on the above it is suggested the application of the drip irrigation layout design 1,5mx0,75m as most environmental and economical instead of the layout design 1mx0,50m which is used right now from the farmers, because the drip irrigation layout design 1,5mx0,75m entails important economy in parts cost (42.94%), in labour, transportation, storage, maintenance, reduced environmental infliction, etc.

Key words: drip irrigation, sugarbeet productivity, soil moisture, TDR, environmental and economical analysis.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παγκόσμια παραγωγή ζαχαροτεύτλων είναι περίπου 234.000.000 tn, τα οποία παράγονται από 59.000.000 στρέμματα, δηλαδή παγκοσμίως η μέση παραγωγή είναι 3,97 tn/στρ (FAOSTAT, 2001). Η Ευρωπαϊκή Ένωση, οι ΗΠΑ και η Ρωσία είναι οι τρεις μεγαλύτεροι παραγωγοί ζαχαροτεύτλων στον κόσμο (Dioudis et al., 2010). Τα ζαχαρότευτλα αποδίδουν το 30% της παγκόσμιας παραγωγής ζάχαρης (FAO, 2006). Στην εργασία του FAO/AGL, (2002) σχετικά με τα ζαχαρότευτλα αναφέρεται ότι μια καλή εμπορική παραγωγή για βιολογικό κύκλο 160 έως 200 ημερών είναι 4,0 έως 6,0 tn/στρ με περιεκτικότητα 15% σε ζάχαρη. Από στοιχεία της E.B.Z. στην Ελλάδα καλλιεργούνται περίπου 500.000 στρέμματα ζαχαρότευτλα. Από αυτά 8% αρδεύονται με στάγδην άρδευση, 5% αρδεύονται με μικρούς εκτοξευτήρες (μπέκ), 47% αρδεύονται με αυτοκινούμενο αρδευτή (καρούλι) με ράμπα, 35% περίπου με αυτοκινούμενο αρδευτή (καρούλι) με μεγάλο εκτοξευτήρα (κανόνι), 4% αρδεύονται με επιφανειακή άρδευση (κατάκλυση, αυλάκια) και τέλος ένα πολύ μικρό ποσοστό μικρότερο του 1 % αρδεύονται με sprayers (Ντιούδης, 2005; Dioudis et al., 2010). Μολονότι τα ζαχαρότευτλα θεωρούνται τα πιο ανθεκτικά φυτά στην ξηρασία (Dunham, 1993) σε σχέση με τον αραβόσιτο, τα φασόλια, τον ηλιάνθο κλπ, εντούτοις σε επίπεδα ανταγωνιστικών αποδόσεων, η έλλειψη εδαφικής υγρασίας μειώνει σημαντικά την παραγωγικότητα και την οικονομική απόδοση της καλλιέργειας. Από πειράματα της E.B.Z. παρατηρήθηκε ότι η μεγαλύτερη αύξηση στρεμματο-ζαχάρου σε σχέση με το μάρτυρα (χωρίς άρδευση) έφτασε τα 185% (EBZ, 1985). Στο Wyoming των ΗΠΑ, τα ζαχαρότευτλα αποτελούν την κύρια προσοδοφόρα καλλιέργεια με ετήσια συνεισφορά πάνω από 48.000.000 \$ (Wyoming Agricultural statistics service, 1998). Στη συγκεκριμένη πολιτεία, οι Sharmasarkar et al., (2001) σε εργασία τους, που αφορούσε οικονομική ανάλυση της χρήσης της στάγδην άρδευσης για παραγωγή ζαχαροτεύτλων, αναφέρουν ότι το βάρος ριζών και η παραγωγή ζάχαρης ήταν υψηλότερα με τη χρήση της στάγδην άρδευσης σε σχέση με την άρδευση με αυλάκια. Η επένδυση κεφαλαίου για το σύστημα της στάγδην μειώθηκε με την αύξηση της έκτασης. Το συνολικό μεταβλητό κόστος της καλλιέργειας (άρδευση, λίπανση κλπ.) για τη στάγδην άρδευση ήταν μικρότερο της άρδευσης με αυλάκια. Η ακαθάριστη πρόσοδος για την καλλιέργεια των ζαχαροτεύτλων ήταν 208 \$ και 231 \$ ανά στρέμμα για άρδευση με αυλάκια και σταγόνα αντίστοιχα.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να διερευνηθεί η επίδραση διαφορετικών διατάξεων άρδευσης: α) στην παραγωγικότητα (Βάρος ριζών, ζαχαρικός τίτλος, ακατέργαστη ζάχαρη) της καλλιέργειας των ζαχαροτεύτλων και β) στην εύρεση της περισσότερο περιβαλλοντικά φιλικής και της οικονομικότερης διάταξης στάγδην άρδευσης για μείωση αρνητικών επιπτώσεων στο περιβάλλον,

καθώς και μείωση κόστους υλικών, εργατικών, μεταφορικών, αποθήκευσης, συντήρησης, κλπ.

2. ΥΛΙΚΑ, ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε σε αγροτική περιοχή της Ματαράγκα Καρδίτσας στην Κεντρική Ελλάδα. Έγιναν δειγματοληψίες εδάφους και ανάλυση των εδαφικών χαρακτηριστικών στο εργαστήριο σύμφωνα με SSSA, (1986). Η σπορά των ζαχαροτεύτλων (*Beta vulgaris* L., var. Rizor) έγινε στις αρχές Απριλίου σε αποστάσεις 50cm μεταξύ των γραμμών και 12 cm επί των γραμμών. Δόθηκε βασική λίπανση με 14 χλγ N /στρ, 10 χλγ P /στρ και 8 χλγ K /στρ. Μελετήθηκαν διάφοροι συνδυασμοί διατάξεων συστήματος στάγδην άρδευσης, παρακολούθηθηκε ο όγκος διαβροχής του εδάφους και αξιολογήθηκαν οι συνέπειες στην παραγωγική συμπεριφορά των ζαχαροτεύτλων (Βάρος ριζών, ζαχαρικός τίτλος, ακατέργαστη ζάχαρη). Σε κάθε συνδυασμό (επεμβάση) διατάξεων σταλακτηφόρων και σταλακτήρων εφαρμόστηκε ίση ποσότητα νερού, σε διαφορετικούς χρόνους λειτουργίας του συστήματος. Η διάταξη των τεσσάρων επεμβάσεων και των έξι επαναλήψεων δίδεται στον πίνακα 1 και στο σχήμα1.

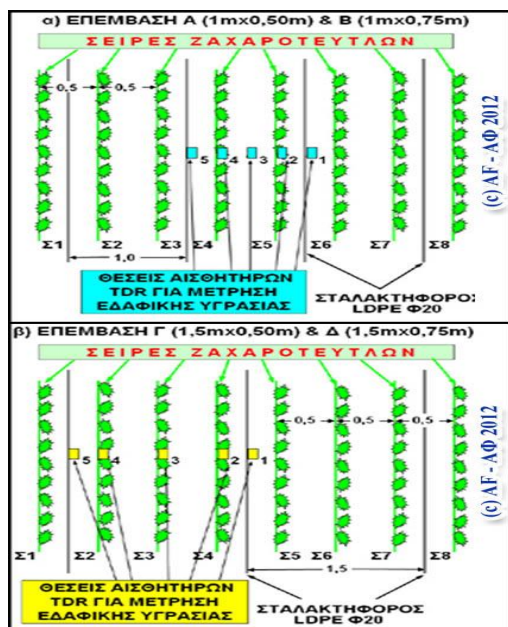
Πίνακας 1. Διάταξη των 4 (A, B, Γ, Δ) επεμβάσεων (σύνολο 24 πειραματικά τεμάχια).

Επεμβάσεις	⁽¹⁾ St x Sr	Επαναλήψεις					
		1η	2η	3η	4η	5η	6η
A	1x0,50	A	B	Γ	A	Γ	Δ
B	1x0,75	Δ	Γ	Δ	B	A	B
Γ	1,5x0,50	B	A	B	Γ	B	A
Δ	1,5x0,75	Γ	Δ	A	Δ	Δ	Γ

⁽¹⁾ St (m) = Ισαποχή μεταξύ σταλακτηφόρων σωλήνων. Sr (m) = Ισαποχή μεταξύ σταλακτήρων.

Κάθε πειραματικό τεμάχιο (π.τ.) είχε πλάτος 9m (κάθετα στις γραμμές σποράς) και μήκος 10,5m (παράλληλα στις γραμμές σποράς), και υπήρχαν συνολικά 24 πειραματικά τεμάχια. Η εφαρμοζόμενη ποσότητα νερού κάθε άρδευσης καθορίστηκε με τη βοήθεια εξατμισιμέτρου τύπου A με βάση την αθροιστική εξατμισοδιαπνοή από την προηγούμενη άρδευση. Έγιναν μετρήσεις της εδαφικής υγρασίας μια ημέρα μετά την άρδευση. Οι μετρήσεις έγιναν σε σημεία επί των σταλακτηφόρων σωλήνων, επί των γραμμών των ζαχαροτεύτλων και ανάμεσα από αυτές, όπως φαίνεται στο σχήμα 1. Ακόμη, υπολογίστηκε η υπόγεια συνεισφορά νερού λαμβάνοντας υπόψη τις μετρήσεις της εδαφικής υγρασίας, την εξατμισοδιαπνοή, την αρχική υγρασία του εδάφους πριν την έναρξη της άρδευσης, την ωφέλιμη βροχόπτωση, τον μέσο όρο της μεταβολής της εδαφικής υγρασίας σε κάθε πειραματικό τεμάχιο, το καθαρό ύψος (net) του νερού άρδευσης και τον αριθμό των αρδεύσεων.

Το αρδευτικό δίκτυο αποτελείται από τον αγωγό μεταφοράς, που ήταν Φ89 μεταλλικοί σωλήνες 6m με ταχυσυνδέσμους, τους πρωτεύοντες και δευτερεύοντες αγωγούς από πολυαιθυλένιο HDPE Φ40/6Atm και Φ25/6Atm αντίστοιχα, και τους σταλακτηφόρους σωλήνες από πολυαιθυλένιο LDPE Φ20 με ενσωματωμένους απλούς σταλακτήρες μαιονδικής διαδρομής. Οι σταλακτήρες αυτοί διαθέτουν βαθύ λαβύρινθο, ώστε να εξασφαλίζουν την τυρβώδη ροή του νερού και την ελάχιστη ευαισθησία στις εμφράξεις. Η παροχή εκάστου σταλάκτη ήταν 4 L/h σε πίεση λειτουργίας 1,20 Atm.



Σχήμα 1. Διάταξη σταλακτηφόρων σωλήνων και σταλακτών ανά πειραματική επέμβαση και θέσεις (1-5) αισθητήρων TDR AMEY.

Από μετρήσεις της παροχής τους διαπιστώθηκε ότι οι διακυμάνσεις της ήταν μέσα στα επιτρεπτά από τον κατασκευαστή όρια (Ντιούδης κ.ά., 2000; Ντιούδης, 2005; Filintas, 2008; Dioudis et al., 2010; Filintas et al., 2010). Στη μονάδα ελέγχου άρδευσης του πειραματικού αγρού υπήρχε διάταξη υδροκυκλώνα και υδροκυκλωνικού φίλτρου σίτας 120 mesh με ανάλογα εξαρτήματα και όργανα. Σε κάθε τεμάχιο υπήρχαν ρυθμιστές πίεσης. Οι μετρήσεις της κατ' όγκον υγρασίας έγιναν με τη μέθοδο TDR (Time Domain Reflectometry). Αυτή είναι μια, μη ραδιενεργός μέθοδος που βασίζεται στην άμεση μέτρηση της διηλεκτρικής σταθεράς του εδάφους και στην μετατροπή της σε κατ' όγκον υγρασία (Torr and Davis, 1985; Zegelin et al., 1992; Filintas, 2005; Filintas et al., 2007) η οποία αποδείχτηκε γρήγορη και αξιόπιστη, ανεξάρτητα από τον τύπο του εδάφους, εκτός από ακραίες περιπτώσεις εδαφών (Torr and Davis, 1985; Filintas, 2008; Filintas et al., 2010). Το σύστημα TDR που χρησιμοποιήθηκε, στην έρευνα έχει τη δυνατότητα να δίδει το προφίλ της εδαφικής υγρασίας σε βάθη 0-15, 15-30, 30-45, 45-60 και 60-75 cm, εξασφαλίζοντας καλή ακρίβεια μετρήσεων,

αφού οι αισθητήρες βρίσκονται σε συνεχή επαφή με το έδαφος.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα από τη μηχανική ανάλυση του εδάφους που έγινε στο εργαστήριο σύμφωνα με SSSA, (1986) φαίνονται στον πίνακα 2. Τα αποτελέσματα αντιπροσωπευτικών μετρήσεων της εδαφικής υγρασίας με αισθητήρες TDR για βάθος εδάφους 0-75cm φαίνονται στο σχήμα 2.

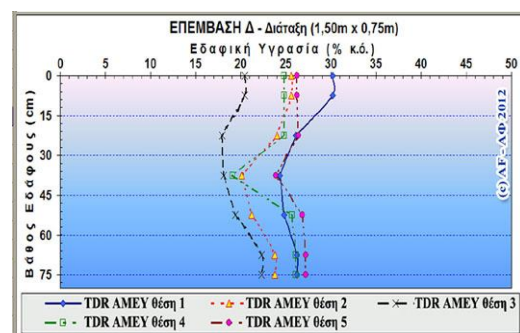
Πίνακας 2. Μηχανική ανάλυση του εδάφους

Εδαφικοί παράμετροι	Μονάδες	Τιμή
ΦΕΒ	$g \cdot cm^{-3}$	1,45
Μηχανική ανάλυση	% Άργιλος	21,17
	% Ιλύς	36,72
	% Άμμος	42,11
Κλάση εδάφους	Τάξη	L
Υδατοϊκανότητα	[3] % κ.β.	18,34
	[4] % κ.ό.	26,60
	[3] % κ.β	10,07
	[4] % κ.ό.	14,60
[1] ΣΜΜ		
Διαθέσιμη υγρασία	$cm \cdot cm^{-1}$	0,12
[2] Ks (σε 15cm βάθος)	$cm \cdot sec^{-1}$	$3,63 \cdot 10^{-4}$
[2] Ks (σε 45cm βάθος)	$cm \cdot sec^{-1}$	$3,63 \cdot 10^{-4}$

[1] ΣΜΜ = Σημείο Μόνιμης Μάρανσης.

[2] Ks = Κορεσμένη Υδραυλική Αγωγιμότητα.

[3] % κ.β. = % κατά βάρος. [4] % κ.ό. = % κατ' όγκο.



Σχήμα 2. Αντιπροσωπευτικές καμπύλες του προφίλ εδαφικής υγρασίας από μετρήσεις με αισθητήρες TDR AMEY σε 5 θέσεις και σε βάθος εδάφους 0-75cm, στην επέμβαση Δ (1,50m x 0,75m).

Τελικά η υπόγεια συνεισφορά νερού υπολογίστηκε περίπου σε 85mm. Από τις ενδείξεις της εδαφοτομής, το έδαφος κατατάσσεται στην κατηγορία Aquic σύμφωνα με το Soil Taxonomy (USDA, 1975). Άλλωστε, από την εδαφολογική μελέτη του ΕΘΙΑΓΕ φαίνεται ότι στο Νομό Καρδίτσας περίπου 50% των εδαφών ανήκει σε αυτή την κατηγορία (Aquic).

Από τη στατιστική ανάλυση των παραγωγικών χαρακτηριστικών (βάρος ριζών, ζαχαρικός τίτλος, ακατέργαστη ζάχαρη) των ζαχαροτεύτλων, προέκυψε ότι μεταξύ όλων των επεμβάσεων δεν παρατηρήθηκε στατιστικά σημαντική διαφορά (Πίνακας 3).

Πίνακας 3. Στατιστική ανάλυση των 4 επεμβάσεων.

Επέμβαση ^[1]	Αριθμός Παρατηρήσεων	Μέσο Βάρος Ριζών (χλγ/στρ)	Μέσος Ζαχαρικός Τίτλος (%)	Μέση Ακατέργαστη Ζάχαρη (χλγ/στρ)
1,0x0,50	12	11.150	12,371	1.383,3
1,0x0,75	12	11.142	12,300	1.369,3
1,5x0,50	12	11.350	12,646	1.437,8
1,5x0,75	12	11.367	12,630	1.439,4
Μέσο Τετράγωνο (MS)	Επέμβαση	181.319	0.401	15.934
	Πειραματικό σφάλμα	687.633	0,396	20.597
Τυπική Απόκλιση	1.0mx50cm	910	0,651	169,0
	1,0mx75cm	827	0,730	115,4
	1,5mx50cm	669	0,587	139,8
	1,5mx75cm	889	0,533	144,8
Τιμή F-test		0,260	1,010	0,770
Σημαντικότητα F-test		0,851	0,397	0,515
$\alpha = 0,05$		ΜΣΣ ^[2]	ΜΣΣ ^[2]	ΜΣΣ ^[2]

^[1] Επέμβαση = Ισαποχή σταλακτηφόρων σωλήνων (m) x Ισαποχή σταλακτήρων (m)

^[2] ΜΣΣ = Μη Στατιστικά Σημαντικό

Εκείνο που πρέπει να τονιστεί, είναι ότι στα πειραματικά των ζαχαροτεύτων επιτεύχθηκαν μέσες παραγωγές 11,252 tn/στρ και ότι υπήρχε υπόγεια συνεισφορά υπόγειου νερού, με μεγάλη πιθανότητα να βοήθησε να επιτευχθούν αυτές οι υψηλές παραγωγές. Η μέση παραγωγή ήταν 5,976 tn/στρ. Βάσει των ανωτέρω, με τιμές υλικών άρδευσης του έτους 2012, το κόστος υλικών/στρ της διάταξης 1mx0,50m είναι 246,50 €, ενώ της διάταξης 1,5mx0,75m είναι 140,65 €. Δηλαδή προκύπτει κέρδος/στρ 105,85 €/στρ. Η περιγραφή των υλικών και το κόστος αυτών στην κάθε διάταξη, καθώς και οι συγκρίσεις μεταξύ των διατάξεων φαίνονται στον πίνακα 4.

Από την οικονομική ανάλυση συμπεραίνεται ότι το κόστος αγοράς των υλικών άρδευσης (εκτός της μονάδας ελέγχου και του μεταλλικού αγωγού) στη

διάταξη 1,5mx0,75m μειώνεται κατά 42,94% έναντι της διάταξης 1,0mx0,50m. Εκτός όμως των ανωτέρω πρέπει να ληφθούν υπ'όψιν οι φθορές και το κόστος συντήρησης, το κόστος αποθήκευσης κι εργατικών και τα περιβαλλοντικά οφέλη που προκύπτουν από τη χρησιμοποίηση της ισαποχής σταλακτηφόρου 1,5m αντί της 1,0m, στην περίπτωση των ζαχαροτεύτων. Τελικά εκείνο που είναι σίγουρο για τα ζαχαρότευτλα είναι ότι η συνολική δαπάνη συντήρησης ως ποσοστό του αρχικού κόστους εγκατάστασης είναι σημαντική και σαφώς μικρότερη στην ισαποχή του 1,5 m, σε σχέση με την ισαποχή του 1 m.

Ακόμη, ένα άλλο στοιχείο που πρέπει να αναφερθεί είναι το κόστος των εργατικών και μεταφορικών που απαιτούνται:

Πίνακας 4. Κόστος υλικών στάγδην άρδευσης ζαχαροτεύτων σε €/στρ (με ΦΠΑ) για τιμές έτους 2012.

Υ λ ι κ ά Ά ρ δ ε υ σ η ς		Διάταξη 1m x 0,50m	Διάταξη 1,5m x 0,75m
α/α	Π ε ρ ι γ ρ α φ ή	[1] Κόστος Υλικών / στρ	[1] Κόστος Υλικών €/στρ
1	Σταλακτηφόρος σωλήνας	1.000mx0,161€/m = 161,00 €	667mx0,141€/m = 94,04 €
2	Μπλοκ σύνδεσης: (πολλαπλή κεφαλή σύνδεσης Φ20x1'' + βάννα γραμμής 1''x 1'' + φίλτρο γραμμής 1''x 1'')	3 τεμ. x9,04€/τεμ. = 27,12 €	2τεμ. x9,04€/τεμ. = 18,08 €
3	Διόφθαλμα Φ20 ^[2] + Σύνδεσμοι Φ20 + Διάφορα εξαρτήματα	58,38 €	28,53 €
Σ Υ Ν Ο Λ Ο		246,50 €	140,65 €

^[1] Το ανωτέρω κόστος σε €/στρ των ζαχαροτεύτων αφορά όλα τα υλικά στάγδην άρδευσης εκτός της μονάδας ελέγχου (φίλτρα, κλπ) και του μεταλλικού αγωγού μεταφοράς νερού.

^[2] Διόφθαλμα Φ20 = Πλαστικά τερματικά πώματα σταλακτηφόρου σωλήνα πολυαιθυλενίου.

α) Για τη μεταφορά του σταλακτηφόρου σωλήνα από την αποθήκη προς τον αγρό και το αντίστροφο στο τέλος της περιόδου. β) Για το άπλωμα του σταλακτηφόρου στον αγρό, στην αρχή της αρδευτικής περιόδου. γ) Για το μάζεμα του σταλακτηφόρου από τον αγρό, στο τέλος της αρδευτικής περιόδου. δ) Για την αποθήκευση του σταλακτηφόρου.

Στα ζαχαρότευτλα, η επιλογή ισαποχής σταλακτηφόρου ανά 1,5m αντί αυτής ανά 1m, συνεπάγεται περιβαλλοντικό (μείωση κινδύνου ρύπανσης περιβάλλοντος, εξοικονόμηση πόρων, κλπ) και οικονομικό όφελος όπως λιγότερα μέτρα σταλακτηφόρου κατά 33,33% (Πίνακας 4), που σημαίνει και την ανάλογη μείωση στα μεταφορικά, αποθήκευση και εργατικά.

4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Ο σκοπός των μετρήσεων της εδαφικής υγρασίας και της δημιουργίας των διαγραμμάτων (σχήμα 2), ήταν να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα όσον αφορά τη συσχέτιση των παραγωγικών χαρακτηριστικών των ζαχαροτεύτων με την κατανομή της υγρασίας στο έδαφος. Από την μορφή των αντιπροσωπευτικών καμπυλών κατανόησης της εδαφικής υγρασίας, (σχήμα 2), φαίνεται ότι η αύξηση της στα βαθύτερα εδαφικά στρώματα δεν είναι η αναμενόμενη για ένα έδαφος πηλώδες (Loam) σύμφωνα με τον Παπαζαφειρίου, (1984) και δίνει σοβαρές ενδείξεις για υπόγεια συνεισφορά νερού.

Από τη στατιστική ανάλυση των παραγωγικών χαρακτηριστικών (βάρος ριζών, ζαχαρικός τίτλος, ακατέργαστη ζάχαρη) των ζαχαροτεύτων, προέκυψε ότι μεταξύ όλων των επεμβάσεων δεν παρατηρήθηκε στατιστικά σημαντική διαφορά (Πίνακας 3). Το ανωτέρω αποτέλεσμα είναι σημαντικότερο και μεγάλης οικονομικής σημασίας για την συγκεκριμένη περιοχή, διότι δείχνει πως αντί της διάταξης 1mx0,50m μπορεί να εφαρμοστεί η 1,5mx0,75m χωρίς να επηρεαστούν οι αποδόσεις. Τελικά μεταξύ όλων των διατάξεων δεν προέκυψε σε αυτό το πείραμα, στατιστικά σημαντική διαφορά στα παραγωγικά χαρακτηριστικά των ζαχαροτεύτων. Επομένως, χρειάζεται επιπλέον έρευνα σε περιοχές χωρίς υπόγεια συνεισφορά νερού η οποία θα διαλευκάνει αν θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί γενικά το συμπέρασμα ότι η ισαποχή του σταλακτηφόρου ανά 1,5m αντί ανά 1,0m δεν επηρεάζει τα παραγωγικά χαρακτηριστικά των ζαχαροτεύτων.

Άρα, ενώ μπορεί να λεχθεί με σιγουριά ότι τα αποτελέσματα της έρευνας μπορούν να εφαρμοστούν στην υπό εξέταση περιοχή, δεν ισχύει το ίδιο για τις υπόλοιπες περιοχές όπου δεν υπάρχει υπόγεια συνεισφορά νερού. Από περιοχή χωρίς υπόγεια συνεισφορά νερού υπάρχουν δεδομένα ενός έτους από πειράματα ίδια με την παρούσα έρευνα, που έγιναν στον Πρόδρομο Λάρισας (Σακελλαρίου κ.ά., 1998). Από σχετική

εργασία που έγινε από τους Πανώρα κ.ά., (1994), μελετήθηκε το είδος των φθορών και το κόστος συντήρησης ενός δικτύου άρδευσης με σταγόνες σε σπρωμένα ροδακινιάς κατά την περίοδο 1989-93, προέκυψαν τα εξής:

Η αποκατάσταση των βασικών φθορών του δικτύου (σταλακτηφόροι σωλήνες) απορρόφησε το 76,5% του συνολικού κόστους συντήρησης το οποίο ήταν για την ανωτέρω περίοδο περίπου το 60% του κόστους αρχικής εγκατάστασης.

Εδώ πρέπει να τονισθεί ότι η συμμετοχή των φθορών και του κόστους συντήρησης των σταλακτηφόρων σωλήνων στο συνολικό κόστος συντήρησης του δικτύου στα ζαχαρότευτλα είναι σαφώς μεγαλύτερη από εκείνη σ' έναν σπρωμένα διότι:

α) στα ζαχαρότευτλα χρησιμοποιούνται περισσότερα μέτρα σταλακτηφόρου σωλήνα, και

β) στον σπρωμένα το σύστημα στάγδην άρδευσης παραμένει μόνιμο, ενώ στην καλλιέργεια ζαχαροτεύτων απλώνεται ο σταλακτηφόρος στην αρχή κάθε αρδευτικής περιόδου και μαζεύεται στο τέλος αυτής, με αποτέλεσμα να αυξάνονται κατά πολύ οι φθορές.

Επιπλέον, οι φθορές εξαρτώνται κατά πολύ από τον τύπο (πάχος τοιχώματος σωλήνα, ποιότητα πλαστικού υλικού, ελαστικότητα υλικού, διάμετρος, κλπ) του σταλακτηφόρου σωλήνα, από τα μηχανήματα απλώματος-μαζέματος, από την ικανότητα κι εμπειρία του αγρότη-χειριστή και από τον χώρο και τρόπο αποθήκευσης.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Έγιναν πειράματα στάγδην άρδευσης ζαχαροτεύτων (*Beta vulgaris* L.) σε αqυic εδάφη στην Μαραγάγκα Καρδίτσας, με σκοπό να διερευνηθεί η επίδραση διαφορετικών διατάξεων άρδευσης: α) στην παραγωγικότητα (βάρος ριζών, ζαχαρικός τίτλος, ακατέργαστη ζάχαρη) της καλλιέργειας των ζαχαροτεύτων και β) στην εύρεση της περισσότερο περιβαλλοντικά φιλικής και της οικονομικότερης διάταξης στάγδην άρδευσης για μείωση αρνητικών επιπτώσεων στο περιβάλλον, καθώς και μείωση κόστους υλικών, εργατικών, μεταφορικών, αποθήκευσης, συντήρησης, κλπ. Έγινε συνδυασμός ισαποχής σταλακτηφόρων και σταλακτάρων σε 4 επεμβάσεις (1,0x0,50m, 1,0x0,75m, 1,5x0,50m, και 1,5x0,75m) επί 6 επαναλήψεις.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι μεταξύ των επεμβάσεων δεν παρατηρήθηκε στατιστικά σημαντική διαφορά (Πίνακας 3), στην παραγωγικότητα (βάρος ριζών, ζαχαρικός τίτλος, ακατέργαστη ζάχαρη). Βάσει των ανωτέρω προτείνεται εφαρμογή της διάταξης 1,5x0,75m ως αντί της χρησιμοποιούμενης 1,0x0,50m. Από την οικονομική ανάλυση συμπεραίνεται ότι το κόστος αγοράς των υλικών άρδευσης (εκτός της μονάδας ελέγχου και του μεταλλικού αγωγού) στη διάταξη

1,5x0.75m μειώνεται κατά 42,94% έναντι της διάταξης 1,0x0,50m. Επιπλέον συνεπάγεται περιβαλλοντικό όφελος και σημαντική οικονομία (33,28%) πλαστικών υλικών τα οποία ως ρυπαντές έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής και αποδόμησης, επιβαρύνοντας σημαντικά το περιβάλλον. Τέλος, η προτεινόμενη διάταξη συνεπάγεται και μείωση κόστους εργατικών, μεταφορικών, αποθήκευσης, συντήρησης, κλπ.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- FAOSTAT, 2001. Crops Statistics 12th. In: <http://www.faostat.com>. FAO, Rome, Italy.
- Dioudis, P., Filintas, A., Papadopoulos, A. and M. Sakellariou-Makrantonaki, 2010. The influence of different drip irrigation layout designs on sugar beet yield and their contribution to environmental sustainability, *Fresen. Environ. Bull.*, 19 (No.5): 818-831.
- FAO, 2006. Major Food and Agricultural Commodities and Producers - Countries by Commodity. In: <http://www.fao.org>. FAO, Rome, Italy.
- FAO/AGL, 2002. Aglw water management group, crop water management, sugar beet. FAO, Rome, Italy, pp 1-3.
- Ντιούδης, Π., 2005. Επίδραση των διαφορετικών διατάξεων άρδευσης με σταγόνα σε ορισμένα παραγωγικά χαρακτηριστικά των ζαχαροτεύλων. Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Γεωπονίας, Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Σχολή Γεωπονικών Επιστημών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος, σελ.285.
- Dunham, R.M., 1993. The sugarbeet crop: Science into practice. Edited by D., A., Cooke and R. K. Scott, Chapman & Hall, pp 675.
- EBZ, 1985. Αποτελέσματα ερευνητικού έργου έτους 1985. Διεύθυνση Γεωπονικών Υπηρεσιών, Ελληνική Βιομηχανία Ζάχαρης (EBZ), Λάρισα, 32-39.
- Wyoming Agricultural Statistics Service, 1998. Wyoming Agricultural Statistics. Wyoming Department of Agriculture, Cheyenne, WY, pp 98.
- Sharmasarkar, F.C., Sharmasarkar, S., Held, L.J., Miller, S.D., Vance, G.F. and Zhang, R., 2001. Agro-economic analyses of drip irrigation for sugarbeet production. *Agron. Journal*, 93: 517-523.
- SSSA, 1986. Methods of soil analysis. Part 1-Physical and mineralogical methods. American Society of Agronomy Inc. and Soil Science Society of America (SSSA) Inc., Madison, Wisconsin USA, 1188 pp.
- Ντιούδης, Π., Σακελλαρίου - Μακραντωνάκη, Μ., Μασλάρης, Ν. και Νούσιος Γ., 2000. Διατάξεις άρδευσης με σταγόνες σε καλλιέργεια ζαχαροτεύλων. Πρακτικά 2^{ου} Εθνικού Συνεδρίου Γεωργικής Μηχανικής, σελ. 149-156, 28-30 Σεπτεμβρίου 2000, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.
- Φιλίντας, Α., 2008. «Μελέτη και χαρτογράφηση της παραγόμενης βιομάζας με χρήση χωρικής στατιστικής και γεωπληροφορικής» Μεταπτυχιακή Διατριβή, Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής, Γεωπονική Σχολή, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα, σσ. 160.
- Filintas, A., Dioudis, P. and Prochaska, C., 2010. GIS modeling of the impact of drip irrigation, of water quality and of soil's available water capacity on Zea mays L. biomass yield and its biofuel potential. *Desalination Water Treat.*, 13: 303-319.
- Topp, G.C. and Davis, J.L., 1985. Measurement of soil water content using time-domain reflectometry: A field evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 49: 19-24.
- Zegelin, S.J., White, I. and Russel, G.F., 1992. A critique of the time domain reflectometry technique for determining field soil-water content. In: *Advances in Measurement of Soil Physical Properties: Bringing Theory into Practice*. 30, SSSA Special Publication, pp. 187-208.
- Φιλίντας, Α., 2005. «Συστήματα Χρήσης Γης με έμφαση στα Γεωργικά Μηχανήματα, στις Αρδεύσεις και στη Νιτρορύπανση με Χρήση Δορυφορικής Τηλεπισκόπησης, Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών και Μοντέλων, σε επίπεδο Λεκάνης Απορροής στην Κεντρική Ελλάδα». Μεταπτυχιακή Διατριβή, Τμήμα Περιβάλλοντος, Σχολή Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Μυτιλήνη, σσ. 270.
- Filintas, A., Dioudis, P., Koutseris, E. and Papadopoulos, A., 2007. Soils Nitrates GIS mapping, Irrigation water and applied N-fertilizer effects in soils nitrogen depletion in a drip irrigated experimental field in Thessaly basin. *Proceedings of 3rd IASME/WSEAS International Conference on Energy, Environment, Eco-systems and Sustainable Development (EEESD'07)*, pp.487-492, Agios Nikolaos, Crete Island, Greece, 24-26 of July 2007.
- Παπαζαφειρίου, Ζ., 1984. Αρχές και πρακτική των αρδεύσεων. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 68, 186-189, 210, 214.
- USDA-Soil Survey Staff, 1975. Soil Taxonomy. A Basic System for Making and Interpreting Soil Surveys. USDA, Washington DC, USA.
- Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, Μ., Μασλάρης, Ν., Καλφούντζος, Δ. και Γούλας, Χ., 1998. Μελέτη διατάξεων άρδευσης με σταγόνες στην καλλιέργεια των ζαχαροτεύλων. Πρακτικά 1^{ου} Εθνικού Συνεδρίου Γεωργικής Μηχανικής, σελ. 271-280, Αθήνα 11-12 Δεκεμβρίου 1998, ΕΓΜΕ.
- Πανώρας, Γ.Α., Χατζηθανασιάδου, Μ.Α. και Τοπής, Γ.Χ., 1994. Είδος φθορών και κόστος συντήρησης δικτύων άρδευσης με σταγόνες. *Γεωπονικά*, 350:35-40.

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΛΙΠΑΝΣΗΣ ΣΤΗΝ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΕΒΙΑΣ ΣΤΗΝ ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΕΛΛΑΔΑ

Δ. Καλφούντζος¹, Ι. Βασιλάκογλου¹, Ν. Γκουγκουλιάς¹, Μ. Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη², Θ. Λέλλης¹

¹Τ.Ε.Ι. Θεσσαλίας, Τμήμα Τεχνολόγων Γεωπόνων, Λάρισα

²Π. Θ., Τμήμα Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Βόλος

Email: dka lf@teilar.gr

Σε πείραμα αγρού που εγκαταστάθηκε στο αγρόκτημα του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Λάρισας αξιολογήθηκε η επίδραση της αναλογίας των τριών κύριων θρεπτικών στοιχείων (N:P:K σε αναλογίες λιπαντικών μονάδων 1:1:1 και 1:1,5:1,5) ως βασική λίπανση και της άρδευσης (100% και 75% της εξατμισοδιαπνοής) στην απόδοση σε ξηρή βιομάζα φύλλων δύο ποικιλιών ('Morita' και 'Candy-stevia') στέβιας [*Stevia rebaudiana* (Bertoni) Bertoni]. Τα φυτά στέβιας σπάρθηκαν το Μάρτιο του 2012 σε σπορεία και αναπτύχθηκαν σε θερμοκήπιο έως το τέλος της Άνοιξης. Στη συνέχεια μεταφυτεύθηκαν στον αγρό σε πυκνότητα 4150 φυτά ανά στρέμμα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η απόδοση της στέβιας σε ξηρά φύλλα επηρεάστηκε ελάχιστα από την άρδευση και την αναλογία των τριών θρεπτικών στοιχείων. Η μεγαλύτερη απόδοση της ποικιλίας 'Candy-stevia' (185 kg/στρ) επιτεύχθηκε εκεί όπου εφαρμόστηκε η άρδευση του 100% της εξατμισοδιαπνοής και η βασική λίπανση N:P:K σε αναλογία λιπαντικών μονάδων 1:1,5:1,5. Αντίθετα, η απόδοση της ποικιλίας 'Morita' δεν επηρεάστηκε από τις παραπάνω επεμβάσεις, αλλά ήταν κατά μέσο όρο 44% μικρότερη από εκείνη της ποικιλίας 'Candy-stevia'.

Λέξεις κλειδιά: Στέβια, Υδατοκατανάλωση, Εξατμισοδιαπνοή, Λίπανση.

EFFECTS OF IRRIGATION AND FERTILIZATION IN STEVIA CROP YIELD IN CENTRAL GREECE

Δ. Kalfountzos¹, I. Vasilakoglou¹, N. Gougoulis¹, M. Sakellariou- Makrantonaki², Th. Lellis¹

¹Technological Educational Institute of Thessaly, Department Technology of Agriculture

²University of Thessaly, Department of Plant Production and Agricultural Environment, Volos

Zip. 411 10, Larissa, e-mail: dkalf@teilar.gr

In a field experiment that was installed on the farm of the Technological Educational Institute of Larissa was evaluated the effect of the ratio of the three main nutrients (N: P: K ratios in fertilization units 1:1:1 and 1:1.5:1.5) as the primary fertilization and of the irrigation (100% and 75% of evaporation) to yield a dry biomass of leaves of two varieties ('Morita' and 'Candy-stevia') Stevia [*Stevia rebaudiana* (Bertoni) Bertoni]. Stevia plants were sown in March 2012 in seedbeds and grown in a greenhouse until the end of Spring. Subsequently they were transplanted to the field at a density of 4150 plants per acre. The results showed that the yield of dry stevia leaves was hardly affected by irrigation, and the ratio of the three nutrients. Better performance of the variety 'Candy-stevia' (185 kg / ha) was achieved where irrigation was applied 100% of evapotranspiration and basic fertilization N: P: K in fertilization unit ratio of 1:1.5:1.5. In contrast, the yield of the variety 'Morita' was not affected by the above procedures, but was on average 44% lower than that of the variety 'Candy-stevia'.

Keywords: Stevia, Evapotranspiration, Water Irrigation, Fertilization.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η στέβια [*Stevia rebaudiana* (Bertoni) Bertoni] είναι θαμνώδες φυτό της οικογένειας Asteraceae, το οποίο ενδημεί κυρίως σε χώρες της Ν. Αμερικής και που καλλιεργείται, πλέον σε αρκετές χώρες παγκοσμίως για την εμπορική του εκμετάλλευση.

Οι γλυκοζίτες στεβιόλης (steviol glycosides) είναι τα γλυκά συστατικά των φύλλων του φυτού στέβια. Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί γλυκοζίτες στεβιόλης με διαφορετικές γλυκαντικές ιδιότητες. Οι γλυκοζίτες με τη μεγαλύτερη γλυκαντική ισχύ και τη μεγαλύτερη συγκέντρωση στα φύλλα του φυτού είναι η στεβιοσίδη (stevioside) και η ρεμπαουδιοσίδη-Α (rebaudioside-A). Ειδικότερα, οι δύο αυτοί γλυκοζίτες έχουν 200 έως 300 φορές μεγαλύτερη γλυκαντική ισχύ από την κοινή ζάχαρη. Σήμερα τα εκχυλίσματα της στέβιας χρησιμοποιούνται ως υποκατάστατο της

κοινής, κρυσταλλικής ζάχαρης και αντί άλλων φυσικών ή συνθετικών γλυκαντικών υλών σε ροφήματα, αναψυκτικά, διαίτη, ηδύποτα, γλυκίσματα, διαιτητικά τρόφιμα, τρόφιμα για διαβητικούς και ειδικά προϊόντα διατροφής. Με δεδομένο ότι μέχρι τώρα δεν υπάρχει οριστική απόφαση της EFSA, η στέβια επιτρέπεται να διατίθεται στο εμπόριο αποκλειστικά ως προϊόν ειδικής διατροφής. Παρ' όλα αυτά, εν αναμονή της απαιτούμενης κοινοτικής έγκρισης, οι Έλληνες αγρότες ενθαρρύνονται από τους κρατικούς φορείς να χρησιμοποιήσουν τη στέβια ως εναλλακτική καλλιέργεια στη θέση του καπνού και των ζαχαρότευλων, καθώς δεν έχει μεγάλες απαιτήσεις σε θρεπτικά στοιχεία, σε άρδευση και φυτοπροστατευτικά προϊόντα.

Η καλλιέργεια της στέβιας [*Stevia rebaudiana* (Bertoni) Bertoni] έχει ξεκινήσει σε πειραματικό επίπεδο τα τελευταία πέντε έτη στη χώρα μας, προκειμένου να διερευνηθεί το εάν μπορεί να αποτελέσει μία δυναμική εναλλακτική καλλιέργεια που θα αντικαταστήσει παραδοσιακές καλλιέργειες όπως ο καπνός, το βαμβάκι και τα ζαχαρότευτλα (Λόλας 2009, Ramesh κ.ά., 2006; Soejarto κ.ά., 1983). Επομένως, είναι απαραίτητο να αξιολογηθούν σε διάφορες περιοχές, καλλιεργητικές επεμβάσεις όπως η άρδευση και η λίπανση, προκειμένου να προσδιοριστούν σε κάθε περιοχή οι καταλληλότερες καλλιεργητικές μεταχειρίσεις για αυτή τη νέα καλλιέργεια (Novak κ. ά., 2012). Προσέτι, πρέπει να αξιολογηθεί στη χώρα μας και η παραγωγικότητα των κυριότερων ποικιλιών. Για το σκοπό αυτό, σε πείραμα αγρού αξιολογήθηκε η επίδραση δύο επιπέδων άρδευσης (100% της εξατμισοδιαπνοής και το 75%) και δύο αναλογιών λιπαντικών μονάδων N, P, K της βασικής λίπανσης (αναλογίες 1:1:1 και 1:1,5:1,5) στον αριθμό βλαστών ανά φυτό, το συνολικό νωπό και ξηρό βάρος, καθώς και την απόδοση σε ξηρά φύλλα δύο ποικιλιών στέβιας ('Morita' και 'Candy-stevia').

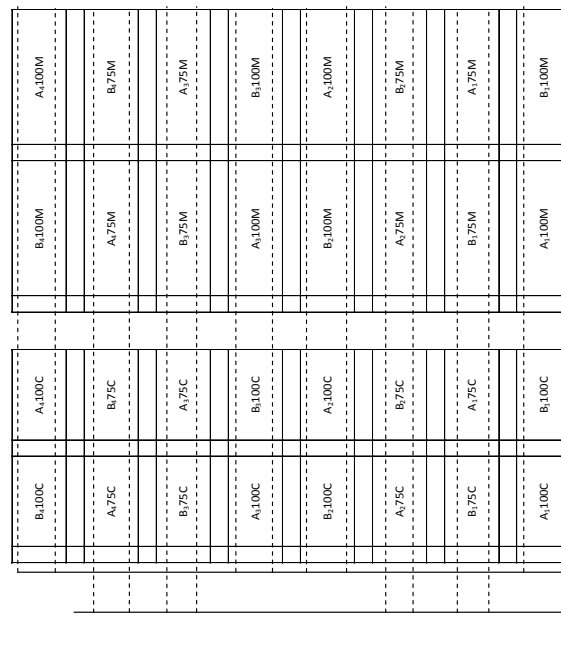
2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1 Περιγραφή της εγκατάστασης

Το αρδευτικό δίκτυο αποτελούνταν από τον κύριο αγωγό μεταφοράς από PE Φ32/6 Atm και από δευτερεύοντες αγωγούς PE Φ16/6 Atm. Οι σταλακτηφόροι σωλήνες της επιφανειακής στάγδην άρδευσης είχαν ισάποχή 1,0 m, μήκος 6 m και ήταν απλού τύπου PC/Φ16 της εταιρείας Eurodrip, με ενσωματωμένους σταλάκτες. Οι σταλάκτες ήταν απλοί, ισάποχής 0,33 m, παροχής 4 L h⁻¹. Μεταξύ της κύριας γραμμής και των γραμμών άρδευσης παρεμβάλλονταν μία χειρονακτική βάνα για τον έλεγχο της ροής στο σύστημα και ένας υδρομετρητής. Κάθε ηλεκτροβάνα με τον υδρομετρητή της συνδέθηκε με δύο γραμμές άρδευσης που τροφοδοτούσαν τέσσερα πειραματικά τεμάχια. Κάθε πειραματικό τεμάχιο επιφανειακής στάγδην άρδευσης είχε 2 σταλακτηφόρους σωλήνες (Σχήμα 1). Από τις ενδείξεις των υδρομετρητών και την έκταση του κάθε πειραματικού τεμαχίου υπολογίζονταν το ύψος του εφαρμοζόμενου νερού. Επίσης πάντα καταγράφονταν και η διάρκεια της άρδευσης για κάθε μεταχείριση. Εφαρμόστηκαν δύο επεμβάσεις άρδευσης και δύο επεμβάσεις λίπανσης σε δύο διαδεδομένες ποικιλίες στέβιας την Candy και τη Morita:

Τα εφαρμοζόμενα ποσοστά άρδευσης ήταν το 100% και το 75% της εξατμισοδιαπνοής. Τα εφαρμοζόμενα επίπεδα λίπανσης ήταν σε αναλογία των τριών κύριων θρεπτικών στοιχείων (N:P:K σε αναλογίες λιπαντικών μονάδων 1:1:1 και 1:1,5:1,5)

ως βασική λίπανση Τα πειραματικά τεμάχια που φαίνονται στο Σχήμα 1 χαρακτηρίζονται από δύο γράμματα και έναν αριθμό. Το πρώτο γράμμα χαρακτηρίζει το επίπεδο λίπανσης (A για το 1:1:1 και B το 1:1,5:1,5), ο δείκτης τον αριθμό της επανάληψης, ο αριθμός το επίπεδο άρδευσης το 100% και το 75% της εξατμισοδιαπνοής και το δεύτερο γράμμα C= ποικιλία Candy και M, τη Morita. Οι διαστάσεις κάθε πειραματικού τεμαχίου της ποικιλίας Candy ήταν 6x2,5=15 m² και της Morita 12x2,5=30 m². Το κάθε πειραματικό σχέδιο περιλάμβανε τυχαιοποιημένες ομάδες με τέσσερις επαναλήψεις.



Σχήμα 1. Σχηματική διάταξη πειραματικών τεμαχίων καλλιέργειας στέβιας 2012, αγροκτήματος Λάρισας.

2.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Για την υλοποίηση του ερευνητικού προγράμματος εγκαταστάθηκε πειραματικός αγρός στέβιας στη Λάρισα (αγρόκτημα TEI) που αρδεύεται με στάγδην άρδευση και εφαρμόζονται διάφορα επίπεδα άρδευσης στα πειραματικά τεμάχια. Από τις αναλύσεις των δειγμάτων εδάφους και την ταξινόμησή του (Πίνακας 1) προέκυψε ότι είναι αμμοαργιλοπηλώδες.

Με βάση τον αρχικό σχεδιασμό για την εφαρμογή των αρδεύσεων λαμβάνονται υπόψη εδαφολογικά στοιχεία (FC, PWP, διηθητικότητα). Η εφαρμογή των αρδεύσεων ακολουθεί την εφαρμοζόμενη στην περιοχή πρακτική και διενεργείται όταν έχει εξαντληθεί από το βάθος του ριζοστρώματος ποσότητα νερού περίπου ίση με την ωφέλιμη υγρασία στα πλέον αρδευόμενα πειραματικά τεμάχια.

Πίνακας 1. Φυσικές και χημικές ιδιότητες του εδάφους

Βάθος (cm)	Μηχανική σύσταση				ΟΟ %	ΦΕΒ g/cm ³	ΥΙ % κ.ο	ΣΜ % κ.ο
	Άμμος %	Ιλύς %	Αργίλος %	Χαρ/μός				
0-30	52,56	22,72	24,70	SCL	1,85	1,48	28,85	16,35
30-60	54,56	28,72	16,70	SCL	1,02	1,51	22,50	11,20
60-90	48,56	20,72	30,70	SCL	0,24	1,53	29,18	19,10

Βάθος (cm)	CaCO ₃ %	pH 1:5	H ₂ O ECe 25°C	N-Ανόργ. (mg/kg)	P-Olsen (mg/kg)	K-Εναλ. meq/100g εδ.	DTPA-Cu ppm	DTPA-Zn ppm	DTPA-Mn ppm	CEC meq/100g εδ.
0-30	1,30	7,6	0,485	93,31	20,83	1,1	0,980	0,725	16,65	35,87
30-60	0,16	7,7	0,152	121,32	6,55	0,78	1,205	0,495	15,02	37,07
60-90	0,90	8,1	0,232	107,18	8,85	0,78	1,135	0,605	13,36	36,49

Το πείραμα εγκαταστάθηκε σε αγρό του αγροκτήματος του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Λάρισας. Τα φυτά στέβιας σπάρθηκαν σε σπορεία το Μάρτιο του 2012 και αναπτύχθηκαν στο θερμοκήπιο του εργαστηρίου ζιζανιολογίας μέχρι τις αρχές Ιουνίου. Χρησιμοποιήθηκαν οι ποικιλίες στέβιας 'Morita' προέλευσης Λατινικής Αμερικής και 'Candy-stevia' προέλευσης Ισραήλ. Κατόπιν, όταν τα φυτά βρίσκονταν στο στάδιο των 10-12 cm, έγινε η μεταφύτευσή τους στον αγρό. Η βασική λίπανση περιελάμβανε τα θρεπτικά στοιχεία N, P και K σε δόσεις λιπαντικών μονάδων 1:1:1 και 1:1,5:1,5 αντίστοιχα. Η μεταφύτευση των φυτών στέβιας έγινε σε αποστάσεις 60 x 40 cm, ώστε να επιτευχθεί πυκνότητα 4150 φυτών/στρ (Taleie et al. 2012). Τις κύριες ομάδες αποτελούσαν οι δύο ποικιλίες στέβιας, τα υποτεμάχια τα δύο επίπεδα άρδευσης και τα υπο-υποτεμάχια τα δύο επίπεδα λίπανσης. Τα κύρια τεμάχια, τα υποτεμάχια και τα υπο-υποτεμάχια απείχαν μεταξύ τους 2 m. Το μέγεθος κάθε υπο-

υποτεμαχίου ήταν 15 m² και περιελάμβανε 4 γραμμές στέβιας. Η απομάκρυνση των ζιζανίων γίνονταν με το χέρι σε όλη τη διάρκεια της καλλιέργειας. Η απόδοση της στέβιας αξιολογήθηκε με μετρήσεις του συνολικού νωπού και ξηρού βάρους, του αριθμού βλαστών ανά φυτό και του συνολικού ξηρού βάρους των φύλλων. Για το σκοπό αυτό έγινε συγκομιδή 10 φυτών από τις δύο εσωτερικές γραμμές από κάθε πειραματικό τεμάχιο. Για κάθε πειραματικό τεμάχιο και κάθε επανάληψη θα εξεταστούν τα ποιοτικά χαρακτηριστικά της στέβιας από το Εργαστήριο Επεξεργασίας και Συντήρησης Αγροτικών Προϊόντων του Τμήματος Μηχανικής Βιοσυστημάτων του ΤΕΙ Λάρισας όπου και διατέθηκε όλη συγκομισθείσα παραγωγή.

Η σύγκριση των μέσων όρων έγινε με τεστ πολλαπλών ευρών Duncan, σε επίπεδο σημαντικότητας 0.05 (στατιστικό πακέτο SPSS 10).

Πίνακας 2. Ανόργανα διαθέσιμα στοιχεία σε καλλιέργεια δυο ποικιλιών Στέβιας(Candy, Morita)

	Μεταχείριση	N g/στρ.	P ₂ O ₅ g/στρ.	K ₂ O kg/στρ.	N g/στρ.	P ₂ O ₅ g/στρ.	K ₂ O kg/στρ.
		Ποικιλία (Candy)			Ποικιλία (Morita)		
Έναρξη καλλιεργητικής περιόδου		39,19	20,04	217,14	39,19	20,04	217,14
Προσθήκη λίπανσης	ΕΣΑ 100% (10-15-15)	10	15	15	10	15	15
	ΕΣΑ 100% (10-10-10)	10	10	10	10	10	10
	ΕΣΑ 75% (10-15-15)	10	15	15	10	15	15
	ΕΣΑ 75% (10-10-10)	10	10	10	10	10	10
Τέλος καλλιεργητικής περιόδου	ΕΣΑ 100% (10-15-15)	29,25	20,95	193,95	38,38	25,36	184,47
	ΕΣΑ 100% (10-10-10)	32,63	15,27	188,44	33,31	22,84	178,90
	ΕΣΑ 75% (10-15-15)	43,13	15,27	192,41	41,38	14,58	187,97
	ΕΣΑ 75% (10-10-10)	42,75	15,63	196,85	44,56	20,95	208,18

2.3 ΛΙΠΑΝΣΗ

Η θρέψη περιλάμβανε την βασική λίπανση (Α) με 90 Kg/στρ (10-15-15) και 66 Kg/στρ (15-15-15) στις διαφορετικές επεμβάσεις. Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται τα ισοζύγια θρεπτικών στις διαφορετικές μεταχειρίσεις.

2.4 ΥΔΑΤΟΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ

Η εφαρμόζομενη ποσότητα νερού σε κάθε άρδευση υπολογίζονταν από τα μετεωρολογικά στοιχεία που λαμβάνονταν από τον αυτόματο μετεωρολογικό σταθμό που ήταν εγκατεστημένος εντός του πειραματικού αγρού. Η εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς, ET_0 , έγινε με τη χρήση της αναθεωρημένης μεθόδου FAO-56 Penman-Monteith (Allen et al., 1998).

Η ET_0 είναι μια κλιματική παράμετρος και υπολογίστηκε από τα μετεωρολογικά δεδομένα που

συλλέχθηκαν από τον μετεωρολογικό σταθμό του Εργαστηρίου των Αρδεύσεων.

Η δυναμική εξατμισοδιαπνοή, ET_c , υπολογίστηκε από την εξατμισοδιαπνοή αναφοράς, ET_0 και τον απλό φυτικό συντελεστή (Allen et al., 1998) με τη σχέση:

$$ET_c = K_c ET_0 \quad (2.1)$$

Όπου: K_c , ο φυτικός συντελεστής ο οποίος για το στάδιο (1) διάρκειας 15 ημερών είχε την τιμή 0,5, στο στάδιο (2) διάρκειας 30 ημερών αυξάνονταν γραμμικά από 0,5 έως 0,9, στο στάδιο (3) διάρκειας 50 ημερών ήταν 0,9 και τέλος στο στάδιο (4) διάρκειας 15 ημερών μειώνονταν γραμμικά από 0,9 έως 0,4. Οι μετρήσεις αναφέρονται στην περίοδο Ιουνίου - Σεπτεμβρίου 2012. Στον πίνακα 2 παρουσιάζονται τα μήκη των σταδίων καθώς και η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας κατά στάδιο ανάπτυξης.

Πίνακας 3. Διάρκεια των σταδίων ανάπτυξης της καλλιέργειας και εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας κατά στάδιο.

Στάδιο	1	2	3	4	Σύνολο
Μήκος σταδίου (ημέρες)	15	30	50	15	110
ET_c (mm)	36,30	103,59	184,04	26,72	350,65

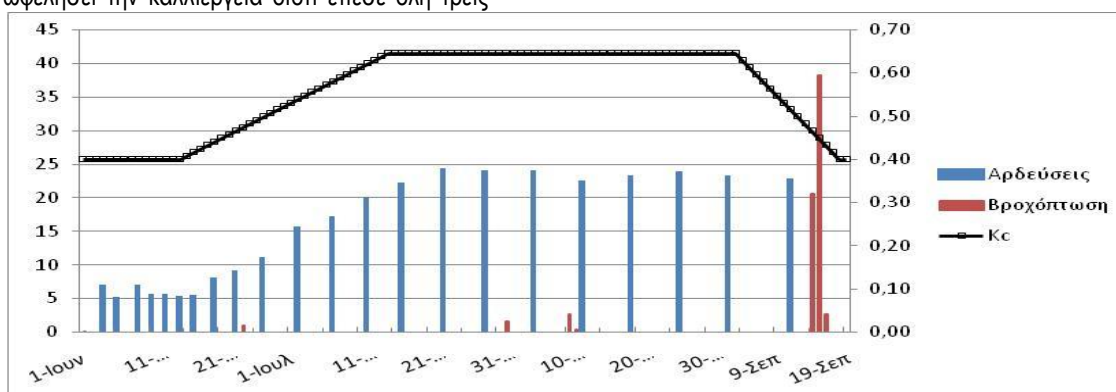
Αμέσως μετά τη μεταφύτευση ακολούθησε άρδευση όλων των πειραματικών τεμαχίων με περίπου 15 mm νερού. Στη συνέχεια, όλα τα πειραματικά τεμάχια αρδεύονταν μόλις εξαντλούνταν η ωφέλιμη υγρασία με σύστημα στάγδην άρδευσης. Συνολικά εφαρμόστηκαν 350 και 262 mm νερού αντίστοιχα στις μεταχειρίσεις άρδευσης αντίστοιχα. Χρησιμοποιήθηκε το πειραματικό σχέδιο των υπο-υποδιαιρεμένων πλήρων ομάδων με 4 επαναλήψεις.

Μετά τη μεταφύτευση της στέβιας έγινε άρδευση για το φύτρωμα της καλλιέργειας, με απλούς εκτοξευτήρες και δόση άρδευσης 15 mm. Η συνολική βροχόπτωση κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου ανήλθε σε 67,6 mm χωρίς να ωφελήσει την καλλιέργεια διότι έπεσε όλη τρεις

ημέρες πριν την συγκομιδή όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στο σχήμα 3.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Το σχήμα 2, δείχνει πως προγραμματίστηκαν οι αρδεύσεις με βάση το πρόγραμμα του FAO-56, τον φυτικό συντελεστή της καλλιέργειας και την ωφέλιμη βροχόπτωση. Παρατηρούμε ότι έγιναν 22 αρδεύσεις με μικρές δόσεις επειδή η στέβια έχει μικρού βάθους ριζικό σύστημα και θεωρείται καλλιέργεια χαμηλών απαιτήσεων σε αρδευτικό νερό.

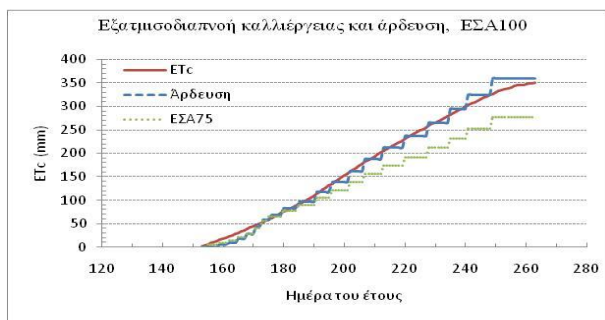


Σχήμα 2. Αρδεύσεις υπολογισμένες από το πρόγραμμα FAO-56

Το Σχήμα 3 δείχνει αθροιστικά το ύψος της άρδευσης σε κάθε μεταχείριση σε σχέση με την εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η απόδοση των δύο ποικιλιών στέβιας δεν επηρεάστηκε σημαντικά από τα επίπεδα

άρδευσης και λίπανσης, με εξαίρεση την ποικιλία 'Candy-stevia', της οποίας η απόδοση (185 kg/στρ) αυξήθηκε όταν λιπάνθηκε με αναλογία 1:1,5:1,5 λιπαντικών μονάδων N:P:K και δέχθηκε το 100% της ET_c νερού με την άρδευση (Σχήμα 5). Γενικά, η

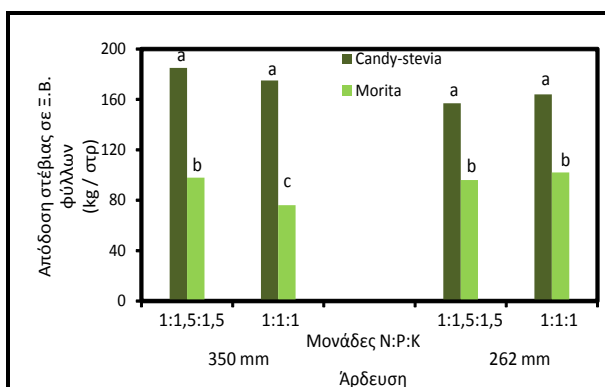
απόδοση της ποικιλίας 'Morita' ήταν μικρότερη κατά 44% από εκείνη της ποικιλίας 'Candy-stevia', κυρίως λόγω της μικρότερης συνολικής βιομάζας της καλλιέργειας. Οι αποδόσεις που επιτεύχθηκαν κατά το πρώτο έτος της καλλιέργειας ήταν περίπου στο 50% της μέσης απόδοσης σε παγκόσμιο επίπεδο (Ramesh κ.α., 2006). Αυτό το γεγονός, οφείλεται στις ιδιαίτερα υψηλές και παρατεταμένες θερμοκρασίες που επικράτησαν την καλοκαιρινή περίοδο του 2012 όπως χαρακτηριστικά φαίνονται στο Σχήμα 4.



Σχήμα 3. Συνολικό ύψος άρδευσης ανά μεταχείριση του πειράματος σε σχέση με την εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας



Σχήμα 4. Μέγιστη θερμοκρασία αέρα



Σχήμα 5. Επίδραση της άρδευσης και της αναλογίας N, P και K ως βασική λίπανση στην απόδοση σε ξηρά φύλλα δύο ποικιλιών στέβιας που καλλιεργήθηκαν το 2012 στη Λάρισα.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η καλλιέργεια της στέβιας στην περιοχή της Λάρισας μπορεί να επιτευχθεί με σχετικά μικρές απαιτήσεις σε άρδευση, με την προϋπόθεση ότι εφαρμόζονται μικρές ποσότητες νερού ανά τακτά

χρονικά διαστήματα. Η αναλογία λιπαντικών μονάδων των τριών κύριων θρεπτικών στοιχείων (N, P, K) δεν επηρεάζει σημαντικά την απόδοση σε βιομάζα, τουλάχιστον κατά το πρώτο έτος της καλλιέργειας. Η ποικιλία 'Candy-stevia' δίνει μεγαλύτερες αποδόσεις σε ξηρή βιομάζα φύλλων από ό,τι η ποικιλία 'Morita', κυρίως λόγω της μεγαλύτερης απόδοσης σε συνολική βιομάζα. Μεθοδολογία προσδιορισμού της συγκέντρωσης των γλυκαντικών συστατικών στεβιοσίδη και ρεμπαουδιοσίδη στα φύλλα της στέβιας, καθώς και μεθοδολογία παραλαβής των ουσιών αυτών σε κρυσταλλική μορφή, έχουν αναπτυχθεί από το Τμήμα Μηχανικής Βιοσυστημάτων του Τ.Ε.Ι. Λάρισας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Περιοδικά

- Novak, B., Benko, B., Spicnagel, A.M., Fabek, S. and Mesic, M. 2012. Yield, nitrate and steviol content of stevia (*Stevia rebaudiana* Bertoni) leaves as affected by fertilization rate. *Acta Horticulturae* 939: 249-254.
- Ramesh, K., V. Singh, and N.W. Megeji. 2006. Cultivation of stevia [*Stevia rebaudiana* (Bert.) Bertoni]: A comprehensive review. *Advances in Agronomy* 89: 137-177.
- Soejarto, D.D., C.M. Compardre, P.J. Medon, S.K. Kamath, and A.D. Kinghorn. 1983. Potential sweetening agents of plant origin. II. Field search for sweet-tasting stevia species. *Economic Botany* 37: 71-75.
- Taleie N., Hamidoghli Y., Rabiei B., Hamidoghli S. 2012. Effects of plant density and transplanting date on herbage, stevioside, phenol and flavonoid yield of *Stevia rebaudiana* Bertoni. *Intl J Agra Crop Sci.* Vol. 4 (6). 298-302.

Κεφάλαια Βιβλίων

- 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.
- Λόλας Π. 2009. Καλλιέργεια στέβιας. Το φυτό, Ιδιότητες, χρήσεις, έρευνα στην Ελλάδα. Πανεπιστημιακές εκδόσεις Θεσσαλίας, Βόλος.
- Παπαζαφειρίου Ζ. Γ. 1984. Αρχές και Πρακτική των Άρδεύσεων, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.

ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΑΡΔΕΥΤΙΚΕΣ ΑΝΑΓΚΕΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

Δημήτρης Κ. Παπαναστασίου¹, Θωμάς Μπαρτζάνης¹, Ιωάννης Τσιρογιάννης², Πηνελόπη Μπαλτζώη², Κωνσταντίνος Κίττας³

¹Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης, Ινστιτούτο Έρευνας και Τεχνολογίας Θεσσαλίας, Α' ΒΙ.ΠΕΒόλου, Τ.Θ. 15, Τ.Κ. 38500, Βόλος

²ΤΕΙ Ηπείρου, Τμήμα Ανθοκομίας και Αρχιτεκτονικής Τοπίου, 47100, Κωστακιοί Άρτα

³Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Οδός Φυτόκου, Τ.Κ. 38446, Ν. Ιωνία Μαγνησίας

Εκτιμάται η αύξηση στις ανάγκες για άρδευση που θα προκύψει στο μέλλον, εν όψη κλιματικής αλλαγής στην Περιφέρεια Θεσσαλίας. Στους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα θερμοκρασίας και βροχόπτωσης από σταθμούς της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας, και εκτιμήσεις για την μεταβολή των δύο αυτών μεγεθών στο μέλλον. Εξετάστηκαν τρεις περίοδοι: 1958–2010, 2040–2059 και 2080–2099. Για τον υπολογισμό των αρδευτικών αναγκών ελήφθησαν υπόψη η δυνητική εξατμισοδιαπνοή κάθε καλλιέργειας, η ωφέλιμη βροχόπτωση και η αναλογία κάθε καλλιέργειας στο τυπικό στρέμμα κάθε Νομού. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι στους τέσσερις Νομούς της Περιφέρειας Θεσσαλίας αναμένεται αύξηση 10,2%–12,6% και 15,8%–18,8% στις πραγματικές ανάγκες για άρδευση το μήνα Ιούλιο τις περιόδους 2040–2059 και 2080–2099, αντίστοιχα, σε σχέση με τις ανάγκες της περιόδου 1958–2010. Κατόπιν προτείνονται κάποιες τεχνικές που θα μπορούσαν να εφαρμοστούν ώστε να μειωθούν οι ανάγκες για άρδευση και να εξοικονομηθούν φυσικοί πόροι (χρήση τεχνολογιών γεωργίας ακριβείας για τη μείωση της ποσότητας του αρδευόμενου νερού, επέκταση των καλλιεργειών υπό κάλυψη για την αύξηση της αποτελεσματικότητας της χρήσης νερού).

Λέξεις κλειδιά: κλιματική αλλαγή, άρδευση, νερό, εξατμισοδιαπνοή, Θεσσαλία

FUTURE IRRIGATION NEEDS IN THE REGION OF THESSALY

Dimitris K. Papanastasiou¹, Thomas Bartzanas¹, Ioannis Tsirogiannis², Penelope Mpaltzoi², Constantinos Kittas³

¹Centre for Research and Technology Hellas, Institute for Research and Technology – Thessaly, 1st Industrial Area of Volos, P.O. Box 15, Volos, GR-38500

²TEI of Epirus, Dept. of Floriculture and Landscape Architecture, 47100 Kostakii Arta

³University of Thessaly, Department of Agriculture Crop Production and Rural Environment, Fytokou Str., N. Ionia, Magnisia, GR-38446

The increase in irrigation needs that will arise in the future in the Region of Thessaly due to climate change was estimated. Temperature and rainfall data collected from stations operated by the National Meteorological Service and projections for the future change of these two parameters were exploited in this study. Three periods were examined: 1958–2010, 2040–2059 and 2080–2099. The estimation of irrigation needs was based on the potential evapotranspiration for each crop, the effective rainfall and the proportion of each crop in the typical acre of every prefecture. The results showed that in the four prefectures of Thessaly an increase of 10.2%-12.6% and 15.8%-18.8% in the real irrigation needs in July in the periods 2040–2059 and 2080–2099 is expected, respectively, relative to the needs of the period 1958–2010. Then, some techniques that could be applied to reduce the irrigation needs and to save natural resources are proposed (i.e. application of precision agriculture technologies to reduce the quantity of irrigation water, spread of cultivations under cover to increase water efficiency).

Keywords: climate change, irrigation, water, evapotranspiration, Thessaly

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η κλιματική αλλαγή θεωρείται ως μία από τις σοβαρότερες περιβαλλοντικές, κοινωνικές και οικονομικές προκλήσεις που αντιμετωπίζει ο πλανήτης μας. Η γεωργία ανήκει σε εκείνους τους τομείς που θα επηρεαστούν περισσότερο λόγω της εξάρτησής της από τις καιρικές συνθήκες, με τις ενδείξεις για τη σοβαρότητα των επιπτώσεων να γίνονται όλο και πιο ανησυχητικές (Parrty et al., 2001). Οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στη γεωργία είναι ποικίλες (απώλεια καλλιεργήσιμης γης, σμίκρυνση καλλιεργητικών περιόδων, βιωσιμότητα ορισμένων καλλιεργειών, μείωση υδατικών αποθεμάτων, κ.α.). Οι καταστάσεις αυτές αναμένεται να προκαλέσουν σοβαρές οικονομικές

επιπτώσεις (αύξηση τιμών, αλλαγές στο εμπορικό ισοζύγιο μεταξύ των διαφόρων χωρών, κ.α.), καθώς και σοβαρές κοινωνικές επιπτώσεις (π.χ. πρόκληση επισιτιστικών προβλημάτων λόγω μείωσης των αποθεμάτων των ειδών διατροφής) (EEA, 2008; Lobell et al., 2008; Stern, 2007). Για τους λόγους αυτούς κρίνεται απαραίτητο να προσδιοριστούν οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής ώστε να ληφθούν αν είναι εφικτό κάποια μέτρα προσαρμογής και μετριασμού των επιπτώσεων.

Οι αρδευτικές ανάγκες των καλλιεργειών καθορίζονται κυρίως από την εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας, αλλά και από χαρακτηριστικά του εδάφους (υδατοϊκανότητα, διηθητικότητα, σημείο μόνιμης μάρανσης, φαινόμενο ειδικό βάρος, βάθος

αξιοποίησης και ποσοστό αξιοποίησης του εδάφους από το ριζικό σύστημα). Η εξατμισοδιαπνοή εξαρτάται από τις κλιματικές συνθήκες (ένταση ηλιακής ακτινοβολίας και διάρκεια έκθεσης σ' αυτή, θερμοκρασία, υγρασία, άνεμος), από τον τύπο του εδάφους και την περιεκτικότητά του σε υγρασία, το είδος και το βαθμό ανάπτυξης της χλωρίδας, το ποσοστό του εδάφους που καλύπτεται από αυτή (Monteith, 1973). Ενδεχόμενη μείωση του διαθέσιμου στο φυτό νερού μπορεί να οδηγήσει σε καταστάσεις υδατικής καταπόνησης, διότι η αύξηση της ξηρότητας του αέρα γύρω από την καλλιέργεια ίσως να μην μπορεί να αντισταθμιστεί με την απελευθέρωση ισόποσης λανθάνουσας ενέργειας από την καλλιέργεια, μέσω της διαπνοής (Κατσούλας, 2002). Επίσης, μείωση του διαθέσιμου νερού μπορεί να οδηγήσει και σε μειωμένη φωτοσυνθετική δραστηριότητα (Acock et al., 1976) αλλά και σε μειωμένη ικανότητα απορρόφησης θρεπτικών στοιχείων (Ehret and Ho, 1986).

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να εκτιμηθεί η αύξηση στις ανάγκες για άρδευση που θα προκύψει κατά τη διάρκεια δύο μελλοντικών εικοσαετιών (2040–2059 και 2080–2099) σε σχέση με τις ανάγκες της περιόδου 1958–2010.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1. Μετεωρολογικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν μετεωρολογικά δεδομένα που καταγράφηκαν σε σταθμούς της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας στην Περιφέρεια Θεσσαλίας. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε η μέση τιμή της θερμοκρασίας και το μέσο ύψος βροχόπτωσης που καταγράφηκε το μήνα Ιούλιο κατά την περίοδο 1958–2010 σε Αγχιάλο (22°48'Α, 39°13'Β), Καρδίτσα (21°48'Α, 39°22'Β), Λάρισα (22°25'Α, 39°38'Β) και Τρίκαλα (21°46'Α, 39°33'Β) (Πίνακας 1).

2.2. Εκτίμηση για μελλοντικές τιμές θερμοκρασίας και βροχόπτωσης

Η εκτίμηση για τις μελλοντικές τιμές της θερμοκρασίας και της βροχόπτωσης αντλήθηκε από τα αποτελέσματα του ερευνητικού προγράμματος ENSEMBLES (Van der Linden and Mitchell, 2009). Στο πλαίσιο αυτού του προγράμματος αναπτύχθηκε ένα σύστημα το οποίο λαμβάνει υπόψη τα χαρακτηριστικά, τα αποτελέσματα και τις αβεβαιότητες πληθώρας κλιματικών μοντέλων και υπολογίζει τις αλλαγές στη θερμοκρασία και στη βροχόπτωση που εκτιμά ότι θα παρατηρηθούν στην επιφάνεια της Γης τις δεκαετίες του 21^{ου} αιώνα. Οι εκτιμήσεις βασίζονται στο σενάριο εκπομπών A1B του IPCC και έχουν χωρική ανάλυση 300 x 300 km². Για τις εκτιμήσεις αυτές ως περίοδος αναφοράς θεωρείται η περίοδος 1961–1990. Μεταξύ των αποτελεσμάτων περιλαμβάνονται και εκτιμήσεις για τη μεταβολή του 50^{ου} εκατοστημορίου της κατανομής των τιμών της θερμοκρασίας κοντά στο έδαφος (σε ύψος 1,5 m) και της βροχόπτωσης για την περίοδο του καλοκαιριού, για τις χρονικές περιόδους 2040–2059 και 2080–2099. Η μεταβολή του 50^{ου}

εκατοστημορίου της κατανομής της θερμοκρασίας και της βροχόπτωσης θεωρήθηκε ως η μεταβολή που θα προκληθεί στην μέση τιμή της θερμοκρασίας και στο μέσο ύψος της βροχόπτωσης, αντίστοιχα. Οι εκτιμήσεις αυτές φαίνονται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 1. Μετεωρολογικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν.

Σταθμός	Μέση Τιμή Θερμοκρασίας (°C)	Μέσο Ύψος Βροχόπτωσης (mm)
Αγχιάλου	26,96	18,93
Καρδίτσας	26,24	18,63
Λάρισας	27,35	19,65
Τρικάλων	27,75	16,03

Πίνακας 2. Εκτιμήσεις για τη μεταβολή της θερμοκρασίας και της βροχόπτωσης στο μέλλον.

Παράμετρος	Περίοδος	
	2040 – 2059	2080 – 2099
50 ^ο εκατοστημόριο κατανομής θερμοκρασίας (°C)	4	6,5
50 ^ο εκατοστημόριο κατανομής βροχόπτωσης (%)	-25	-35

Πίνακας 3. Τιμή του φυτικού συντελεστή για κάθε καλλιέργεια.

Είδος Καλλιέργειας	Φυτικός Συντελεστής
Εσπεριδοειδή, Ελιές, Αμπέλια	0,55
Καπνά ανατολικού τύπου, Σανός	0,60
Οπωροφόρα, Ακρόδρυα, Όσπρια, Βαμβάκι, Φράουλες, Άνηθ, Αβοκάντο	0,65
Καπνά δυτικού τύπου, Κηπευτικά, Μποστανικά, Πατάτες, Ηλιάνθος, Ζαχαρότευτλα	0,70
Σιτηρά, Αραβόσιτος, Σόργο, Γρασιδία, Λεύκες	0,75
Τριφύλλι, Τεχνητοί λειμώνες, Ακτινίδιο	0,80
Μηδική	0,85

2.3. Υπολογισμός δυνητικής εξατμισοδιαπνοής

Η δυνητική εξατμισοδιαπνοή υπολογίστηκε με τη μέθοδο Blaney-Criddle (σχέση 1) (Allen and Pruitt, 1986; Blaney and Criddle, 1950; Palutikov et al., 1994). Στη σχέση 1, ET_p είναι η μηνιαία τιμή της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής σε mm για κάθε καλλιέργεια, K_c είναι η τιμή του φυτικού συντελεστή κάθε καλλιέργειας (Πίνακας 3) (Allen et al., 1998; Παπαζαφειρίου, 1999), θ είναι η μέση μηνιαία τιμή της θερμοκρασίας του αέρα σε °C και p είναι το μηνιαίο ποσοστό (%) ωρών ημέρας επί των ωρών ημέρας του έτους. Από σχετικούς πίνακες προκύπτει ότι για γεωγραφικό πλάτος 39°, για το μήνα Ιούλιο, $p = 10,16\%$. Αξίζει να σημειωθεί ότι θεωρήθηκε ότι οι τιμές του φυτικού συντελεστή κάθε καλλιέργειας

παραμένουν σταθεροί παρά τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής.

$$ET_{Pi} = K_{Ci} \cdot \frac{(\theta + 18) \cdot p}{2,2} \quad (1)$$

2.4. Υπολογισμός αναγκών για άρδευση

Οι ανάγκες για άρδευση χωρίς απώλειες των διαφόρων καλλιεργειών υπολογίστηκαν από τη σχέση 2, όπου A_i είναι οι μηνιαίες ανάγκες για άρδευση χωρίς απώλειες κάθε καλλιεργείας σε mm, δηλαδή σε m^3 / στρέμμα και R' είναι η μηνιαία τιμή της ωφέλιμης βροχόπτωσης σε mm. Η R' υπολογίστηκε από την εμπειρική σχέση 3, στην οποία R είναι η πραγματική τιμή της μηνιαίας βροχόπτωσης σε mm, η οποία θεωρήθηκε ίση με τη μηνιαία μέση τιμή της βροχόπτωσης, και c είναι ένας συντελεστής που παίρνει τιμές από 10 έως 20 και σχετίζεται με το υψόμετρο και την κλίση της περιοχής. Σε όλες τις περιπτώσεις θεωρήθηκε $c = 12$.

$$A_i = ET_{Pi} - R' \quad (2)$$

$$R' = R - \left(c + \frac{R}{8} \right) \quad (3)$$

Στη συνέχεια, υπολογίστηκαν οι μηνιαίες αρδευτικές ανάγκες χωρίς απώλειες κάθε καλλιεργείας, A'_i , λαμβάνοντας υπόψη την αναλογία της κάθε καλλιεργείας στο τυπικό στρέμμα κάθε Νομού, s (σε %), (σχέση 4). Στοιχεία για την s παρουσιάζονται στον Πίνακα 4. Τέλος, αφού ελήφθησαν υπόψη οι ανάγκες σε νερό στην κεφαλή του δικτύου (τεχνητή βροχή και μικροαρδεύσεις), προέκυψαν με πρόσθεση οι συνολικές πραγματικές ανάγκες για άρδευση όλων των καλλιεργειών σε κάθε Νομό, A_{total} , σε m^3 / στρέμμα.

$$A'_i = A_i \cdot \frac{s}{100} \quad (4)$$

Πίνακας 4. Ποσοστιαία αναλογία κάθε καλλιεργείας για κάθε Νομό.

Είδος Καλλιεργείας	Περίοδος Άρδευσης	Νομός			
		Καρδίτσας	Λάρισας	Μαγνησίας	Τρικάλων
Χειμερινά σιτηρά*	15/4 - 15/5	22,9	48,5	38,7	24,3
Αραβόσιτος	01/5 - 31/8	7,6	4,5	2,2	19,6
Βαμβάκι	15/5 - 20/8	56,6	28,5	14,5	26,3
Βρώσιμα όσπρια	15/5 - 31/8	0,2	0,7	-	0,9
Ζαχαρότευτλα	01/5 - 15/9	0,1	0,6	0,2	-
Βιομ. Τομάτα	01/5 - 15/8	0,4	1,4	0,6	-
Μηδική	01/5 - 30/9	5,5	1,9	2,0	12,3
Κηπευτικά υπαίθρου	01/5 - 30/9	0,9	0,4	1,7	2,7
Εσπεριδοειδή	1/5 - 30/9	-	-	0,1	-
Ελιές	1/6 - 30/9	0,1	3,6	27,6	2,2
Αμπέλια	1/5 - 30/9	1,1	1,7	0,7	1,5
Καπνός	15/5 - 15/8	-	0,3	-	0,1
Οπωροφόρα	15/5 - 30/9	-	2,1	3,9	0,5
Μποστανικά	1/5 - 15/8	0,6	0,4	0,2	2,3
Ακρόδρυα	15/5 - 30/9	0,2	2,8	5,0	1,0
Πατάτες	15/5 - 31/8	0,3	0,3	0,1	0,4
Τεχνητοί λειμώνες*	1/4 - 30/6	1,2	0,4	0,4	3,6
Λοιπά κτηνοτροφικά*	1/4 - 30/6	2,3	1,9	2,1	2,3

*Δεν αρδεύονται το μήνα Ιούλιο

2.5. Παραδοχές

Τα ποσοστά των μεταβολών των αρδευτικών αναγκών που υπολογίστηκαν θα πρέπει να θεωρηθούν υπερεκτιμημένα, οπότε οι μεταβολές αναμένονται να είναι μικρότερες. Αυτό οφείλεται στο ότι οι εκτιμήσεις για τη μεταβολή της θερμοκρασίας και της βροχόπτωσης στο μέλλον (Πίνακας 2) έχουν γίνει, όπως έχει ήδη αναφερθεί, λαμβάνοντας ως χρόνο αναφοράς την περίοδο 1961–1990, ενώ οι μεταβολές στην παρούσα μελέτη υπολογίστηκαν σε σχέση με την περίοδο 1958–2010. Επομένως, αν στην περίοδο αναφοράς είχε προστεθεί επιπλέον και η περίοδος 1991–2010, τότε οι μελλοντικές εκτιμήσεις θα ήταν μικρότερες σε μέγεθος. Επιπλέον, δεν ελήφθησαν υπόψη πιθανές αλλαγές στις διάφορες αγροτικές εργασίες, όπως στη σπορά, στο

χρόνο συγκομιδής, στην ποσότητα και στη συχνότητα των αρδεύσεων και των λιπάνσεων, κ.λ.π., καθώς και πιθανές επιπτώσεις της ερημοποίησης στην απόδοση των καλλιεργειών.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

3.1. Εκτίμηση μελλοντικών αναγκών άρδευσης

Τα μετεωρολογικά δεδομένα του Πίνακα 1 χρησιμοποιήθηκαν στις σχέσεις 1 και 3 για τον προσδιορισμό της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής κάθε καλλιεργείας, ET_{Pi} , και της ωφέλιμης βροχόπτωσης, R' , για το μήνα Ιούλιο. Στη συνέχεια υπολογίστηκαν οι ποσότητες A_i , A'_i και A_{total} . Η παραπάνω διαδικασία επαναλήφθηκε μεταβάλλοντας τις τιμές της θερμοκρασίας και της βροχόπτωσης στις

σχέσεις 1 και 3 αντίστοιχα, σύμφωνα με τις μελλοντικές εκτιμήσεις (Πίνακας 2).

Ο Πίνακας 5 δείχνει ότι οι συνολικές πραγματικές ανάγκες για άρδευση το μήνα Ιούλιο την περίοδο 2040–2059 αναμένεται να αυξηθούν από 10,2% έως 12,6% σε σχέση με τις ανάγκες της περιόδου 1958–2010. Επιπλέον αύξηση των συνολικών πραγματικών αναγκών από 5,0% έως 5,7% αναμένεται να παρατηρηθεί την περίοδο 2080–2099 σε σχέση με την περίοδο 2040–2059. Ακόμη, ο Πίνακας 5 φανερώνει ότι οι συνολικές πραγματικές ανάγκες για άρδευση είναι μεγαλύτερες και θα συνεχίσουν να είναι στους Νομούς Τρικάλων και

Καρδίτσας, ενώ είναι και θα είναι αρκετά μικρότερες στους Νομούς Μαγνησίας και Λάρισας.

Στον Πίνακα 6 φαίνονται οι ανάγκες για άρδευση χωρίς απώλειες ανά καλλιέργεια και ανά νομό το μήνα Ιούλιο για τις περιόδους 1958–2010 και 2040–2059 (στήλες Α και Β, αντίστοιχα). Από τον Πίνακα αυτόν προκύπτει ότι στο Νομό Τρικάλων το 85% του νερού καταναλώνεται για άρδευση καλλιεργειών αραβόσιτου, βαμβακιού και τριφυλλίου, ενώ στο Νομό Καρδίτσας το 75% του νερού καταναλώνεται για άρδευση καλλιεργειών βαμβακιού.

Πίνακας 5. Συνολικές πραγματικές ανάγκες για άρδευση, A_{total} (m³ / στρέμμα) για το μήνα Ιούλιο σε κάθε Νομό και μεταβολές αυτών.

	Νομός			
	Καρδίτσας	Λάρισας	Μαγνησίας	Τρικάλων
1958–2010				
A_{total}	121,4	76,5	81,1	126,6
2040–2059				
A_{total}	136,5	86,0	91,3	139,5
% μεταβολή στο μέγεθος A_{total} σε σχέση με την περίοδο 1958–2010	12,4	12,4	12,6	10,2
2080–2099				
A_{total}	143,7	90,8	96,3	146,5
% μεταβολή στο μέγεθος A_{total} σε σχέση με την περίοδο 1958–2010	18,4	18,8	18,7	15,8
% μεταβολή στο μέγεθος A_{total} σε σχέση με την περίοδο 2040–2059	5,3	5,7	5,4	5,0

Πίνακας 6. Ανάγκες για άρδευση χωρίς απώλειες (m³ / στρέμμα) ανά καλλιέργεια, A_i' , ανά νομό, το μήνα Ιούλιο την περίοδο 1958–2010 (στήλη Α) και 2040–2059 (στήλη Β).

Είδος Καλλιέργειας	Νομός							
	Καρδίτσας		Λάρισας		Μαγνησίας		Τρικάλων	
	A	B	A	B	A	B	A	B
Αραβόσιτος	11,3	12,7	6,8	7,7	3,3	3,7	30,7	33,8
Βαμβάκι	72,7	81,8	37,3	42,0	18,9	21,2	35,6	39,3
Βρώσιμα Όσπρια	0,3	0,3	1,0	1,1			1,3	1,4
Ζαχαρότευτλα	0,1	0,2	0,8	1,0	0,3	0,3		
Βιομ. Τομάτα	0,6	0,6	2,0	2,2	0,8	0,9		
Μηδική	9,3	10,4	3,3	3,7	3,4	3,8	21,8	24,0
Κηπευτικά υπαίθρου	1,2	1,4	0,6	0,6	2,4	2,7	3,9	4,3
Εσπεριδοειδή					0,1	0,1		
Ελιές	0,1	0,1	4,0	4,5	30,3	34,2	2,5	2,8
Αμπέλια	1,2	1,3	1,9	2,1	0,8	0,9	1,7	1,9
Καπνός			0,4	0,4			0,1	0,1
Οπωροφόρα			2,7	3,1	5,1	5,7	0,7	0,7
Μποστάνια	0,8	0,9	0,6	0,6	0,3	0,3	3,4	3,7
Ακρόδρυα	0,3	0,3	3,7	4,1	6,5	7,3	1,4	1,5
Πατάτες	0,4	0,5	0,4	0,5	0,1	0,2	0,6	0,6

3.2. Προτάσεις για τη μείωση των αναγκών άρδευσης

Αναμφίβολα, η αξιοποίηση του υπάρχοντος αρδευτικού νερού με τον καλύτερο δυνατό τρόπο (π.χ. μείωση απωλειών, νυχτερινή άρδευση), η χρήση της ελλειμματικής άρδευσης, καθώς και η τροποποίηση των καλλιεργειών και η στροφή προς

καλλιέργειες με χαμηλότερες απαιτήσεις σε νερό, θα οδηγούσαν σε μείωση της ποσότητας του νερού που καταναλώνεται για άρδευση. Όμως, υπάρχουν και τεχνικές που αν εφαρμοστούν σωστά μπορούν να οδηγήσουν σε μείωση της κατανάλωσης νερού.

Η γεωργία ακριβείας είναι μια σύγχρονη προσέγγιση στη διαχείριση των αγρών και των

γεωργικών εκμεταλλεύσεων, που έχει ως σκοπό τη βελτιστοποίηση τόσο της ποιότητας όσο και της απόδοσης των αγροτικών καλλιεργειών. Η δημιουργία ζωνών διαχείρισης των αγροτεμαχίων αποτελεί τη βάση εφαρμογής της γεωργίας ακριβείας. Παρέχει τη δυνατότητα για εφαρμογή μεταβλητών καλλιεργητικών φροντίδων, μεταξύ των οποίων είναι και η άρδευση, για κάθε τμήμα του αγρού, ανάλογα με τις πραγματικές του, ανά περιοχή, ανάγκες. Έτσι, με τη χρήση τεχνικών γεωργίας ακριβείας δεν θα αρδεύεται με την ίδια δόση άρδευσης όλο το τμήμα ενός αγρού, αλλά σύμφωνα με τις ζώνες διαχείρισης, η άρδευση σε κάθε ζώνη – τμήμα του αγρού θα είναι ανάλογη των πραγματικών απαιτήσεων για νερό. Η εξοικονόμηση χρήσης υδάτινων πόρων με τη χρήση γεωργίας ακριβείας μπορεί να φτάσει και το 20%.

Οι καλλιέργειες υπό κάλυψη είναι το κατεξοχήν καλλιεργητικό σύστημα με το οποίο περιορίζεται δραστηρικά η κατανάλωση του νερού. Η χρήση δε υδροπονικών συστημάτων στα οποία το νερό ανακυκλώνεται και επαναχρησιμοποιείται (ημίκλειστα ή κλειστά υδροπονικά συστήματα) μπορεί να οδηγήσει σε ακόμα μεγαλύτερη εξοικονόμηση νερού. Είναι χαρακτηριστικό ότι η αποτελεσματικότητα της χρήσης του νερού, δηλαδή τα kg προϊόντος που παράγονται ανά m³ χρήσης νερού, μπορεί ακόμη και να τετραπλασιαστεί σε κλειστό υδροπονικό σύστημα σε θερμοκήπιο, σε σχέση με την αποτελεσματικότητα σε ανοιχτό αγρό. Αύξηση της αποτελεσματικότητας χρήσης νερού συνεπάγεται καλύτερη αξιοποίηση των διαθέσιμων υδάτινων πόρων, άρα και εξοικονόμησή τους. Επίσης, τα τελευταία χρόνια, σε συνδυασμό και με τη δυσκολία αντιμετώπισης εχθρών κατά την καλοκαιρινή περίοδο, εφαρμογή βρίσκει και η χρήση διχτυοκηπίων, είτε απλά ως κάλυψη των καλλιεργειών, είτε ως απλές μεταλλικές κατασκευές πλήρως καλυμμένες με δίχτυ. Λόγω της μείωσης της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας μειώνονται σημαντικά και οι ανάγκες σε νερό των καλλιεργειών.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία εκτιμήθηκαν οι μελλοντικές ανάγκες για άρδευση των αγροτικών καλλιεργειών το μήνα Ιούλιο στους τέσσερις Νομούς της Περιφέρειας Θεσσαλίας μέσω της δυνητικής εξαμυσοδιαπνοής (μέθοδος Blaney-Criddle) και της ωφέλιμης βροχόπτωσης, λαμβάνοντας υπόψη την αναλογία της κάθε καλλιέργειας στο τυπικό στρέμμα κάθε Νομού. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι πραγματικές ανάγκες για άρδευση εκτιμάται ότι θα αυξηθούν από 10,2% έως 12,6% και από 15,8% έως 18,8% τις περιόδους 2040 – 2059 και 2080 – 2099, αντίστοιχα, σε σχέση με τις πραγματικές ανάγκες για άρδευση της περιόδου 1958 – 2010. Το γεγονός αυτό καθιστά απαραίτητο τη λήψη προσαρμοστικών προς την κλιματική αλλαγή μέτρων, στα οποία συμπεριλαμβάνονται τόσο η αναδιάρθρωση των καλλιεργειών, όσο και η εφαρμογή τεχνικών

εξοικονόμησης νερού, όπως είναι η γεωργία ακριβείας και οι καλλιέργειες υπό κάλυψη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Acocck, B., Charles-Edwards, D.A., Hand, D.W., 1976. An analysis of some effects of humidity on photosynthesis by a tomato canopy under winter light conditions and a range of carbon dioxide concentrations. *J. Exp. Bot.*, 27(100):933–941
- Allen, R.G., Pruitt, W.O., 1986. Rational use of the FAO Blaney-Criddle formula. *J. Irrig. Drain. E.*, 112(2):139–155
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO, Rome, 290 pp
- Blaney, H.F., Criddle, W.D., 1950. Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data. USDA (ARS) Technical Bulletin, 1215
- Ehret, D.L., Ho, L.C., 1986. Translocation of calcium in relation to tomato fruit growth. *Ann. Bot.*, 58:679–688
- European Environmental Agency (EEA), 2008. Impacts of Europe's Changing Climate – 2008 Indicator-based Assessment. Joint EEA/JRC-WHO report, EEA Report No. 4/2008, JRC Reference Report No. JRC47756
- Κατσούλας, Ν., 2002. Επίδραση των παραγόντων του περιβάλλοντος στη διαπνοή τριανταφυλλιάς υπό κάλυψη. Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 220pp
- Lobell, D.B., Burke, M.B., Tebaldi, C., Mastrandrea, M.D., Falcon, W.P., Naylor, R.L., 2008. Prioritizing climate change adaptation needs for food security in 2030. *Science*, 319:607–610
- Monteith, J.L., 1973. Principles of environmental Physics. Contemporary Biology, Edward Arnold, London, UK, 241pp
- Palutikof, J.P., Goodess, C.M., Guo, X., 1994. Climate change, potential evapotranspiration and moisture availability in the Mediterranean basin. *Int. J. Climatol.*, 14:853–869
- Παπαζαφειρίου, Ζ.Γ., 1999. Οι ανάγκες των καλλιεργειών σε νερό. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
- Parry, M.L., Arnell, N.W., McMichael, A.J., Nicholls, R.J., Martens, P., Kovats, R.S., Livermore, M.T.J., Rosenzweig, C., Iglesias, A., Fischer, G., 2001. Millions at risk: defining critical climate change threats & targets. *Global Environ. Chang.*, 11(3):181–183
- Stern, N., 2007. The Economics of Climate Change: The Stern Review. Cambridge University Press, Cambridge.
- Van der Linden, P., Mitchell, J.F.B. (eds.), 2009. ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. Met Office Hadley Centre, FitzRoy Road, Exeter EX1 3PB, UK. 160pp