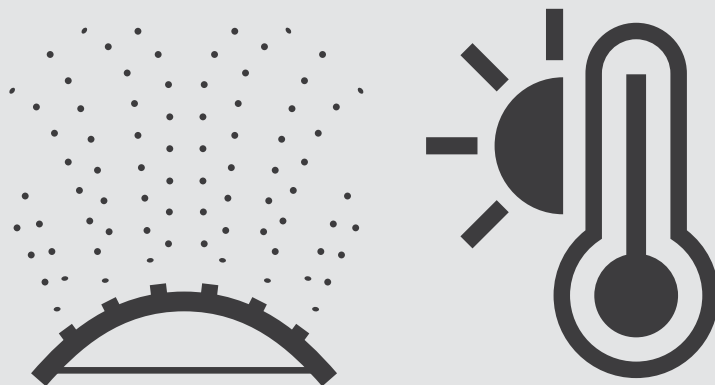




**Πανελλήνιο Συνέδριο  
Γεωργικής Μηχανικής**

## **ΑΡΔΕΥΣΕΙΣ - ΑΓΡΟΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑ**





## ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΣΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ ΤΟΥ ΗΛΙΑΝΘΟΥ

**Μ. Σακελλαρίου–Μακραντωνάκη<sup>1</sup>, Ε. Καρατάσιου<sup>1,✉</sup>, Χ. Νάκας<sup>1</sup>, Χ. Τζιμόπουλος<sup>2</sup>,  
Χ. Παπανικολάου<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος, 38446, ✉ eikaratasiou@agr.uth.gr

<sup>2</sup>Εργαστήριο Υδραυλικών Έργων και Διαχείρισης Περιβάλλοντος, Τομέας Συγκοινωνιακών και Υδραυλικών Έργων, Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Α.Π.Θ., 54124

### Περίληψη

Η παρούσα εργασία αναφέρεται στην επίδραση διαφόρων μεθόδων άρδευσης (επιφανειακής και υπόγειας στάγδην άρδευσης) στον ηλιάνθο (*Helianthus annuus* L.), ως εναλλακτική καλλιέργεια για την παραγωγή βιοντίζελ. Επιπλέον, στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας που πραγματοποιήθηκε στο Αγρόκτημα του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, μελετήθηκε πιθανή εξοικονόμηση αρδευτικού νερού. Το πειραματικό σχέδιο που εφαρμόστηκε ήταν Πλήρως Τυχαιοποιημένων Ομάδων και περιελάμβανε δύο μεταχειρίσεις με τέσσερις επαναλήψεις. Οι μεταχειρίσεις ήταν: α) η επιφανειακή και β) η υπόγεια στάγδην άρδευση, στις οποίες ο προγραμματισμός των αρδεύσεων πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του αυτόματου εξατμισιμέτρου. Η έρευνα αφορά το έτος 2012, κατά το οποίο παρατηρήθηκε σημαντική εξοικονόμηση νερού με τη χρήση της υπόγειας στάγδην άρδευσης.

*Λέξεις κλειδιά:* Εξοικονόμηση νερού, Αυτοματισμοί, Βιοντίζελ

## EFFECT OF IRRIGATION METHOD ON THE CHARACTERISTICS ENERGY CROP OF SUNFLOWER

**M. Sakellariou–Makrantonaki<sup>1</sup>, E. Karatasios<sup>1,✉</sup>, C. Nakas<sup>1</sup>, C. Tzimopoulos<sup>2</sup>,  
C. Papanikolaou<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Laboratory of Agricultural Hydraulics, Dept. of Agriculture, Crop Production and Rural Environment, University of Thessaly, Volos, ✉ eikaratasiou@agr.uth.gr

<sup>2</sup>Laboratory of Hydraulic Engineering and Environmental Management, Department of Transportation and Hydraulic Works, Dept. of Rural and Surveying Engineering, A.U.Th., Thessaloniki

### Abstract

This paper refers to the effect of different irrigation methods (surface and subsurface drip irrigation) to sunflower (*Helianthus annuus* L.), as an alternative crop for biodiesel production. Additional, in the context of present survey conducted in the Farm of the University of Thessaly, studied potential of irrigation water – savings. The experimental design which was applied was a Randomized Complete Block and included two treatments in four replications. The treatments were: a) surface and b) subsurface drip irrigation, where the irrigation scheduling performed using the automated evaporation pan. The investigation concerns the year of 2012, during which significant water savings observed with the use of subsurface drip irrigation.

*Key words:* Water saving, Automation, Biodiesel

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το νερό αποτελεί βασικό στοιχείο κάθε βιολογικής διαδικασίας, διαδραματίζει το σημαντικότερο ρόλο στη ζωή του ανθρώπου και αποτελεί ένα από τους βασικότερους παράγοντες της οικονομικής και κοινωνικής ανάπτυξης κάθε χώρας. Σήμερα, αποτελεί ένα κρίσιμο φυσικό πόρο, ο οποίος βρίσκεται σε περιορισμένη διαθεσιμότητα (Λιάπης, 2008). Ο κύριος χρήστης νερού είναι η γεωργία, με συμμετοχή που ανέρχεται περίπου στο 80% της συνολικής ποσότητας νερού που χρησιμοποιείται παγκοσμίως, ενώ το αντίστοιχο ποσοστό στην Ελλάδα ανέρχεται περίπου στο 87,5% ([www.paseges.gr](http://www.paseges.gr)). Γενικά, υπάρχει η διαπίστωση ότι σήμερα, το υφιστάμενο καθεστώς στο τομέα των αρδεύσεων έχει ως συνέπεια τη μεγάλη σπατάλη νερού και συνεπώς απαραίτητη προϋπόθεση είναι ο ακριβής προσδιορισμός των αναγκών της καλλιέργειας σε νερό (Sakellariou – Makrantonaki et al., 2001; 2008). Ο σαφής προσδιορισμός των αναγκών των καλλιεργειών σε νερό πρέπει να αποτελέσει την αρχή της προσπάθειας για την ορθή διαχείρισή του (Παπαζαφειρίου, 1999). Έτσι τα τελευταία χρόνια, η επιστημονική κοινότητα έστρεψε το ενδιαφέρον της σε αυτό το ζήτημα, καθώς μια μικρή ποσοστιαία εξοικονόμηση στο μεγαλύτερο καταναλωτή μπορεί να επιτύχει τεράστια ποσά για τις υπόλοιπες ανταγωνιστικές χρήσεις νερού. Με το ζήτημα αυτό έχουν ασχοληθεί μεταξύ άλλων και οι Σακελλαρίου – Μακραντωνάκη κ.άλ. (2009, 2010).

Η πρόοδος της τεχνολογίας σε συνδυασμό με την αύξηση του πληθυσμού της γης οδήγησαν στην επιδείνωση του ενεργειακού προβλήματος, με τη ραγδαία αύξηση της ζήτησης σε ενέργεια. Έτσι η επιστημονική κοινότητα την τελευταία δεκαετία, ενδιαφέρεται για την αντικατάσταση των παραδοσιακών καυσίμων από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Σακελλαρίου κ.α., 2013). Με τον όρο Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (Α.Π.Ε.) χαρακτηρίζονται οι ενεργειακές πηγές, οι οποίες υπάρχουν σε αφθονία στο φυσικό μας περιβάλλον και συνεπώς, είναι ανεξάντλητες και φιλικές προς αυτό (Ραμνιώτης, 2008). Ως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας θεωρούνται και τα ενεργειακά φυτά, από τα οποία παράγεται θερμότητα (πέλετες, μπρικέτες, κ.λ.π.) και καύσιμα (μεθάνιο, φυτικά λάδια και αλκοόλες) (Κρόκου, 2014). Οι «ενεργειακές καλλιέργειες» είναι ορισμένα ήδη καλλιεργούμενα φυτικά είδη και ορισμένα αυτοφυή, που έχουν ως σκοπό την παραγωγή βιομάζας, η οποία κατόπιν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για διάφορους ενεργειακούς σκοπούς, όπως την παραγωγή βιοντίζελ, βιοαιθανόλης ή ξηράς ουσίας για καύση πυρόλυση, αεριοποίηση κ.λ.π. (Monti and Venturi, 2003). Οι προοπτικές για τους παραγωγούς που θα αποφασίσουν να ασχοληθούν με την καλλιέργεια των ενεργειακών φυτών διαγράφονται ιδιαίτερα προσοδοφόρες ([www.biofuels.gr](http://www.biofuels.gr)), καθώς μπορούν να χρηματοδοτηθούν μέσω των προγραμμάτων της συμβολαϊκής γεωργίας ([www.ethnos.gr](http://www.ethnos.gr)). Έχουν δηλαδή εξασφαλισμένη την απορρόφηση της παραγωγής τους.

Ο ηλιάνθος (*Helianthus annuus* L.) είναι μονοετές εαρινό φυτό, που καλλιεργείται κυρίως για τους σπόρους του και το ηλιέλαιο που παράγεται από αυτούς, τα οποία είναι εδώδιμα. Θεωρείται ενεργειακό φυτό εξαιτίας των ελαιούχων σπόρων του, οι οποίοι αφού υποστούν βιομηχανική επεξεργασία προκύπτει υγρό βιοκαύσιμο (βιοντίζελ) (Αργυροκαστρίτης κ.άλ., 2013). Το βιοντίζελ είναι ένα εναλλακτικό καύσιμο, το οποίο προέρχεται είτε από φυτικά έλαια, είτε από ζωικά λίπη (Nag, 2008), με ιδιότητες πολύ κοντά σε αυτές του συμβατικού ντίζελ και συνεπώς είτε τα αντικαθιστά, είτε προστίθεται σε αυτό και αποδίδει καύσιμα μίγματα ([www.goex.gr](http://www.goex.gr)). Θεωρώντας τον ηλιάνθο ως πιθανή εναλλακτική καλλιέργεια για την παραγωγή βιοντίζελ στην Ελλάδα στο προσεχές μέλλον, σκοπός της παρούσας εργασίας αποτελεί η εξοικονόμηση αρδευτικού νερού μέσω του ορθού προγραμματισμού των αρδεύσεων και παράλληλα η μεγιστοποίηση της ενεργειακής ωφέλειας της καλλιέργειας.

## 2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Η επίδραση διαφόρων μεθόδων άρδευσης στην καλλιέργεια ηλιάνθου μελετήθηκε στο Αγρόκτημα του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στο Βελεστίνο κατά το έτος 2012 σε πειραματικό αγροτεμάχιο όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.



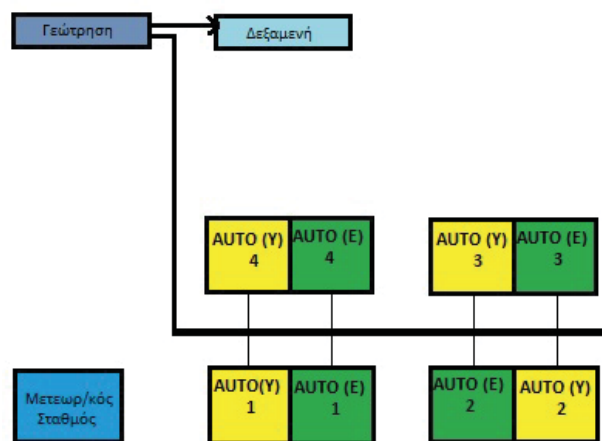
**Εικόνα 1.** Άποψη πειραματικού αγροτεμαχίου.

Το έδαφος του πειραματικού αγρού είναι ίλυο-αργιλοπηλώδες, κατατάσσεται στην υπό – ομάδα Typic Xerotent, το PH του είναι 7,8 και η οργανική ουσία 0,97% (Μήτσιος κ.α., 2000). Το πειραματικό σχέδιο που χρησιμοποιήθηκε ήταν Πλήρων Τυχαιοποιημένων Ομάδων με δύο μεταχειρίσεις και τέσσερις επαναλήψεις (Εικόνα 2). Οι μεταχειρίσεις ήταν:

α) Η επιφανειακή στάγδην άρδευση, στην οποία ο προγραμματισμός των αρδεύσεων πραγματοποιήθηκε βάσει του αυτόματου εξατμισιμέτρου (AUTO (E)).

β) Η υπόγεια στάγδην άρδευση, στην οποία ο προγραμματισμός των αρδεύσεων πραγματοποιήθηκε βάσει του αυτόματου εξατμισιμέτρου (AUTO (Υ)).

Η δόση άρδευσης που εφαρμόστηκε και στις δύο μεταχειρίσεις ήταν ίση με το 100% των αναγκών σε νερό της καλλιέργειας, οι οποίες προέκυψαν από τις ενδείξεις που λαμβάνονταν από το εξατμισίμετρο και για ολόκληρη την καλλιεργητική περίοδο ήταν η συνολική ποσότητα νερού που εφαρμόστηκε με την άρδευση και οι βροχοπτώσεις. Κάθε πειραματικό τεμάχιο είχε επιφάνεια 56 m<sup>2</sup>.



**Εικόνα 2.** Διάταξη μεταχειρίσεων και επαναλήψεων στο πειραματικό αγροτεμάχιο.

Οι σταλακτηφόροι σωλήνες του επιφανειακού δικτύου εφαρμογής ήταν κατασκευασμένοι από πολυαιθυλένιο με διάμετρο 20 mm. Οι σταλακτήρες ήταν αυτοκαθαριζόμενοι και αυτορυθμιζόμενοι, με απόσταση μεταξύ αυτών 80 cm και παροχή 2,3 l/h. Ο ίδιος τύπος σταλακτηφόρου σωλήνα χρησιμοποιήθηκε και στο υπόγειο σύστημα στάγδην άρδευσης και με τη χρήση ειδικού υπεδαφοθέτη εγκαταστάθηκε σε βάθος 45 cm από την επιφάνεια του εδάφους. Επίσης, χρησιμοποιήθηκε φίλτρο δίσκων εμβαπτισμένων στην ουσία trifluralin για την προστασία του συστήματος από την εισχώρηση ριζών κατά τη διακοπή της άρδευσης.

Η σπορά της καλλιέργειας πραγματοποιήθηκε κατά τη διάρκεια του 1<sup>ου</sup> δεκαημέρου του Απριλίου, με την ποικιλία PR64A63 της PIONEER. Κάθε πειραματικό τεμάχιο είχε έξι γραμμές σποράς, με απόσταση μεταξύ των σειρών 80 cm και μεταξύ των φυτών περίπου 12 cm. Οι ίδιες καλλιεργητικές φροντίδες εφαρμόστηκαν σε όλες τις μεταχειρίσεις και δεν εφαρμόστηκε σε αυτές λίπανση.

### 3. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Με τη μέθοδο του εξατμισιμέτρου τύπου A μετράται η εξάτμιση, η οποία είναι απαραίτητη για τον υπολογισμό των αναγκών άρδευσης της καλλιέργειας. Το εξατμισιμέτρο τύπου A είναι μια κυλινδρική λεκάνη από γαλβανισμένο χάλυβα (διαμέτρου 121cm και βάθους 25,4cm). Η επιφάνεια του νερού στο όργανο πρέπει να παραμένει στα 5–7,5cm κάτω από το χείλος της λεκάνης. Οι μετρήσεις στο βάθος του νερού στη λεκάνη γίνονται με σταθμήμετρο ακίδα. Οι ενδείξεις αυτές αντιπροσωπεύουν την εξάτμιση από τη λεκάνη σε mm/day. Απαραίτητη προϋπόθεση για την άρτια λειτουργία του οργάνου είναι η στάθμη του νερού μέσα στη λεκάνη να μην πέσει ποτέ κάτω από το επίπεδο των 7,5cm από το χείλος της λεκάνης. Γι' αυτό το λόγο, όταν η επιφάνεια του νερού έφτανε στο όριο των 7,5cm πραγματοποιούνταν πλήρωση του οργάνου. Επίσης, αναγκαίος θεωρείται και ο τακτικός καθαρισμός και η ανανέωση του νερού, ώστε να μην θολώνει.

Οι ενδείξεις εξάτμισης από το όργανο λαμβάνονταν καθημερινά (σε συγκεκριμένη ώρα), οι οποίες πολλαπλασιαζόμενες με το συντελεστή διόρθωσης του εξατμισιμέτρου  $K_{pan}$  έδιναν την εξατμισοδιαπνοή αναφοράς  $ET_0$ . Η τιμή του  $K_{pan}$  για την περιοχή του Βελεστίνου είχε στο παρελθόν προσδιοριστεί στο 0,8 (Παπανικολάου, 2006). Δηλαδή,  $ET_0 = K_{pan} * E_{pan}$  (mm/day). Στη συνέχεια, η τιμή της  $ET_0$  πολλαπλασιαζόμενη με το φυτικό συντελεστή της καλλιέργειας  $K_c$ , δίνει τη πραγματική εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας ( $ET_c$ ). Δηλαδή,  $ET_c = ET_0 * K_c$  (mm). Η λειτουργία του συστήματος του αυτόματου εξατμισιμέτρου στην επιφανειακή και υπόγεια στάγδην άρδευση, βασίζεται στη μέθοδο του εξατμισιμέτρου τύπου A, με τη διαφορά ότι χρησιμοποιείται ένας αισθητήρας μέτρησης στάθμης νερού, ο WL1 και συνεπώς δεν απαιτείται η φυσική παρουσία του χειριστή για τη λήψη της ένδειξης εξάτμισης, την έναρξη και λήξη της άρδευσης. Ο αισθητήρας κατέγραφε τη μεταβολή στη τιμή του ηλεκτρικού δυναμικού στο διάτρητο σωλήνα εντός της λεκάνης του εξατμισιμέτρου, που ήταν τοποθετημένος, και η οποία μεταφέρονταν στο Data logger και μεταφράζονταν μέσω εξίσωσης σε mm νερού που υπήρχαν στη λεκάνη. Ορίσαμε ως εντολή στο Data Logger, να αθροίζει τη διαφορά των ημερήσιων τιμών εξάτμισης και στη συνέχεια να δίνεται εντολή σε Relay για την έναρξη της άρδευσης όταν το προαναφερθέν άθροισμα έφτανε τα 30mm. Η διακοπή της άρδευσης ορίστηκε να γίνεται όταν συμπληρώνονταν συγκεκριμένος αριθμός ωρών που σχετίζονταν με την ωριαία παροχή νερού των σταλακτήρων, την ισαποχή τους επί της γραμμής άρδευσης και την ισαποχή των σταλακτηφόρων μεταξύ των γραμμών άρδευσης. Το όριο των 30mm καθορίστηκε έτσι ώστε να είναι μικρότερη ή το πολύ ίση με την πρακτική δόση άρδευσης, όπως αυτή υπολογίστηκε με βάση τις υδροδυναμικές παραμέτρους του εδάφους του πειραματικού αγρού (υδατοϊκανότητα, σημείο μόνιμης μάρανσης, φαινόμενο ειδικό βάρος εδάφους), το βάθος ριζοστρώματος της καλλιέργειας, την ημερήσια εξατμισοδιαπνοή αναφοράς.

Για τη συλλογή των μετεωρολογικών δεδομένων χρησιμοποιήθηκε αυτόματος μετεωρολογικός σταθμός (MetosCompact, της εταιρείας Pessl Instruments GmbH), τοποθετημένος σε απόσταση 50 m από το πειραματικό αγρό. Ανά 12 min, καταγράφονταν η θερμοκρασία αέρος (°C), η σχετική υγρασία αέρος (%), η βροχόπτωση (mm), η ταχύτητα ανέμου σε ύψος 2 m από την επιφάνεια του εδάφους ( $m s^{-1}$ ) και η ηλιακή ακτινοβολία (W

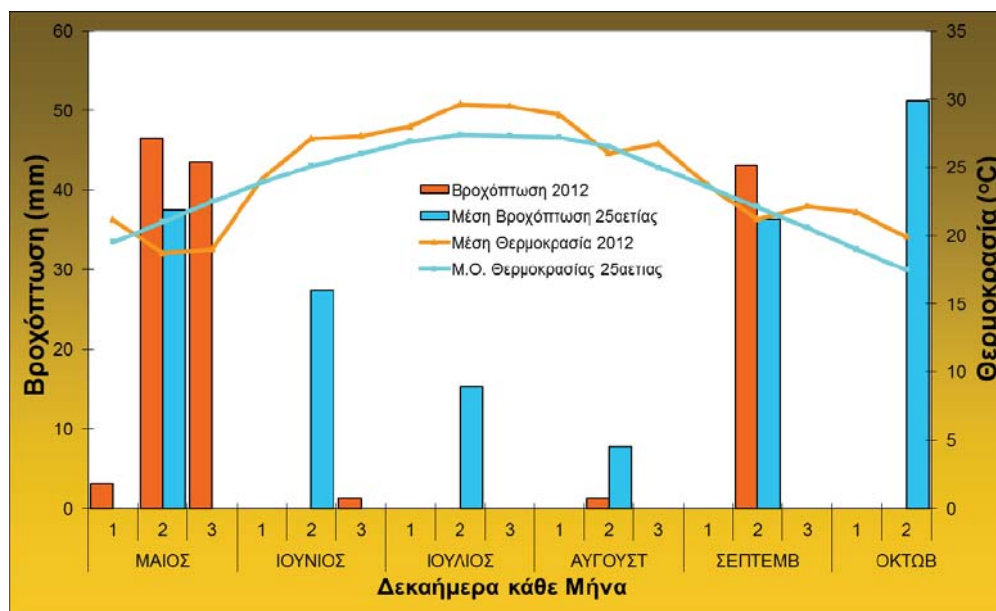


m<sup>-2</sup>). Ο μετεωρολογικός σταθμός έχει τη δυνατότητα να υπολογίζει την εξατμισοδιαπνοή αναφοράς με τη μέθοδο Penman – Monteith, η οποία χρησιμοποιήθηκε επικουρικά για τον έλεγχο αξιοπιστίας των μετρήσεων από το εξατμισόμετρο τύπου A λαμβάνοντας πάντα υπόψη τη διαφορετικότητα των μεθόδων. Με το στατιστικό πακέτο SPSS version 18 πραγματοποιήθηκε η επεξεργασία των δεδομένων που προέκυψαν από τις μετρήσεις των χαρακτηριστικών της καλλιέργειας. Η κατάταξη των μέσων όρων έγινε με την εφαρμογή του πολλαπλού τεστ Duncan (Montgomery and Runger, 1999).

Κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις της εξέλιξης του ύψους των φυτών και της διαμέτρου των κεφαλών. Οι συγκεκριμένες μετρήσεις ήταν εβδομαδιαίες και λαμβάνονταν από τις δύο μεσαίες γραμμές σποράς κάθε πειραματικού τεμαχίου. Με αυτό τον τρόπο, αποφεύγεται η αλληλεπίδραση με γειτονικές γραμμές σποράς και γειτονικά πειραματικά τεμάχια. Η τελική παραγωγή σπόρου προσδιορίστηκε με καταστροφική δειγματοληψία των φυτών που αντιστοιχούσαν σε 1 m<sup>2</sup> από τις δύο μεσαίες σειρές των μεταχειρίσεων. Από την τελική παραγωγή σπόρου και κατόπιν εργαστηριακής ανάλυσης, προέκυψε η παραγωγή ενέργειας (βιοντίζελ) που αποτελεί τον κύριο στόχο της έρευνας.

#### 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

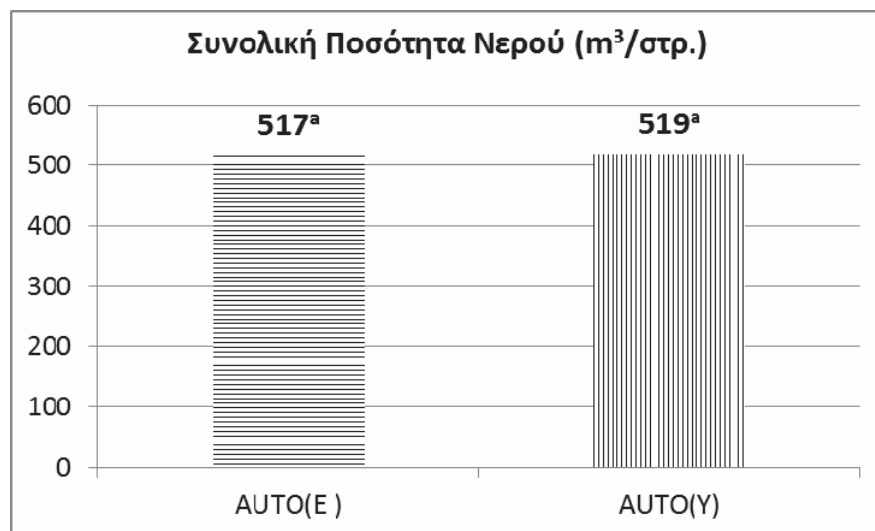
Τα κλιματικά δεδομένα (ημερήσιες τιμές θερμοκρασίας και υγρασίας) της καλλιεργητικής περιόδου 2012 καταγράφονταν στον αυτόματο μετεωρολογικό σταθμό και παρουσιάζονται στο Σχήμα 1, σε σχέση με τις αντίστοιχες μέσες τιμές των τελευταίων 25 ετών. Στο Σχήμα 1, με τις μπάρες συμβολίζεται η βροχόπτωση και με τις γραμμές η θερμοκρασία. Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 1, η υψηλότερη τιμή βροχόπτωσης σημειώθηκε το δεύτερο δεκαήμερο του Μαΐου κατά την καλλιεργητική περίοδο του 2012 και ήταν 46,50 mm.



Σχήμα 1. Κλιματικά δεδομένα για τις καλλιεργητικές περιόδους 2011 και 2012.

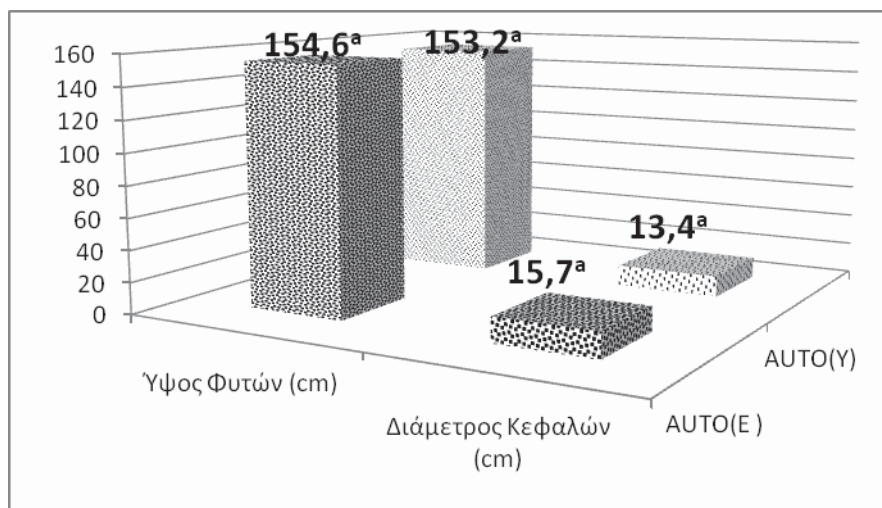
Στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται η ποσότητα νερού που εφαρμόστηκε για άρδευση σε κάθε μεταχείριση. Στο συγκεκριμένο σχήμα εκτός της ποσότητας νερού που εφαρμόστηκε καθ' όλη τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου με στάγδην άρδευση, συμπεριλαμβάνεται και η άρδευση με καταιονισμό που πραγματοποιήθηκε μετά τη σπορά και τη χημική ζιζανιο-

κτονία. Κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου του 2012, ως προς την ποσότητα νερού που εφαρμόστηκε για άρδευση δεν υπήρχαν διαφορές σε επίπεδο σημαντικότητας 5% μεταξύ των μεταχειρίσεων.



**Σχήμα 2.** Συνολική ποσότητα νερού (m³/στρ.) που εφαρμόστηκε κατά την άρδευση για κάθε μεταχείριση.

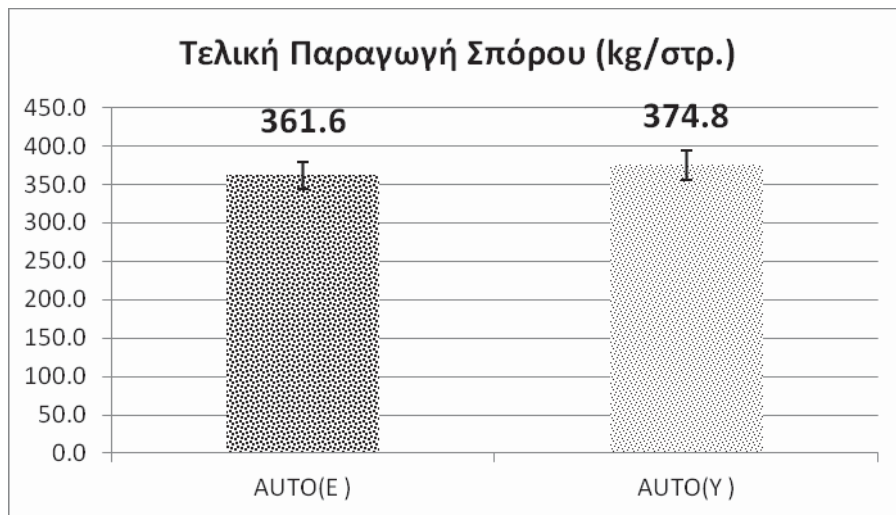
Ως προς το ύψος φυτών της καλλιέργειας δεν παρατηρήθηκαν διαφορές σε επίπεδο σημαντικότητας 5% μεταξύ των μεταχειρίσεων, αν και η AUTO(E) παρουσίασε μία τάση υπεροχής. Κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου του 2012 δεν παρατηρήθηκαν επίσης, διαφορές σε επίπεδο σημαντικότητας 5% μεταξύ των μεταχειρίσεων ως προς τη διάμετρο των κεφαλών, ενώ μια μικρή τάση υπεροχής παρουσίασε η AUTO(E), όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.



**Σχήμα 3.** Ύψος φυτών (cm) και διάμετρος κεφαλών (cm).

Κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου του 2012, την υψηλότερη παραγωγή σπόρου (374,8 kg/στρ.) παρουσίασε η μεταχείριση AUTO(Y) (Σχήμα 4), ενώ δεν παρουσιάστηκε διαφορά σε επίπεδο σημαντικότητας 5%.





**Σχήμα 4.** Τελική παραγωγή σπόρου (kg/στρ.) ανά μεταχείριση.

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο ηλίανθος φαίνεται να αποτελεί μία πολλά υποσχόμενη εναλλακτική καλλιέργεια για την παραγωγή βιοντίζελ στο προσεχές μέλλον, στην Ελλάδα. Παρουσιάζει ένα σημαντικό πλεονέκτημα, καθώς από το σπόρο του είναι δυνατόν να παραχθούν υγρά βιοκαύσιμα, ενώ από τα φύλλα και το στέλεχος στερεά καύσιμα.

Στη συγκεκριμένη έρευνα μελετήθηκαν δύο μέθοδοι στάγδην άρδευσης με αυτοματισμό (AUTO(E) και AUTO(Y)). Με τη χρήση των μεθόδων αυτών μειώνονται οι μετακινήσεις του παραγωγού από και προς το αγροτεμάχιο και συνεπώς μειώνονται οι εργατώρες για την άρδευση. Επιπροσθέτως, μειώνεται η σπατάλη νερού, καθώς παρατηρείται βελτιστοποίηση της χρήσης του, εφαρμόζοντας ακριβώς την ποσότητα νερού που απαιτείται για την κάλυψη των αναγκών της καλλιέργειας. Έτσι, πραγματοποιούνται μόνο οι απαιτούμενες αρδεύσεις και κατά συνέπεια, αποφεύγεται η κατασπατάληση ενέργειας. Συνεπώς, εξαιτίας των προαναφερθέντων αποτελεσμάτων, προτείνεται η αρδευόμενη καλλιέργεια του ηλίανθου στην Ελλάδα χρησιμοποιώντας για τον προγραμματισμό της άρδευσης τη μέθοδο του αυτόματου εξατμισιμέτρου. Επιπλέον, θετικό θα μπορούσε να θεωρηθεί το αποτέλεσμα συνδυασμού της με τη μέθοδο της υπόγειας στάγδην άρδευσης, διότι παρατηρείται μια ελαφρά τάση υπεροχής ως προς τη παραγωγή σπόρου.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Αργυροκαστρίτης Ι., Παπαθεοχάρη Γ., Αλεξανδρής Α., Πανταζή Α., Μανδράκα Ι., 2013. *Ανάπτυξη παραγωγή και μεταβολή του δείκτη υδατικής καταπόνησης δύο υβριδίων ηλίανθου υπό συνθήκες πλήρους και ελλειμματικής άρδευσης*. Πρακτικά 8<sup>ου</sup> Εθνικού Συνεδρίου Γεωργικής Μηχανικής, Βόλος, 187 – 191.
- Λιάπης, Α.Γ., 2008. *Ορθολογική διαχείριση του αρδευτικού νερού και κοστολόγησή του με χρήση μαθηματικού προγραμματισμού*. Μεταπτυχιακή Διατριβή, Γεωπονική Σχολή Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη.
- Μήτσιος Ι., Τούλιος Μ., Χαρούλης Α., Γάτσιος Φ. και Φλωράς Σ., 2000. *Εδαφολογική μελέτη και εδαφολογικός χάρτης του αγροκτήματος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στην περιοχή του Βελεστίνου*. Εκδόσεις Zymel. Αθήνα, 21 – 41 σελ.
- Monti A., Venturi G., 2003. *Comparison of the energy performance of fibre sorghum, sweet sorghum and wheat monocultures in northern Italy*. European Journal of Agronomy, 19, 35 – 43.

- Nag A., 2008. *Biofuels Refining and Performance*. McGraw – Hill Companies, United States of America.
- Montgomery D.C. and Runger G.C., 1999. *Applied Statistics and Probability for Engineers*. John Wiley and Sons, New York, 430 – 530 p.p.
- Παπαζαφειρίου Ζ., 1999. *Οι ανάγκες σε νερό των καλλιεργειών*. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 347 σελ.
- Παπανικολάου, Χ., 2006. *Σύγχρονα συστήματα άρδευσης και εξοικονόμηση νερού*. Μεταπτυχιακή Διατριβή, Γεωπονική Σχολή Π.Θ., Βόλος, 64 σελ.
- Ραμνιώτης Ι., 2008. *Πειραματική καλλιέργεια ποικιλιών ελαιοκράμβης (Brassica napus) στο Ν. Λάρισας για παραγωγή Biodiesel*. Μεταπτυχιακή Διατριβή, Γεωπονική Σχολή Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη.
- Σακελλαρίου – Μακραντωνάκη Μ., Νάκας Χ. και Δημάκας Δ., 2013. *Εφαρμογή βιοστερεών σε συνδυασμό με ελλειμματική άρδευση σε καλλιέργεια ενεργειακού φυτού*. Πρακτικά 8<sup>ου</sup> Εθνικού Συνεδρίου Γεωργικής Μηχανικής, Βόλος, 92 – 96.
- Σακελλαρίου – Μακραντωνάκη Μ., Χ. Παπανικολάου, Χ. Τζιμόπουλος, 2009. *Εφαρμογή ευφυών συστημάτων άρδευσης σε ενεργειακά φυτά*. Πρακτικά 11<sup>ου</sup> Συνεδρίου της Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης και 7<sup>ου</sup> Συνεδρίου της Ελληνικής Επιτροπής Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, 27 – 30 Μαΐου, Βόλος, 321 – 328.
- Σακελλαρίου – Μακραντωνάκη Μ., Χ. Παπανικολάου, 2010. *Εξοικονόμηση νερού με σύγχρονα συστήματα άρδευσης*. Πρακτικά 2<sup>ου</sup> Αναπτυξιακού Συνεδρίου Νομού Καρδίτσας, 19 – 21 Φεβρουαρίου, Καρδίτσα, 183 – 196.
- Sakellariou – Makrantonaki, M., D. Kalfountzos, P. Vyrlas, 2001. *Irrigation water saving and yield increase with subsurface drip irrigation*. Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Congress of Environmental Science and Technology, 3 – 6 September, Syros, Greece, Vol. C, 466 – 473.
- Sakellariou – Makrantonaki, M., C. Papanikolaou, 2008. *Water saving by using modern irrigation methods*. Proceedings of AgEng 2008 International Conference on Agricultural Engineering, 23 – 25 June, Hersonissos, Crete, Greece, OP – 670 (CD – ROM).
- Κρόκου Μ., 2014. *Έχουν μέλλον τα ενεργειακά φυτά σύμφωνα με τους επιστήμονες*. Ηλεκτρονικό άρθρο. [www.agronews.gr/green-report/energeiakes-kalliergies/arthro/108323/ehoun-mellon-ta-energeiaka-fyta-symfona-me-tous-epistimones/](http://www.agronews.gr/green-report/energeiakes-kalliergies/arthro/108323/ehoun-mellon-ta-energeiaka-fyta-symfona-me-tous-epistimones/)
- [www.biofuels.gr/energy-crops/hlianthos-kai-elaiokramvh-ta-energeiaka-fyta-pou-prosferoun-sigoura-kerdh/](http://www.biofuels.gr/energy-crops/hlianthos-kai-elaiokramvh-ta-energeiaka-fyta-pou-prosferoun-sigoura-kerdh/)
- [www.ethnos.gr/entheta.asp?catid=23353&subid=2&pubid=64042972](http://www.ethnos.gr/entheta.asp?catid=23353&subid=2&pubid=64042972)
- [www.goex.gr/wp-content/uploads/2012/02/biodiesel-powerpoint.pdf](http://www.goex.gr/wp-content/uploads/2012/02/biodiesel-powerpoint.pdf)
- [www.paseges.gr/el/news/Exoikonomhsh-ardeytikoy-neroy-apo-th-hrhsh-astikwn-apoblhtwn](http://www.paseges.gr/el/news/Exoikonomhsh-ardeytikoy-neroy-apo-th-hrhsh-astikwn-apoblhtwn)

## ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΠΛΗΡΟΥΣ ΚΑΙ ΕΛΛΕΙΜΜΑΤΙΚΗΣ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΣΤΗΝ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΔΥΟ ΠΟΙΚΙΛΙΩΝ ΣΟΓΙΑΣ

**Χ. Βαμβακούλας<sup>1</sup>, Ι. Αργυροκαστρίτης<sup>1,✉</sup>, Γ. Παπαθεοχάρη<sup>2</sup>, Σ. Αλεξανδρής<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Εργ. Γεωργικής Υδραυλικής, Τμήμα Αξ. Φυσ. Πόρων & Γεωργικής Μηχανικής, Γ.Π.Α.,  
✉ jarg@aua.gr

<sup>2</sup>Εργ. Γεωργίας, Τμήμα Επιστήμης Φυτικής Παραγωγής, Γ.Π.Α., Ιερά Οδός 75, Αθήνα, 118 55

### Περίληψη

Κατά την καλλιεργητική περίοδο 2014 στον πειραματικό αγρό του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών στο κωπαϊδικό πεδίο (περιοχή Αλιάρτου), έγινε πειραματική καλλιέργεια δύο υβριδίων σόγιας (*Glycinemax* L.), PR91M10 και PR92B63 αντίστοιχα, με σκοπό να μελετηθεί η επίδραση της πλήρους και ελλειμματικής άρδευσης στα χαρακτηριστικά της ανάπτυξης και παραγωγής των φυτών. Εφαρμόστηκε πειραματικό σχέδιο υποδιαιρεμένων τεμαχίων (splitplot) με 4 επαναλήψεις, 5 κύριες επεμβάσεις και 2 υποεπεμβάσεις. Η άρδευση των φυτών έγινε με επιφανειακή στάγδην άρδευση. Έγιναν μετρήσεις, κατά τη διάρκεια του βιολογικού κύκλου των φυτών, που αφορούσαν σε χαρακτηριστικά της ανάπτυξής τους, όπως και στην τελική απόδοσή τους σε σπόρο και λάδι. Από τα αποτελέσματα του πειράματος, εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα για την μεταβολή των χαρακτηριστικών ανάπτυξης του φυτού (ύψος φυτού, δείκτης φυλλικής επιφάνειας) και την παραγωγή (βάρος σπόρου, ελαιοπεριεκτικότητα), των εξεταζόμενων υβριδίων σόγιας. Συγχρόνως εκτιμάται ότι η ελλειμματική άρδευση της συγκεκριμένης καλλιέργειας σε ελληνικές συνθήκες προκαλεί απώλειες στην παραγωγή.

**Λέξεις κλειδιά:** Ελλειμματική άρδευση, Σόγια, Παραγωγικότητα, Φαινολογικές ιδιότητες.

## EFFECT OF FULL AND DEFICIT IRRIGATION TREATMENTS IN PLANT GROWTH AND PRODUCTION OF TWO SOYBEAN CULTIVARS

**C. Vamvakoulas<sup>1,✉</sup>, I. Argyrokastritis<sup>1,✉</sup>, Y. Papatheohari<sup>2</sup>, S. Alexandris<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Lab of Agr. Hydraulics, Dep. of Nat. Res. Development & Agr. Engineering, A.U.A., ✉ jarg@aua.gr

<sup>2</sup>Lab of Crop Production Dep. of Crop Science, IeraOdos 75, 11855, Athens, Greece

### Abstract

In the experimental field of the Agricultural University of Athens, a field experiment was carried out from May to September of 2014, using two hybrids (PR91M10 and PR92B63) of *Glycine max* 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, 5 main treatments and 2 sub treatments was followed. During the experiment some characteristics of plant growth (crop height, leaf area and dry weight) and at the harvest (seed and oil production) were measured. Irrigation was applied using a surface drip irrigation system. Useful conclusions for the production and development of the soybean crop under full and deficit irrigation conditions are reached. Also it is concluded that deficit irrigation of soybean under Greek conditions causes a significant reduction in production.

**Key words:** Deficit irrigation, Soybean, Crop production, Phenological properties

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η Σόγια (*Glycinemax* L.), είναι φυτό με πολύ μεγάλη οικονομική σημασία, αφού ο σπόρος της χρησιμοποιείται για την παραγωγή μεγάλου και ποικίλου εύρους προϊόντων, είναι πλούσιος σε πρωτεΐνη και μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για κατανάλωση από τον άνθρωπο όσο και για κτηνοτροφική χρήση. Σε ημίξηρα κλίματα όπως είναι της Ελλάδας, ακόμα και όταν το νερό είναι άμεσα διαθέσιμο για άρδευση σε ικανοποιητικές ποσότητες, ο σωστός προγραμματισμός της άρδευσης είναι απαραίτητος για σταθερά υψηλές παραγωγές.

Ο προγραμματισμός της άρδευσης γενικότερα βασίζεται σε μετρήσεις της εδαφικής υγρασίας ή μετεωρολογικών παραμέτρων για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής μιας καλλιέργειας. Οι ανάγκες της σόγιας σε νερό είναι μικρές στα πρώτα στάδια ανάπτυξης και κατά την ωρίμανση και αυξημένες κατά τη διάρκεια της άνθησης και του γεμίσματος των σπόρων (FAO 66, 2012).

Ο στόχος της παρούσας εργασίας είναι η συγκριτική αξιολόγηση της ανάπτυξης και της παραγωγής δύο υβριδίων σόγιας, ενός πρώιμου (PR91M10) και ενός όψιμου (PR92B63), σε σπόρο και σε λάδι, όταν αυτά υπόκεινται σε πέντε μεταχειρίσεις, κανονικής και ελλειμματικής (100%, 75%, 50%, 25%, 0%) άρδευσης αντίστοιχα. Παρόμοιες έρευνες σε Ελληνικές συνθήκες, αλλά για το φυτό ηλιάνθο, έγιναν και στο παρελθόν (Αργυροκαστρίτης κ.ά, 2013, Papastylianou et al., 2014, Βαμβακούλας κ.ά, 2014, Argyrokastritis et al., 2015), ενώ από πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στην περιοχή της Τουρκίας (Candogan et al., 2013) και του Λιβάνου (Fadi Karam et al., 2005) εξήχθησαν χρήσιμα συμπεράσματα στο φυτό σόγια για τις αντίστοιχες περιοχές.

## 2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Το πείραμα διεξήχθη κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου 2014, στον αγρό του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών στο Κωπαϊδικό πεδίο (περιοχή της Αλιάρτου). Εφαρμόστηκε σχέδιο υποδιαμεμένων τεμαχίων (splitplot) με τέσσερις επαναλήψεις, με πέντε κύριες επεμβάσεις (100%, 75%, 50%, 25%, 0%) και δύο υποεπεμβάσεις (PR91M10 – PR92B63). Ο πειραματικός αγρός διαχωρίστηκε σε 40 πειραματικά τεμάχια μεγέθους 9 m<sup>2</sup> το κάθε ένα. Σ' αυτά, σπάρθηκαν στις 30 Μαΐου 2014, 2 υβρίδια σόγιας (PR91M10 - PR92B63). Εφαρμόστηκαν 5 διαφορετικές μεταχειρίσεις άρδευσης: η πλήρης (100%) τρεις ελλειμματικές (75%, 50%, 25%) και η μηδενική (0%) η οποία δεν αρδεύτηκε καθόλου από την έναρξη των μεταχειρίσεων και έπειτα.

Ο προγραμματισμός της άρδευσης έγινε με εφαρμογή ημερήσιου ισοζυγίου νερού και στοιχείων από τα αποτελέσματα του υπολογιστικού προγράμματος ISAREG (Pereira et al., 2003) το οποίο έτρεξε για μετεωρολογικά δεδομένα των 4 τελευταίων ετών (2011-2014). Τα μετεωρολογικά δεδομένα προήλθαν από τον αυτόματο μετεωρολογικό σταθμό του εργαστηρίου Γεωργικής Υδραυλικής του Γ.Π.Α. που βρίσκεται εντός του πειραματικού αγρού. Η σπορά πραγματοποιήθηκε με το χέρι σε 5 σειρές ανά τεμάχιο και σε αποστάσεις 75 cm μεταξύ των γραμμών και 25 cm επί της γραμμής.

Η άρδευση έγινε με σύστημα στάγδην. Στον κεντρικό αγωγό (Φ 25mm) του δικτύου συνδέθηκαν 5 ηλεκτροβάννες για τη ρύθμιση των μεταχειρίσεων, ενώ για το δίκτυο εφαρμογής επιλέχθηκαν σταλακτηφόροι αγωγοί διαμέτρου 16mm με αυτορυθμιζόμενους σταλακτήρες παροχής 4,5 l/h ανά 33cm. Έγιναν 5 μεταχειρίσεις άρδευσης για κάθε υβρίδιο. Το νερό, το οποίο εφαρμόστηκε κατά τη διάρκεια της αρδευτικής περιόδου ανέρχεται: για την 100% μεταχείριση στα 185mm (πλήρης άρδευση), ενώ για την 75% μεταχείριση ήταν 139 mm για την 50% μεταχείριση ήταν 93 mm, και για τη μεταχείριση 25% ήταν 46 mm. Τα φυ-

τά της μηδενικής μεταχείρισης δεν αρδεύτηκαν. Το έδαφος από πλευράς μηχανικής σύστασης μετά από δειγματοληψία και ανάλυση χαρακτηρίστηκε ως αργιλώδες (C).

Περιοδικά ανά 15 ημέρες περίπου, 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 έγιναν αντίστοιχα 32, 47, 60 και 74 ημέρες μετά τη σπορά. Στις 5/9/2014 (98 ημέρες μετά τη σπορά) έγινε η συγκομιδή για την πρώιμη ποικιλία PR91M10 και στις 22/9/2014 (115 ημέρες μετά τη σπορά) έγινε η συγκομιδή για την όψιμη ποικιλία PR92B63. Κατά τις συγκομιδές συγκομίστηκαν 9 φυτά ανά πειραματικό τεμάχιο στα οποία μετρήθηκαν το ολικό ξηρό βάρος του φυτού, το ξηρό βάρος των σπόρων, το ξηρό βάρος στελεχών, ο αριθμός σπόρων, ο αριθμός λοβών, η περιεκτικότητα των σπόρων σε λάδι και της ολικής πρωτεΐνης σε ποσοστό % της ξηράς ουσίας. Η ελαιοπεριεκτικότητα μετρήθηκε με εκχύλιση με πετρελαϊκό αιθέρα σύμφωνα με την μέθοδο AOAC 920.39, προσαρμοσμένη στο πρωτόκολλο της εταιρείας FOSS. Ο προσδιορισμός της ολικής πρωτεΐνης έγινε σύμφωνα με τη μέθοδο Kjeldahl, μετά από χώνευση των δειγμάτων με καταλύτη Σεσύμφωνα με την μέθοδο του AOAC 2001.11 και την εφαρμογή AN3001 της εταιρείας FOSS για τα μηχανήματα Block. Η στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων (ANOVA) έγινε με το πρόγραμμα JMP8 (Goopy and Creighton, 2007).

### 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στον πίνακα 1 παρουσιάζονται κάποια στοιχεία 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 Πα- ραλλακτικό- τητας	Αριθμός Σπόρων	Αριθμός Λοβών	Ξ. Βάρος Στελέχους	Ξ. Βάρος Σπόρων	Ξ.Βάρος Φυτού	Ελαιοπερι- εκτικότητα σπόρων	Περιεκτικό- τητα σε πρωτεΐνες
Υβρίδιο	<,0001*	<,0001*	0,0105*	<,0001*	<,0001*	<,0001*	<,0001*
Επέμβαση	<,0001*	<,0001*	<,0001*	<,0001*	<,0001*	0,4324	0,6917
Υβρίδιο x Επέμβαση	<,0001*	<,0001*	0,0010*	<,0001*	<,0001*	<,0001*	0,0002*

Σημ.\* σημαίνει ότι υπάρχει στατιστικά σημαντική διαφορά σε επίπεδο σημαντικότητας 95%

Όπως φαίνεται στον πίνακα 1, υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ υβριδίων και επέμβασης, για τα χαρακτηριστικά, αριθμός σπόρων ανά φυτό, αριθμός λοβών ανά φυτό, ξηρό βάρος στελέχους του φυτού, ξηρό βάρος σπόρων ανά φυτό, ολικό ξηρό βάρος φυτού, ελαιοπεριεκτικότητα σε ποσοστό % της ξηράς ουσίας των σπόρων ανά φυτό και τέλος περιεκτικότητα πρωτεϊνών σε ποσοστό % της ξηράς ουσίας των σπόρων ανά φυτό.

Συνεπώς κρίνεται σκόπιμο να γίνει σύγκριση των αντιστοίχων μέσων όρων και με τη μέθοδο της ελάχιστης σημαντικής διαφοράς, της οποίας τα αποτελέσματα δίνονται στον πίνακα 2.

Από πλευράς χαρακτηριστικών της παραγωγής, σύμφωνα με τα στοιχεία του πίνακα 1 υπήρξε αλληλεπίδραση μεταξύ των υβριδίων και των επεμβάσεων για όλα τα στοιχεία της παραγωγής. Ενώ δεν υπήρξε στατιστικά σημαντική διαφορά για τα στοιχεία της ελαιοπεριεκτικότητας και των πρωτεϊνών στην επέμβαση.



**Πίνακας 2.** Αποτελέσματα σύγκρισης μέσων όρων με τη μέθοδο της ελάχιστης σημαντικής διαφοράς στις περιπτώσεις αλληλεπίδρασης

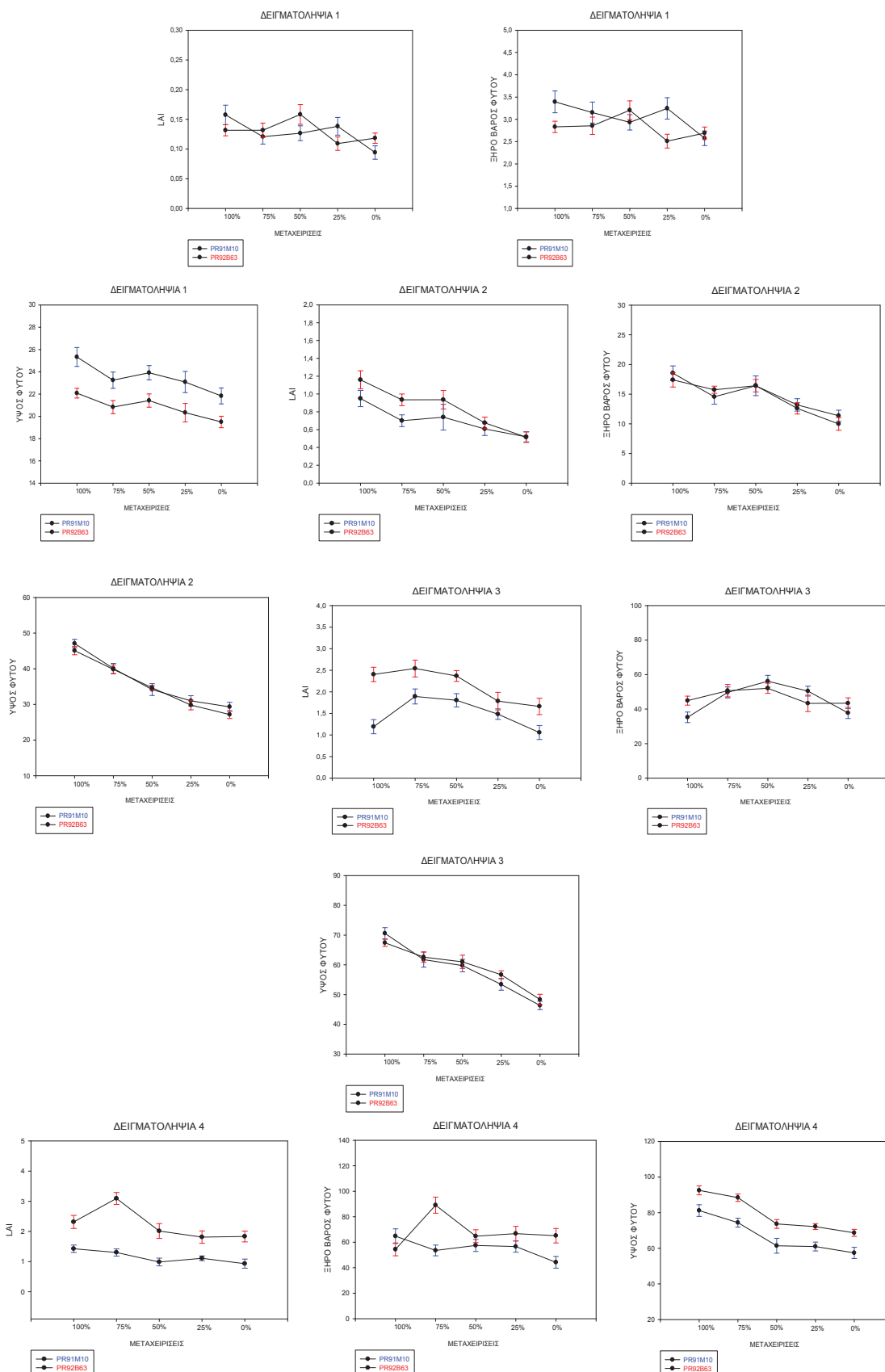
Μεταχείριση	Αριθμός Σπόρων	Αριθμός Λοβών	Ξ. Βάρος Στελέχους (γρ.)	Ξ. Βάρος Σπόρων (γρ.)	Ξ.Βάρος Φυτού (γρ.)	Ελαιοπεριεκτικότητα Σπόρων (% της ξηράς ουσίας)	Περιεκτικότητα σε πρωτεΐνες (% της ξηράς ουσίας)
PR92B63 100%	477,4167 a	226,0000 a	42,7081 a	79,5636 a	156,8161 a	18,9700 f	35,6688 c,d
PR92B63 75%	361,8333 b	175,5833 b	32,6308 b	57,2511 b	117,1172 b	19,1050 f	35,1013 e
PR92B63 50%	354,9722 b	165,2500b,c	26,6408 c	50,5980 c	101,7944 c	18,7100 g	35,2613 d,e
PR92B63 25%	222,7222c,d	110,7500d,e	17,2697d,e	32,1297 e	66,1969 e	19,0575 f	34,9025 e
PR92B63 0%	195,2777d,e	94,7222e,f	13,9803 e	26,5386e,f	54,5347 f	19,9125 d	33,8900 f
PR91M10 100%	322,5139 b	148,8889 c	33,2522 b	46,7217 c	105,1900 c	20,8650 b	36,7275 b
PR91M10 75%	254,6944 c	126,0556 d	29,7958b,c	38,3869 d	90,3744 d	21,3700 a	36,8263 b
PR91M10 50%	211,9167 d,e	100,6944 e	26,8892 c	30,9189 e	74,8400 e	19,9250 d	37,7100 a
PR91M10 25%	218,3889 c,d	101,8056 e	18,5211 d	30,3075 e	65,6750 e	20,3175 c	36,0350 c
PR91M10 0%	172,3333 e	78,8056 f	13,4114 e	23,0050 f	49,3242 f	19,4725 e	36,0000 c

Σημ. Μεταχειρίσεις που δεν ακολουθούνται από το ίδιο γράμμα παρουσιάζουν σημαντική διαφορά.

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, προκύπτει ότι, σε όλα τα στοιχεία παραγωγής το όψιμο υβρίδιο PR92B63 δείχνει μεγαλύτερη αντοχή στην ξηρασία από το πρώιμο PR91M10 εκτός από την ελαιοπεριεκτικότητα και την περιεκτικότητα σε πρωτεΐνες. Σύμφωνα λοιπόν με τα στοιχεία του πίνακα 2 η πρώιμη ποικιλία PR91M10 παρουσιάζει μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε λάδι και πρωτεΐνες από την όψιμη PR92B63. Μεταξύ των επεμβάσεων παρατηρούνται διαφορές στους μέσους όρους για όλα τα στοιχεία παραγωγής εκτός της ελαιοπεριεκτικότητας και της περιεκτικότητας των πρωτεϊνών που δεν παρατηρούνται στατιστικά σημαντικές διαφορές εντός του κάθε υβριδίου.

Στο σχήμα 1 παρουσιάζονται οι μεταβολές των χαρακτηριστικών: ύψος φυτού, LAI και ολικό ξηρό βάρος φυτού, όπως προσδιορίστηκαν από τις 4 δειγματοληψίες, για τα δύο υβρίδια και τις πέντε μεταχειρίσεις άρδευσης. Κατά την τρίτη δειγματοληψία όπως φαίνεται στο σχήμα 1 είναι φανερή η κυριαρχία του όψιμου υβριδίου PR92B63 έναντι του πρώιμου PR91M10 στον δείκτη φυλλικής επιφάνειας και στην τέταρτη δειγματοληψία και στις τρεις ιδιότητες που μετρήθηκαν (LAI, ολικό ξηρό βάρος φυτού, ύψος φυτού). Επίσης σημειώνεται ότι η μεταχείριση 75% κατά την τρίτη και τέταρτη δειγματοληψία δείχνει να διαφέρει σημαντικά από όλες τις άλλες στην μέτρηση του LAI και στην τέταρτη δειγματοληψία και για το ολικό ξηρό βάρος του φυτού, το οποίο δεν φαίνεται να επηρεάζει αντίστοιχα τα στοιχεία παραγωγής (πίνακας 2), όπως λογικά θα περιμέναμε.





**Σχήμα 1.** Παρουσίαση των μεταβολών των χαρακτηριστικών: ύψος φυτού, LAI και ολικό ξηρό βάρος φυτού, όπως προσδιορίστηκαν από τις 4 δειγματοληψίες, για τα δύο υβρίδια και τις πέντε μεταχειρίσεις άρδευσης (οι ράβδοι αντιπροσωπεύουν το τυπικό σφάλμα σε κάθε σημείο).

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η σύγκριση των μέσων όρων για τα στοιχεία των δειγματοληψιών και των στοιχείων παραγωγής, γενικώς δείχνουν ότι πιο ευαίσθητο υβρίδιο στην ελλειμματική άρδευση είναι το πρώιμο υβρίδιο PR91M10 έναντι του όψιμου PR92B63. Επίσης παρουσιάστηκε η μείωση των στοιχείων παραγωγής για τις πέντε υδατικές μεταχειρίσεις και στις δύο ποικιλίες.

Τέλος οι παραγωγές των δύο υβριδίων σόγιας έχουν ως εξής :

Για την πρώιμη ποικιλία PR91M10 για την 100% υδατική μεταχείριση ήταν 311 kg/στρμ., για την 75% ήταν 256 kg/στρμ., για την 50% ήταν 206 kg/στρμ., για την 25% ήταν 202 kg/στρμ. και για την 0% ήταν 153 kg/στρμ..

Αντίστοιχα για την όψιμη ποικιλία PR92B63 για την 100% υδατική μεταχείριση ήταν 530 kg/στρμ., για την 75% ήταν 382 kg/στρμ., για την 50% ήταν 337 kg/στρμ., για την 25% ήταν 214 kg/στρμ. και για την 0% ήταν 177 kg/στρμ.. Συμπερασματικά η ελλειμματική άρδευση σε όλα τα επίπεδα επηρεάζει την παραγωγή αρνητικά.

#### 5. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία χρηματοδοτήθηκε από υποτροφία του κοινωφελούς ιδρύματος «ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ Σ. ΩΝΑΣΗΣ» το οποίο και ευχαριστούμε θερμά. Επίσης θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε και το εργαστήριο φυσιολογίας και θρέψης του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών για την βοήθεια που μας παρείχε στις εργαστηριακές αναλύσεις για την ελαιοπεριεκτικότητα και την περιεκτικότητα σε πρωτεΐνες των σπόρων.

#### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Αργυροκαστρίτης Ι., Παπαθεοχάρη Γ., Αλεξανδρής Σ., Πανταζή Α., Μανδαράκα Ι. 2013. *Ανάπτυξη παραγωγή και μεταβολή του δείκτη υδατικής καταπόνησης δύο υβριδίων ηλίανθου υπό συνθήκες πλήρους και ελλειμματικής άρδευσης*. Πρακτικά 8ου Εθνικού Συνεδρίου Εταιρείας Γεωργικών Μηχανικών Ελλάδος, Βόλος σ.187-191.
- Argyrokastritis I., Papastyliou P., Alexandris S., 2015. *Leaf water Potential and Crop Water stress index variation for full and deficit irrigated cotton in Mediterranean conditions*. Agriculture and Agricultural science Procedia 4:463-470.
- Βαμβακούλας Χ., Αργυροκαστρίτης Ι., Παπαθεοχάρη Γ., Αλεξανδρής Σ. 2014. *Μεταβολή του εμπειρικού δείκτη υδατικής καταπόνησης φυτού δύο υβριδίων σόγιας υπό συνθήκες πλήρους και ελλειμματικής άρδευσης*. Πρακτικά 15ου Εθνικού Συνεδρίου Ελληνικής Εδαφολογικής Εταιρείας, Πάτρα.
- Candogan B.N., Sincik M., Buyukcangaz H., Demirtas C., Goksoy A.T., Yazgan S., 2013. *Yield, quality and crop water stress index relationships for deficit-irrigated soybean [Glycine max (L.) Merr] in sub-humid climatic conditions*. Agricultural water Management 118:113-121.
- Karam, F., Masaad, R., Sfeir, T., Mounzer, O. and Roupheal, Y., 2005. *Evapotranspiration and seed yield of field grown soybean under deficit irrigation conditions*. Agricultural water management 75:226-244.
- Goopy J. and Creighton, L., 2007. *Introduction to Design of Experiments with JMP® Examples*, Third Edition, Copyright © 2007, SAS Institute Inc., Cary, NC, USA, pp. 468
- Papastyliou P., Argyrokastritis I. 2014. *Effect of limited drip irrigation regime on yield, yield components, fiber quality of cotton under Mediterranean conditions*. Agricultural Water Management 142:127-134.
- Pereira, L.S., Teodoro, P.R., Rodrigues, P.N., Teixeira, J.L., 2003. *Irrigation scheduling simulation: the model ISAREG*. In: Rossi, G., Cancelliere, A., Pereira, L.S., Oweis, T., Shatanawi, M., Zairi, A. (Eds.) Tools for Drought Mitigation in Mediterranean Regions. Kluwer, Dordrecht, pp. 161-180.
- Steduto P., T. Hsiao, E. Fereres, and D. Raes, 2012. *Yield Response to Water*, FAO Irrigation and Drainage paper No 66, Rome, Italy, pp 500.

## ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΡΔΕΥΤΙΚΟΥ ΝΕΡΟΥ ΜΕ ΤΗΝ ΠΑΡΟΧΗ ΣΥΜΒΟΥΛΩΝ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΑΠΟ ΑΠΛΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΠΕΔΙΟΥ

Ε. Λεκάκης✉, Φ. Παπαδόπουλος

ΕΛΓΟ-ΔΗΜΗΤΡΑ, Ινστιτούτο Εδαφοϋδατικών Πόρων, 57001, Θέρμη, Θεσσαλονίκη,  
✉ elekakis@agro.auth.gr

### Περίληψη

Η σύγχρονη γεωργική πρακτική κινείται προς την κατεύθυνση της αειφορικής χρήσης του αρδευτικού νερού. Η βέλτιστη διαχείριση των υδατικών πόρων στη γεωργία, αφορά στην εξοικονόμηση και αποτελεσματική χρήση του νερού σε συνδυασμό με τη διατήρηση υψηλών αποδόσεων των αρδευομένων καλλιεργειών, την ελαχιστοποίηση του κόστους άρδευσης και την προστασία του περιβάλλοντος. Για αυτό το σκοπό, στο Ινστιτούτο Εδαφοϋδατικών Πόρων αναπτύχθηκε ένα λογισμικό για τη διαχείριση του αρδευτικού νερού, μέσω απλών συμβουλών άρδευσης. Οι προτεινόμενες αρδεύσεις (δόση άρδευσης, εύρος άρδευσης, διάρκεια άρδευσης) για την καλλιεργητική περίοδο, υπολογίζονται με βάση τις μετρημένες ιδιότητες του εδάφους από την εδαφολογική ανάλυση (κοκκομετρική σύσταση και οργανική ουσία), τα μέσα μετεωρολογικά δεδομένα της περιοχής όπου βρίσκονται οι καλλιέργειες, το είδος της καλλιέργειας και την αρδευτική μέθοδο.

*Λέξεις Κλειδιά:* Συμβουλές άρδευσης, Λογισμικό, Δόση, Εύρος, Διάρκεια άρδευσης

## AGRICULTURAL WATER MANAGEMENT THROUGH IRRIGATION ADVICE BASED ON SIMPLE FIELD DATA

E. Lekakis✉, F. Papadopoulos

HAO-DIMITRA, Institute of Soil and Water Resources, 57001, Themi, Thessaloniki,  
✉ elekakis@agro.auth.gr

### Abstract

Sustainable agricultural water management practices are essential for the economical use of water, the increase of water use efficiency, the boost of crop production, the reduction of irrigation applications costs and the protection of the environment. To this purpose, this study introduces a user – friendly software developed in the Soil and Water Resources Institute, with the objective to empower water management through irrigation advice. The proposed irrigations (mean monthly irrigation amount, duration and interval) for the growing season are estimated by site specific measured soil data (soil texture and organic matter), mean regional meteorological data, crop characteristics and simple irrigation system technical data.

*Keywords:* Irrigation Advice, Software, Irrigation amount, Irrigation duration, Irrigation Interval

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι επιπτώσεις των κλιματικών αλλαγών είναι πλέον εμφανείς σε έναν από τους βασικότερους πρωτογενείς τομείς παραγωγής όπως είναι η γεωργία, η οποία είναι ένας από τους κύριους παράγοντες διατάραξης του υδατικού ισοζυγίου διαφόρων περιοχών. Η γεωργία καταναλώνει το 80% των διαθέσιμων υδατικών πόρων και ενώ η ζήτηση του νερού άρδευσης είναι μεγάλη, η αρδευτική αποδοτικότητα του είναι χαμηλή. Γενική είναι η διαπίστωση ότι το υφιστάμενο καθεστώς στον τομέα των αρδεύσεων χαρακτηρίζεται από έλλειψη προγραμματισμού και αλόγιστη κατανάλωση νερού. Οι κυριότερες αιτίες έλλειψης νερού είναι οι εξής:

- μη επακριβής προσδιορισμός των αναγκών των καλλιεργειών σε νερό άρδευσης με αποτέλεσμα την υπερ-άρδευση (Bohnert and Bressan, 2001),
- μειωμένη αποδοτικότητα εφαρμογής του αρδευτικού νερού, η οποία κυμαίνεται από 80 έως περίπου 30% (Litskas et al., 2014),
- επέκταση των οργανωμένων αρδευόμενων εκτάσεων χωρίς αντίστοιχη αύξηση των υπαρχόντων υδατικών αποθεμάτων και εντατικοποίηση της παραγωγής για την αύξηση της απόδοσης με αποτέλεσμα την αύξηση των απαιτήσεων σε αρδευτικό νερό (Caviglia et al., 2004).

Με βάση τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι η αειφορική διαχείριση του αρδευτικού νερού με σκοπό την εξοικονόμηση και την αποτελεσματική χρήση του αποτελεί μονόδρομο. Παράλληλα, η όλο και πιο έντονη αστάθεια των κλιματικών συνθηκών, η οποία επηρεάζει την διαθεσιμότητα των υδατικών αποθεμάτων, έχει φέρει τους χρήστες του αρδευτικού νερού αντιμέτωπους με νέες προκλήσεις που αφορούν τη διαχείριση του νερού και κατ' επέκταση την αγροτική παραγωγή. Ο σκοπός της εργασίας αυτής είναι η παρουσίαση ενός λογισμικού για την παροχή συμβουλών άρδευσης στο σύγχρονο παραγωγό, ανάλογα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του εδάφους, της καλλιέργειάς του και τις μέσες μετεωρολογικές συνθήκες της περιοχής του.

## 2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

### 2.1. Λογισμικό άρδευσης

Το Ινστιτούτο Εδαφοϋδατικών Πόρων (πρώην Ινστιτούτο Εδαφολογίας Θεσσαλονίκης - ΙΕΘ) πραγματοποιεί ετησίως περίπου 3000 αναλύσεις εδαφών για περισσότερους από 1500 παραγωγούς και δέκα αγροτικούς συνεταιρισμούς, παρέχοντας επιπλέον συμβουλές ορθολογικής λίπανσης με τη χρήση ειδικού λογισμικού. Το λογισμικό που αναπτύχθηκε στο ΙΕΘ, λαμβάνει υπόψη τις φυσικές ιδιότητες του αγρού και τη συγκέντρωση των θρεπτικών στοιχείων πριν την καλλιεργητική περίοδο (αποτελέσματα εδαφολογικής ανάλυσης) και υπολογίζει τη δόση λίπανσης, την εποχή και τον τρόπο εφαρμογής των μικρο- και μακροστοιχείων, για 50 περίπου καλλιέργειες (Paradopoulos et al., 2014β).

Εξαιτίας της σημαντικής απήχησης της υπηρεσίας συμβουλευτικής λίπανσης (Paradopoulos et al., 2014α), το ΙΕΘ επιδιώκει την επέκταση συμβουλών προς τους αγρότες και σε άλλες παραμέτρους, όπως είναι η ορθολογική άρδευση. Για το σκοπό αυτό αναπτύχθηκε ένα λογισμικό για την παροχή συμβουλών άρδευσης. Η εφαρμογή λαμβάνει υπόψη απλές ιδιότητες του εδάφους, χαρακτηριστικά της καλλιέργειας, μέσα μετεωρολογικά δεδομένα και μέθοδο άρδευσης και προτείνει την αθροιστική δόση άρδευσης για κάθε μήνα της βλαστικής περιόδου, το μέσο εύρος άρδευσης και διάρκεια άρδευσης.

Το λογισμικό έχει αναπτυχθεί σε παραθυρικό περιβάλλον, ώστε να είναι φιλικό στο χρήστη και μπορεί να εγκατασταθεί με ευκολία ως εκτελέσιμη εφαρμογή σε κάθε λειτουργικό σύστημα προσωπικού υπολογιστή. Για την παροχή συμβουλών άρδευσης, ο χρήστης επιλέγει την περιοχή όπου είναι εγκατεστημένη η καλλιέργεια, το είδος της καλλιέργειας, το σύστημα άρδευσης και εισάγει τα ποσοστά ιλύος, αργίλου, άμμου και οργανικής ουσίας του εδάφους (αποτελέσματα της εδαφολογικής ανάλυσης). Στην Εικόνα 1 δίνεται το κεντρικό γραφικό περιβάλλον του λογισμικού άρδευσης.

**Εικόνα 1.** Κεντρικό γραφικό περιβάλλον του λογισμικού άρδευσης.

## 2.2. Προγραμματισμός των Αρδεύσεων

Στο λογισμικό, οι συμβουλές άρδευσης βασίζονται στον προγραμματισμό των αρδεύσεων για όλη τη βλαστική περίοδο (Heermann et al., 1990; Martin et al., 1990), ανάλογα με τα μέσα μετεωρολογικά δεδομένα. Το περιεχόμενο στο έδαφος ύψος νερού για κάθε ημέρα υπολογίζεται από την εξίσωση του υδατικού ισοζυγίου (Georgiou and Paramichail, 2008; Georgiou et al., 2010) της μορφής:

$$SM_i = SM_{i-1} + (ET - P_e - IR)_i \quad \text{όπου } SM_{LAM} < SM_i \leq SM_{FC} \quad (1)$$

όπου  $SM_i$  είναι το αποθηκευμένο ύψος νερού στο έδαφος την ημέρα  $i$ ,  $SM_{i-1}$  είναι το νερό την προηγούμενη ημέρα ( $i-1$ ),  $IR_i$  είναι το ύψος του νερού άρδευσης,  $P_{ei}$  είναι το ύψος του νερού της βροχής,  $ET_i$  είναι η εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας,  $SM_{LAM}$  είναι το αποθηκευμένο νερό στο επίπεδο της ελάχιστης επιτρεπόμενης υγρασίας εδάφους και  $SM_{FC}$  το νερό στο επίπεδο της υδατοϊκανότητας (όλες οι μονάδες σε mm). Για την κάλυψη των αναγκών σε νερό των φυτών, το  $SM_i$  πρέπει πάντα να είναι μεγαλύτερο του  $SM_{LAM}$ . Σε διαφορετική περίπτωση, όταν το  $SM_i$  εξισωθεί με το  $SM_{LAM}$ , το λογισμικό προτείνει άρδευση με ύψος νερού ίσο προς την ωφέλιμη υγρασία που υπολογίζεται με την παρακάτω εξίσωση:

$$USM_i = (SM_{FC} - SM_{LAM}) RD_i = \left[ SM_{FC} - F(SM_{FC} - SM_{pwp}) \right] RD_i \quad (2)$$



όπου  $USM_i$  είναι η ωφέλιμη υγρασία – η δόση άρδευσης,  $SM_{pwp}$  είναι το αποθηκευμένο νερό στο σημείο μόνιμης μάρανσης,  $RD_i$  είναι το βάθος του ριζοστρώματος την ημέρα  $i$  που εφαρμόζεται η άρδευση (όλες οι μονάδες σε mm) και  $F$  είναι ο συντελεστής ωφελιμότητας. Μετά την εφαρμογή της άρδευσης, ένας νέος κύκλος υπολογισμού του ύψους του εδαφικού νερού ξεκινά μέχρι την επόμενη άρδευση, διαδικασία που επαναλαμβάνεται για όλη την καλλιεργητική περίοδο, διαμορφώνοντας έτσι το πρόγραμμα άρδευσης. Έτσι, υπολογίζεται το σύνολο του αρδευτικού νερού που πρέπει να εφαρμοστεί σε κάθε άρδευση για κάθε μήνα της βλαστικής περιόδου.

### 2.3. Υπολογισμός των παραμέτρων του εδαφικού νερού

Για τον προσδιορισμό της δόσης άρδευσης  $USM_i$ , απαιτείται η εκτίμηση της ογκομετρικής υγρασίας στην υδατοϊκανότητα,  $\theta_{FC}$ , και στο σημείο μόνιμης μάρανσης,  $\theta_{pwp}$ , που υπολογίζονται από την εξίσωση της χαρακτηριστικής καμπύλης του εδάφους, ΧΚΕ, του van Genuchten (1980):

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left[ 1 + (\alpha |h|)^n \right]^{-(1-1/n)} \quad (3)$$

όπου  $\theta_r$  ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) είναι η υπολειμματική υγρασία,  $\theta_s$  ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) είναι η υγρασία στον κορεσμό,  $h$  (cm) είναι το ύψος πίεσης του εδάφους,  $\alpha$  ( $\text{cm}^{-1}$ ) και  $n$  είναι εμπειρικές παράμετροι. Οι παράμετροι αυτές προσδιορίζονται άμεσα με μετρήσεις στο εργαστήριο ή έμμεσα με πεδοσυναρτήσεις από εύκολα μετρήσιμες φυσικοχημικές ιδιότητες του εδάφους όπως είναι η κοκκομετρική σύσταση και η οργανική ουσία (Aschonitis and Antonopoulos, 2013). Οι πεδοσυναρτήσεις που χρησιμοποιούνται στο λογισμικό για να συνδέσουν το έδαφος της καλλιέργειας με τις παραμετρους της ΧΚΕ έχουν προταθεί από τους Vereecken et al. (1990) και είναι της μορφής:

$$\theta_s = 0.838 - 0.283\rho_b + 0.0013(\% \text{clay}) \quad r^2 = 0.849 \quad (4)$$

$$\theta_r = 0.015 + 0.005(\% \text{clay}) + 0.014(\% \text{OC}) \quad r^2 = 0.702 \quad (5)$$

$$\ln(\alpha) = -2.486 + 0.025(\% \text{sand}) - 0.351(\% \text{OC}) - 2.617\rho_b - 0.023(\% \text{clay}) \quad r^2 = 0.621 \quad (6)$$

$$\ln(n) = 0.053 - 0.009(\% \text{sand}) - 0.013(\% \text{clay}) + 0.00015(\% \text{sand})^2 \quad r^2 = 0.556 \quad (7)$$

όπου  $\rho_b$  ( $\text{gcm}^{-3}$ ) είναι η φαινομένη πυκνότητα του εδάφους,  $(\% \text{OC})$  είναι το ποσοστό του περιεχόμενου οργανικού άνθρακα,  $(\% \text{silt})$ ,  $(\% \text{clay})$  και  $(\% \text{sand})$  είναι τα ποσοστά της ιλύος, της αργίλου και της άμμου, αντίστοιχα. Η φαινομένη πυκνότητα του εδάφους υπολογίζεται με την πεδοσυνάρτηση των Manrique and Jones (1991) ως εξής:

$$\rho_b = 1.510 - 0.113(\% \text{OC}) \quad r^2 = 0.412 \quad (8)$$

Τα ποσοστά  $\% \text{sand}$ ,  $\% \text{silt}$ ,  $\% \text{clay}$  και  $\% \text{OC}$  που προκύπτουν από την εδαφολογική ανάλυση, εισάγονται από το χρήστη στο λογισμικό για την εκτίμηση των  $\theta_{FC}$  (σε  $h_{FC} = -100$  cm ή  $-330$  cm ή  $-500$  cm ανάλογα με την υφή του εδάφους) και  $\theta_{pwp}$  (σε  $h_{pwp} = -15000$  cm).

### 2.4. Χαρακτηριστικά Καλλιέργειας

Το λογισμικό άρδευσης περιέχει εκτενείς βάσεις δεδομένων για τα χαρακτηριστικά 37 καλλιεργειών (8 μεγάλες καλλιέργειες, 15 δενδρώδεις και 14 οπωροκηπευτικά). Συγκεκριμένα, περιλαμβάνει τους φυτικούς συντελεστές, τα στάδια ανάπτυξης, τους συντελεστές ωφελιμότητας, ημερομηνίες πρώιμης και όψιμης σποράς και το μέγιστο βάθος του ριζοστρώματος για κάθε καλλιέργεια (Parazafiriou, 1996; Allen et al., 1998). Οι φυτικοί συντελεστές,  $K_c$ , χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας από την εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (Allen et al., 1998). Η ημερήσια ανάπτυξη του ριζικού συστήματος περιγράφεται από τη λογιστική συνάρτηση ως εξής:

$$RD_i = RD_{\max} \{1 + \alpha \cdot \exp[-\beta \cdot (i - i_{\max})]\}^{-1} \quad (9)$$



όπου  $RD_i$  είναι το βάθος του ριζοστρώματος την ημέρα  $i$ ,  $RD_{max}$  είναι το μέγιστο βάθος του ριζοστρώματος την ημέρα  $i_{max}$ ,  $a$  και  $b$  είναι παράμετροι προσαρμογής. Για κάθε καλλιέργεια, τα  $i_{max}$ ,  $a$  και  $b$  δίδονται στις βάσεις δεδομένων του λογισμικού, και έχουν προκύψει με τη θεώρηση ότι το αρχικό βάθος ριζοστρώματος είναι 100 mm και ότι έχει αναπτυχθεί πλήρως στο πρώτο τρίτο της βλαστικής περιόδου. Το βάθος ριζοστρώματος πολυετών καλλιεργειών (μηδική και δενδρώδεις καλλιέργειες) θεωρείται σταθερό μετά το πρώτο έτος και δίδεται στις βάσεις δεδομένων.

## 2.5. Σύστημα Άρδευσης

Στο λογισμικό λαμβάνονται υπόψη τρία από τα πιο διαδεδομένα συστήματα άρδευσης στον Ελλαδικό χώρο (Karamanos et al., 2005), η στάγδην άρδευση, η άρδευση με αυλάκια και ο καταιονισμός. Στην περίπτωση της άρδευσης με αυλάκια η διάρκεια της άρδευσης υπολογίζεται με την παρακάτω εξίσωση:

$$T_i = 60 \cdot (d_n \cdot W \cdot L) \cdot Q_u^{-1} \quad (10)$$

όπου  $T_i$  είναι η διάρκεια άρδευσης (min),  $L$  είναι το μήκος του αυλακιού (m),  $W$  είναι το πλάτος του αυλακιού (m),  $Q_u$  είναι η παροχή ( $l\,h^{-1}$ ) και  $d_n$  είναι η δόση άρδευσης (mm).

Στην περίπτωση της στάγδην άρδευσης η εφαρμογή του νερού προσεγγίζεται μονοδιάστατα με τη θεώρηση ότι το ισοδύναμο νερό των σταλακτήρων διέρχεται από ένα μόνο σημείο λόγω συμμετρίας. Η διάρκεια άρδευσης πάλι υπολογίζεται από την Εξίσωση (10) όπου  $Q_u$  είναι η παροχή του σταλακτήρα ( $l\,h^{-1}$ ),  $L$  είναι η απόσταση μεταξύ των σταλακτήρων επί τον αγωγό εφαρμογής (m) και  $W$  είναι η απόσταση μεταξύ των αγωγών εφαρμογής (m). Οι πληροφορίες σχετικά με τα χαρακτηριστικά του συστήματος άρδευσης παρέχονται από τον παραγωγό στο χρήστη του λογισμικού που τα καταχωρεί.

Σε ότι αφορά την περίπτωση του καταιονισμού, τα αποτελέσματα του λογισμικού περιορίζονται στη δόση άρδευσης, γιατί για τον υπολογισμό της διάρκειας άρδευσης κατά τον καταιονισμό, απαιτούνται τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του συστήματος (πίεση λειτουργίας, ταχύτητα μετακίνησης εκτοξευτήρα, ζώνη διαβροχής, κ.λπ.), που πολύ σπάνια τα γνωρίζουν οι παραγωγοί, καθώς αποτελούν εξειδικευμένα χαρακτηριστικά.

## 2.6. Μέσα μετεωρολογικά δεδομένα

Το λογισμικό άρδευσης περιλαμβάνει σε βάσεις δεδομένων, τη μέση μηνιαία αθροιστική εξατμισοδιαπνοή αναφοράς και βροχόπτωση για 5900 περιοχές της Ελλάδος (πόλεις, κωμοπόλεις και χωριά ανά Νομό). Η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς έχει υπολογιστεί με τη μέθοδο FAO-56 Penman-Monteith (Allen et al., 1998), από μέσα μετεωρολογικά δεδομένα της περιόδου 1950-2000. Οι τιμές της βροχόπτωσης χρησιμοποιούνται αυτούσια (δεν είναι η ωφέλιμη) και έχουν προκύψει από τα ίδια δεδομένα. Οι τιμές αυτές προέκυψαν από τις εργασίες των Demertzi et al. (2014) και Aschonitis et al. (2015). Όταν ο χρήστης του λογισμικού επιλέγει μια περιοχή, οι μέσες μηνιαίες αθροιστικές τιμές της εξατμισοδιαπνοής και της βροχόπτωσης της περιοχής, κατανέμονται ισόποσα στους αντίστοιχους μήνες της βλαστικής περιόδου.

## 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 3.1. Παράδειγμα 1. Καλλιέργεια καλαμποκιού και άρδευση με αυλάκια

Ένας παραγωγός που επιθυμεί να λάβει συμβουλές άρδευσης για καλαμπόκι υπό άρδευση με αυλάκια, πρέπει να παρέχει στο χρήστη του λογισμικού πληροφορίες που

αφορούν την περιοχή, το σύστημα άρδευσης (μήκος και πλάτος αυλακιού και παροχή νερού) και την εποχή σποράς. Έστω ότι η περιοχή είναι η Ν. Μεσήμβρια του Ν. Θεσσαλονίκης, η σπορά είναι πρώιμη, η παροχή είναι  $Q_u = 3600 \text{ l h}^{-1}$ , το μήκος του αυλακιού είναι  $L = 250 \text{ m}$  και το πλάτος του αυλακιού είναι  $W = 0.80 \text{ m}$ . Ο χρήστης του λογισμικού επιλέγει την περιοχή, την καλλιέργεια καλαμποκιού, πρώιμη σπορά, σύστημα άρδευσης με αυλάκια, καταχωρεί τα χαρακτηριστικά του αρδευτικού συστήματος και από την εδαφολογική ανάλυση που έχει προηγηθεί στο έδαφος του αγρού του παραγωγού, εισάγει τις τιμές άμμος%=16%, ιλύς%=51%, άργιλος%=33% και Οργ. Ουσία=1.2%. Οι πληροφορίες που χρησιμοποιούνται από τις βάσεις δεδομένων είναι τα στάδια ανάπτυξης του καλαμποκιού που είναι 25/40/60/25 ημέρες, ο φυτικός συντελεστής του καλαμποκιού που είναι 0.3, 1.15 και 0.35, το  $F = 0.55$ , το  $RD_{\max} = 750 \text{ mm}$ , τα  $\alpha$  και  $\beta$  που είναι 0.0002 και 0.2620, αντίστοιχα. Κατά την εκτέλεση του λογισμικού προτείνεται η εφαρμογή 427 mm ύψους αρδευτικού νερού, που κατανέμονται σε 142, 214 και 71 mm τους μήνες Ιούνιο, Ιούλιο και Αύγουστο, αντίστοιχα, με μέσο εύρος άρδευσης 16 ημέρες και 237 min διάρκεια άρδευσης, για την κάλυψη των αναγκών σε νερό των φυτών.

### 3.2. Παράδειγμα 2. Καλλιέργεια Μηδικής και καταιονισμός

Ένας παραγωγός που επιθυμεί να λάβει συμβουλές άρδευσης για μηδική υπό άρδευση με καταιονισμό, πρέπει να παρέχει στο χρήστη του λογισμικού απλές πληροφορίες σχετικά με την περιοχή και την ηλικία της καλλιέργειας. Έστω ότι η περιοχή είναι η Ν. Μεσήμβρια του Ν. Θεσσαλονίκης και ότι πρόκειται για το έτος εγκατάστασης της μηδικής, με πρώιμη σπορά. Το λογισμικό λαμβάνει υπόψη τέσσερις κοπές της μηδικής με στάδια ανάπτυξης 10/30/25/10 ημέρες για την πρώτη κοπή και 5/10/10/5 ημέρες για τις υπόλοιπες τρεις κοπές. Οι πληροφορίες που χρησιμοποιούνται από τις βάσεις δεδομένων είναι ο φυτικός συντελεστής της μηδικής που είναι 0.4, 1.20 και 1.15 για όλες τις κοπές, το  $F = 0.55$ , το  $RD_{\max} = 1000 \text{ mm}$ , τα  $\alpha$  και  $\beta$  που είναι 0.0001 και 0.2740, αντίστοιχα. Ο χρήστης του λογισμικού επιλέγει την περιοχή, την καλλιέργεια μηδικής, πρώιμη σπορά, το πρώτο έτος για την ηλικία της πολυετούς καλλιέργειας και καταιονισμό ως σύστημα άρδευσης. Τέλος, καταχωρούνται τα αποτελέσματα της εδαφολογικής ανάλυσης άμμος%=16%, ιλύς%=51%, άργιλος%=33% και Οργ. Ουσία=1.2%. Κατά την εκτέλεση του λογισμικού προτείνεται η εφαρμογή 475 mm ύψους αρδευτικού νερού κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου κατανεμημένα κατά 91, 182, 91 και 91 mm το Μάιο, Ιούνιο, Ιούλιο και Αύγουστο, αντίστοιχα.

### 3.3. Παράδειγμα 3. Οπωρώνας μηλιάς και στάγδην άρδευση

Έστω ότι επιθυμείται να ληφθούν συστάσεις άρδευσης για καλλιέργεια οπωρώνα μηλιάς που είναι διατεταγμένος σε γραμμική παλμέτα πυκνής φύτευσης  $1.5 \times 3.5 \text{ m}$  που αρδεύεται με στάγδην άρδευση για την περιοχή του Δ. Βελβεντού του Ν. Κοζάνης. Η καλλιέργεια βρίσκεται στο τέταρτο έτος ανάπτυξης. Ο παραγωγός πρέπει να παρέχει στο χρήστη του λογισμικού πληροφορίες που αφορούν την περιοχή, την ηλικία της δενδρώδους καλλιέργειας και το σύστημα άρδευσης. Ο χρήστης του λογισμικού επιλέγει την περιοχή, την καλλιέργεια μηλιάς, μεγαλύτερο από το πρώτο έτος για την ηλικία της πολυετούς καλλιέργειας και στάγδην άρδευση. Καταχωρούνται στο λογισμικό τα χαρακτηριστικά του συστήματος στάγδην άρδευσης που είναι η παροχή των σταλακτήρων,  $Q_u = 8 \text{ l h}^{-1}$ , η απόσταση μεταξύ των σταλακτήρων επί τον αγωγό εφαρμογής,  $L = 1.5 \text{ m}$ , και η απόσταση μεταξύ των αγωγών εφαρμογής,  $W = 3.5 \text{ m}$ . Τέλος, καταχωρούνται τα αποτελέσματα της εδαφολογικής ανάλυσης άμμος%=16%, ιλύς%=51%, άργιλος%=33% και Οργ. Ουσία=1.2%.

Οι πληροφορίες που χρησιμοποιούνται από τις βάσεις δεδομένων είναι τα βλαστικά στάδια των δενδρωδών καλλιεργειών που συμπίπτουν με τις ημέρες των μηνών Μαΐου, Ιουνίου, Ιουλίου, Αυγούστου και Σεπτεμβρίου, δηλαδή 31/30/31/31/30 με σύνολο 153 ημερών βλαστικής περιόδου. Ο  $K_c$  της μηλιάς είναι 0.60, 0.85, 1.00, 0.85 και 0.80, για τους μήνες Μάιο έως Σεπτέμβριο, αντίστοιχα και θεωρείται ότι η βλαστική περίοδος ξεκινά από την 1<sup>η</sup> Μαΐου. Το μέγιστο βάθος του ριζικού συστήματος το οποίο θεωρείται σταθερό μετά το πρώτο έτος είναι 500 mm. Ο συντελεστής ωφελιμότητας της μηλιάς είναι 0.50. Κατά την εκτέλεση του λογισμικού προτείνεται η εφαρμογή 367 mm ύψους αρδευτικού νερού κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου, κατανεμημένα κατά 73, 147, 110 και 37 mm τον Ιούνιο, Ιούλιο, Αύγουστο και Σεπτέμβριο, αντίστοιχα. Το μέσο εύρος άρδευσης είναι 12 ημέρες και η διάρκεια άρδευσης είναι σταθερή και ίση προς 443 min.

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η μείωση των αποθεμάτων νερού παγκοσμίως και το υψηλό κόστος του αρδευτικού νερού, επιβάλλουν την ανάπτυξη μεθόδων για τον προγραμματισμό των αρδεύσεων με σκοπό την ορθολογική χρήση νερού. Το Ινστιτούτο Εδαφοϋδατικών Πόρων έχει αναπτύξει πολύτιμα εργαλεία για τη διαχείριση της γεωργικής γης, τόσο στον τομέα των λιπάνσεων, όσο και στον τομέα των αρδεύσεων. Σε αυτή την εργασία παρουσιάζεται το λογισμικό παροχής συμβουλών άρδευσης. Με τη βοήθεια του λογισμικού, ένας παραγωγός μπορεί να λάβει συμβουλές άρδευσης ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του εδάφους του αγρού και της καλλιέργειας του, πραγματοποιώντας μια απλή εδαφολογική ανάλυση, παρέχοντας μόνο βασικά στοιχεία για το αρδευτικό του σύστημα. Οι συμβουλές άρδευσης αφορούν την μηνιαία δόση άρδευσης, το μέσο εύρος άρδευσης και τη μέση διάρκεια άρδευσης, όπως προκύπτουν από μέσα μετεωρολογικά δεδομένα. Σημειώνεται ότι παρά τις συμβουλές άρδευσης, οι εφαρμογές των αρδεύσεων και το σύνολο του μηνιαίου αρδευτικού νερού θα πρέπει να μεταβάλλονται από τους παραγωγούς, ανάλογα με τις κατά τόπο επικρατούσες μετεωρολογικές συνθήκες. Το λογισμικό μπορεί περαιτέρω να αναπτυχθεί ώστε να παρέχει συμβουλές άρδευσης σε πραγματικό χρόνο.

#### ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Το έργο εντάσσεται στην Πράξη «Εκπόνηση σχεδίων Ερευνητικών & Τεχνολογικών Αναπτυξιακών έργων Καινοτομίας (ΑγροΕΤΑΚ)» με MIS 453350, στο πλαίσιο του ΕΠ «Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού», ΕΣΠΑ 2007-2013. Το έργο συγχρηματοδοτείται από το Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο (ΕΚΤ) και από Εθνικούς Πόρους και συντονίζεται από τον ΕΛΓΟ-ΔΗΜΗΤΡΑ, Ινστιτούτο Εδαφοϋδατικών Πόρων/Υπεύθυνος Παρακολούθησης: Δρ Φραντζής Παπαδόπουλος (Τακτικός Ερευνητής).

#### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M., 1998. *Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements*. In: FAO Irrigation and Drainage Paper 56.
- Aschonitis, V., Miliaresis, G., Demertzi, K. and Papamichail, D., 2015. *Terrain segmentation of Greece using the spatial and seasonal variation of reference crop evapotranspiration*. Environmental Earth Sciences In Press.
- Aschonitis, V.G. and Antonopoulos, V.Z., 2013. *New equations for the determination of soil saturated hydraulic conductivity using the van Genuchten model parameters and effective porosity*. Irrigation and Drainage, doi: 10.1002/ird.1751.

- Bohnert, H.J. and Bressan, R.A., 2001. *Abiotic stresses, plant reactions, and new approaches towards understanding stress tolerance*. In: Crop Science: Progress and Prospects, eds. J. Noesberger, H. H. Geiger, and P. C. Struik, pp. 81–100. Wallingford, UK: CABI.
- Caviglia, O.P., Sadrasc, V.O. and Andradeb F.H., 2004. *Intensification of agriculture in the south-eastern Pampas I. Capture and efficiency in the use of water and radiation in double-cropped wheat–soybean*. Field Crops Research, 87: 117–129.
- Demertzi, K., Papamichail, D., Aschonitis, V. and Miliareisis, G., 2014. *Spatial and seasonal patterns of precipitation in Greece: the terrain segmentation approach*. Global NEST Journal, 16(5): 988-997.
- Georgiou P.E. and Papamichail, D.M., 2008. *Optimization model of an irrigation reservoir for water allocation and crop planning under various weather conditions*. Irrigation Science, Vol. 26 (6), pp. 487-504.
- Georgiou, P.E., Antonopoulos, V.Z. and 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 (2010), p. 8
- Heermann, D.F., Martin, D.L., Jackson, R.D., and Stegman, E.C., 1990. *Irrigation scheduling controls and techniques*. In: Stewart, B.A. and Nielsen, D.R. (Eds.), Irrigation of Agricultural Crops, pp. 509-535. Agronomy Monograph No. 30, American Society of Agronomy, Madison, WI.
- Karamanos, A., Aggelides, S. and Londra, P., 2005. *Irrigation systems performance in Greece*. In : Lamaddalena N., Lebdi F., Todorovic M., Bogliotti C. (Eds), Irrigation systems performance. Bari: CIHEAM (Options Méditerranéennes: Série B. Etudes et Recherches; n. 52), pp. 99-110.
- Litskas V.D., Aschonitis, V.G., Lekakis, E.H. and Antonopoulos, V.Z., 2014. *Effects of land use and irrigation practices on Ca, Mg, K, Na loads in rice-based agricultural systems*. Agricultural Water Management, 132: 30-36.
- Manrique, L.A. and Jones, C.A., 1991. *Bulk density of soils in relation to soil physical and chemical properties*. Soil Science Society of America Journal, 55: 476-481.
- Martin, D.L., Heermann, D.F., and Fereres, E., 1990. *Irrigation scheduling principles*. In: Hoffman, G.J., Howell, T.A. and Solomon, K.H. (Eds.), Management of Farm Irrigation Systems, pp. 155-203. American Society of Agriculture Engineers, St. Joseph, MI.
- Papadopoulos, A., Papadopoulos, F., Tziachris, P., Metaxa, I. and Iatrou, M., 2014α. *Site Specific Management with the Use of a Digitized Soil Map for the Regional Unit of Kastoria*. From Fork to Farm: the International Journal of the American Farm School of Thessaloniki. Vol 1, No.1, 2014.
- Papadopoulos, A., Papadopoulos, F., Tziachris, P., Metaxa, I. and Iatrou, M., 2014β. *Site specific agricultural soil management with the use of new technologies*. Global NEST Journal, Vol 16, No 1, pp 59-67.
- Papazafiriou, Z.G., 1996. *Crop evapotranspiration: regional studies in Greece*. In: Proceedings of International Symposium of Applied Agrometeorology and Agroclimatology, European Commission, COST 77, 79, 711, EUR 18328, pp. 275–286.
- van Genuchten, M.Th.. 1980. *A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils*. Soil Science Society of America Journal, 44: 892-898.
- Vereecken, H., Maes, J., Feyen, J., 1990. *Estimating unsaturated hydraulic conductivity from easily measured soil properties*. Soil Science 149: 1–12

## ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΥΠΟ ΠΙΕΣΗ ΑΡΔΕΥΤΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΑΠΟΙΚΙΑΣ ΜΥΡΜΗΓΚΙΩΝ

Π. Κανάκης✉, Δ. Παπαμιχαήλ, Π. Γεωργίου

Τομέας Εγγείων Βελτιώσεων, Εδαφολογίας και Γεωργικής Μηχανικής, Τμήμα Γεωπονίας Α.Π.Θ.,  
54124 Θεσσαλονίκη, ✉ kanakisp@gmail.com

### Περίληψη

Οι ευρετικοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης έχουν τύχει μεγάλης αναγνώρισης και ανάπτυξης τα τελευταία χρόνια σε πολλούς τομείς έρευνας. Παρόλα αυτά η εφαρμογή τους σε υπό πίεση δίκτυα άρδευσης είναι πολύ περιορισμένη. Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η εφαρμογή ενός Αλγορίθμου Βελτιστοποίησης Αποικίας Μυρμηγκιών, για την οικονομική βελτιστοποίηση της επιλογής διαμέτρων ενός υπό πίεση αρδευτικού δικτύου βαρύτητας. Για την ανάπτυξη του αλγορίθμου χρησιμοποιήθηκε η γλώσσα προγραμματισμού Fortran. Στον κώδικα προγραμματισμού ενσωματώθηκαν όλοι οι απαραίτητοι προκαταρκτικοί υδραυλικοί υπολογισμοί, ο έλεγχος της υδραυλικής συνέπειας των αποτελεσμάτων της μεθόδου, καθώς και μία διαδικασία βελτίωσης της λύσης, μέσω της επιλογής δύο διαμέτρων σε όσους αγωγούς υπάρχει η δυνατότητα. Για την καλύτερη αξιολόγηση της μεθόδου, πραγματοποιήθηκε συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων με τη μέθοδο του Γραμμικού Προγραμματισμού.

*Λέξεις κλειδιά:* Αρδευτικά δίκτυα υπό πίεση, Οικονομική βελτιστοποίηση, Αλγόριθμος βελτιστοποίησης αποικίας μυρμηγκιών

## OPTIMIZATION OF PRESSURIZED IRRIGATION NETWORKS USING AN ANT COLONY OPTIMIZATION ALGORITHM

P. Kanakis✉, D. Papamichail, P. Georgiou

Department of Hydraulics, Soil Science and Agricultural Engineering, School of Agriculture, A.U.Th.,  
54124 Thessaloniki, ✉ kanakisp@gmail.com

### Abstract

Heuristic optimization algorithms have been applied in recent years in many fields of research. However, their applications in pressurized irrigation networks are very limited. The aim of this work is the application of an Ant Colony Optimization Algorithm for the economic optimization of the selection of diameters of a pressurized gravity irrigation network. For the development of the algorithm the programming language FORTRAN was used. In the programming code all of the necessary preliminary hydraulic calculations, the control of hydraulic consistency of the results and a process for improving the solution, by choosing two diameters for those pipes that have the possibility according to their hydraulic load, are integrated. To better evaluate the method, a comparative analysis of the results with the method of Linear Programming was made.

*Key words:* Pressurized irrigation networks, Cost optimization, Ant colony optimization algorithm



## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το πρόβλημα της οικονομικής βελτιστοποίησης ενός συλλογικού αρδευτικού δικτύου υπό πίεση περιλαμβάνει την επιλογή των κατάλληλων διαμέτρων των αγωγών, με τρόπο τέτοιο, ώστε το συνολικό κόστος να είναι ελάχιστο και η υδραυλική συμπεριφορά του δικτύου επαρκής. Για την επίλυση του προβλήματος έχουν αναπτυχθεί και εφαρμοστεί αρκετές μαθηματικές μέθοδοι, όπως είναι η ασυνεχής μέθοδος του γραμμικού προγραμματισμού (Karmeli et al., 1968; Kanakis et al., 2014), η συνεχής μέθοδος του μη γραμμικού προγραμματισμού (Swamee et al., 1973), η ασυνεχής μέθοδος του Labye (Labye et al., 1988), η ασυνεχής μέθοδος του δυναμικού προγραμματισμού (Liang, 1971) και η μέθοδος του ασαφούς γραμμικού προγραμματισμού (Κανάκης κ.α., 2012; Kanakis et al., 2014). Από τη δεκαετία του 1990 άρχισε μία προσπάθεια να εφαρμοστούν στην επίλυση του προβλήματος Εξελικτικοί Αλγόριθμοι (Evolutionary Algorithms, EAs), οι οποίοι είναι εμπνευσμένοι από φυσικές διεργασίες. Οι εφαρμογές των αλγορίθμων έγιναν κυρίως σε δίκτυα ύδρευσης αλλά και σε αρδευτικά δίκτυα διανομής νερού με βρόχους και πολύ σπάνια σε ακτινωτά. Οι κυριότεροι ευρετικοί αλγόριθμοι που έχουν χρησιμοποιηθεί στη βελτιστοποίηση δικτύων είναι οι: Γενετικοί Αλγόριθμοι (Genetic Algorithms) (GA), Αλγόριθμος Προσομοιωμένης Ανόπτησης (Simulated Annealing) (SA), Αλγόριθμος Διαφορικής Εξέλιξης (Differential Evolution) (DE), Αλγόριθμος Αναζήτησης Διασποράς (Scatter Search) (SS), Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization) (PSO) και ο Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης Αποικίας Μυρμηγκιών (Ant Colony Optimization Algorithm) (ACO), ο οποίος χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία. Περισσότερες πληροφορίες για την εφαρμογή των παραπάνω αλγορίθμων δίνονται από τους De Corte and Sörensen (2013).

Η χρήση των αλγορίθμων βελτιστοποίησης αποικίας μυρμηγκιών (για συντομία θα αναφέρονται ως αλγόριθμοι ACO), για το πρόβλημα της ελαχιστοποίησης του κόστους των αγωγών, έχει περιοριστεί σε δίκτυα ύδρευσης με βρόχους (Maier et al., 2003; Afshar, 2006; Gil et al., 2011). Από τη δημιουργία του πρώτου αλγορίθμου ACO και μετά, έχουν προστεθεί διάφορες τροποποιήσεις και διορθώσεις που οδήγησαν σε νέους τύπους του αλγορίθμου. Ο πρώτος αλγόριθμος αποικίας μυρμηγκιών ονομάστηκε Σύστημα Μυρμηγκιών (Ant System, AS) και αναπτύχθηκε από τους Dorigo et al. (1996), ενώ η πρώτη βελτίωσή του ήταν το Elitist Ant System (EAS), το οποίο παρουσιάστηκε ταυτόχρονα από τους ίδιους ερευνητές. Αργότερα, οι Bullnheimer et al. (1999) παρουσίασαν το Rank-Based Ant System (AS<sub>Rank</sub>) και οι Stützle and Hoos (2000) παρουσίασαν το Max-Min Ant System (MMAS). Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η παρουσίαση και εφαρμογή ενός τροποποιημένου αλγορίθμου ACO σε ένα μικρό υπό πίεση ακτινωτό αρδευτικό δίκτυο βαρύτητας και η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του σε σύγκριση με αυτά της μεθόδου του Γραμμικού Προγραμματισμού.

## 2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

### 2.1. Τοποθέτηση προβλήματος βελτιστοποίησης

Το πρόβλημα που καλείται να λυθεί μπορεί να περιγραφεί από μία αντικειμενική συνάρτηση, της οποίας ζητείται να βρεθεί η ελάχιστη τιμή και η οποία έχει τη μορφή:

$$F(\phi) = \min \sum_{i=1}^n DC_{\phi j} \times L_i \quad (1)$$

όπου:  $n$  είναι ο αριθμός των αγωγών και των κόμβων απόφασης,  $DC_{\phi j}$  είναι το κόστος ανά  $m$  μήκους της πιθανής διαμέτρου  $\phi$  σε €/m και  $L_i$  είναι το μήκος σε  $m$  του αγωγού  $i$ .



Οι περιορισμοί που καλούνται να ικανοποιηθούν για τη σωστή υδραυλική λειτουργία του δικτύου είναι:

(α) Η ταχύτητα ροής του νερού στους αγωγούς,  $V_i$ , πρέπει να είναι εντός των ορίων που θέτουν η μέγιστη,  $V_{\max}$ , και η ελάχιστη,  $V_{\min}$ , επιτρεπόμενες ταχύτητες.

(β) Η διάμετρος των αγωγών του δικτύου,  $D_i$ , πρέπει να μειώνεται από τα ανάντη προς τα κατόντη.

(γ) Το υπολειπόμενο φορτίο στους κόμβους πέρατος των αγωγών,  $H_i$  σε m, δεν πρέπει να παίρνει αρνητικές τιμές, δηλ.

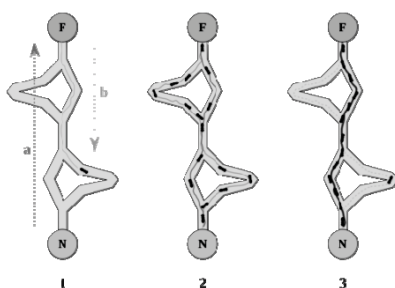
$$H_i = Z_0 - Z_i - H_{\min,i} - \sum_{i=1}^k \Delta H_i \geq 0 \quad (2)$$

όπου:  $Z_0$  το υψόμετρο της δεξαμενής,  $Z_i$  το υψόμετρο του κόμβου  $i$ ,  $H_{\min,i}$  το ελάχιστο απαιτούμενο φορτίο στον κόμβο  $i$  και  $\sum_{i=1}^k \Delta H_i$  οι συνολικές απώλειες φορτίου στους αγωγούς από την αρχή του δικτύου μέχρι τον κόμβο  $i=k$ .

## 2.2. Αλγόριθμος αποικίας μυρμηγκιών (ACO)

Η βελτιστοποίηση με τη χρήση των Αλγορίθμων ACO έχει ως πηγή έμπνευσης τη μέθοδο που χρησιμοποιούν τα μυρμήγκια για να βρουν την πιο κοντινή διαδρομή για την τροφή τους. Αυτό επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας ίχνη φερομόνης σαν μια μορφή έμμεσης επικοινωνίας. Τα μυρμήγκια εναποθέτουν ίχνη φερομόνης πηγαίνοντας προς την πηγή της τροφής, ενώ άλλα μυρμήγκια ακολουθούν αυτό το μονοπάτι της φερομόνης. Τα μυρμήγκια που τυχαίνει να ακολουθήσουν τη συντομότερη διαδρομή προς την τροφή θα δημιουργήσουν ένα ισχυρό μονοπάτι με υψηλή συγκέντρωση φερομόνης, το οποίο προσελκύει όλο και περισσότερα μυρμήγκια να την ακολουθήσουν.

Στο Σχήμα 1 φαίνεται η διαδικασία εντοπισμού της συντομότερης διαδρομής προς την τροφή των μυρμηγκιών με την υψηλή συγκέντρωση φερομόνης.



**Σχήμα 1.** Απεικόνιση της διαδικασίας εντοπισμού της συντομότερης διαδρομής προς την τροφή των πραγματικών μυρμηγκιών.

Η μέθοδος βελτιστοποίησης με αλγόριθμο ACO είναι μία επαναληπτική μέθοδος. Οι βασικές διαδικασίες του αλγορίθμου, είναι η επιλογή μίας εκ των πιθανών εναλλακτικών επιλογών σε κάθε σημείο απόφασης, η διαδικασία ενημέρωσης της φερομόνης των πιθανών επιλογών, η οποία διαχωρίζεται στις διαδικασίες εξάτμισης και προσθήκης φερομόνης, και η διαδικασία υπολογισμού της καλύτερης λύσης του προβλήματος βάσει των τιμών φερομόνης. Στο πρόβλημα βελτιστοποίησης ενός αρδευτικού δικτύου, οι πιθανές εναλλακτικές επιλογές είναι οι πιθανές διάμετροι των αγωγών και σημεία απόφασης είναι οι κόμβοι που ορίζουν την αρχή κάθε αγωγού.

Η επιλογή μίας εκ των πιθανών διαμέτρων για κάθε αγωγό γίνεται μέσω μίας πολιτικής

απόφασης. Η πιθανότητα να επιλεγεί κάθε μία από τις πιθανές διαμέτρους υπολογίζεται με τη σχέση (Dorigo et al., 1996):

$$p_{i,j}^k(t) = \frac{[\tau_{i,j}(t)]^\alpha \cdot (\eta_{i,j})^\beta}{\sum_{l,j} [\tau_{i,l}(t)]^\alpha \cdot (\eta_{i,l})^\beta} \quad (3)$$

όπου:  $p_{i,j}^k(t)$  η πιθανότητα να επιλεγεί η πιθανή διάμετρος  $j$  για τον αγωγό  $i$  στην επανάληψη  $t$  από το μυρμήγκι  $k$ ,  $\tau_{i,j}(t)$  η συγκέντρωση φερομόνης της πιθανής διαμέτρου  $j$  του αγωγού  $i$  στην επανάληψη  $t$ ,  $\eta_{i,j}$  ένας ευρετικός παράγοντας που ευνοεί επιλογές χαμηλότερου κόστους,  $\alpha$  και  $\beta$  είναι εκθετικές παράμετροι πολιτικής απόφασης, που ελέγχουν τη σχετική σημαντικότητα της φερομόνης και του ευρετικού παράγοντα στην τυχαία επιλογή.

Σύμφωνα με τους Dorigo et al. (1996), ο ευρετικός παράγοντας  $\eta_{i,j}$  είναι ανάλογος με το να παρέχεις στα αληθινά μυρμήγκια όραση και ονομάζεται ορατότητα ή οπτικό εύρος (visibility). Η τιμή της υπολογίζεται ως το αντίστροφο του κόστους,  $c_{i,j}$ , της πιθανής διαμέτρου:

$$\eta_{i,j} = 1/c_{i,j} \quad (4)$$

Οι παράμετροι πολιτικής απόφασης,  $\alpha$  και  $\beta$ , ελέγχουν το πόσο σημαντικό ρόλο παίζουν η ποσότητα της φερομόνης και η ορατότητα αντίστοιχα, για την απόφαση κάθε μυρμηγκιού. Αν  $\alpha \gg \beta$  τότε ο αλγόριθμος θα επιλέγει βασιζόμενος κυρίως στις πληροφορίες που αντιπροσωπεύει η φερομόνη, ενώ αν  $\beta \gg \alpha$ , τότε ο αλγόριθμος θα επιλέγει κυρίως τις φθηνότερες εναλλακτικές, αδιαφορώντας για τις επιπτώσεις που έχουν αυτές οι επιλογές στην ποιότητα της τελικής λύσης (Zecchin et al., 2005). Κατά την εκκίνηση της διαδικασίας, όλες οι πιθανές διαμέτρους έχουν την ίδια πιθανότητα επιλογής.

Η εξάτμιση φερομόνης σε όλες τις πιθανές διαμέτρους κάθε αγωγού λαμβάνει χώρα με το πέρας της επανάληψης, όταν δηλαδή θα έχουν κατασκευάσει λύση όλα τα μυρμήγκια. Αυτή γίνεται με τη βοήθεια της παραμέτρου  $\rho$ , που ονομάζεται παράγοντας εξάτμισης ή επιμονής φερομόνης (pheromone persistence ή evaporation), σύμφωνα με τη σχέση (Dorigo et al., 1996):

$$\tau_{i,j}(t+1) = \rho \cdot \tau_{i,j}(t) \quad (5)$$

όπου:  $\tau_{i,j}(t+1)$  είναι η νέα τιμή φερομόνης μετά την εφαρμογή της εξάτμισης και  $\tau_{i,j}(t)$  είναι η τιμή φερομόνης πριν την εξάτμιση.

Η παράμετρος  $\rho$  παίρνει τιμές  $0 \leq \rho \leq 1$ . Η εξάτμιση δίνει τη δυνατότητα στην αποικία να ξεχάσει τις κακές ή λιγότερο καλές λύσεις και αυξάνει την πιθανότητα να επιλέγονται οι καλύτερες λύσεις, μιας και σε αυτές αργότερα θα προστίθεται φερομόνη. Για τιμές του  $\rho \rightarrow 1$ , μικρή ποσότητα φερομόνης εξατμίζεται και η ταχύτητα σύγκλισης είναι μικρότερη, με πολύ καλή όμως εξερεύνηση του εύρους των λύσεων. Για τιμές  $\rho \rightarrow 0$ , εξατμίζεται μεγάλη ποσότητα με αποτέλεσμα γρηγορότερη σύγκλιση, πολλές φορές όμως σε μη βέλτιστες λύσεις (Zecchin et al., 2005).

Η προσθήκη φερομόνης στον αρχικό αλγόριθμο ACO, τον AS, γίνεται στις διαμέτρους της λύσης καθενός μυρμηγκιού που συμμετέχει στη διαδικασία και υπολογίζεται από τη σχέση (Dorigo et al., 1996; Maier et al., 2003):

$$\Delta\tau_{i,j}^k = \begin{cases} \frac{R}{f(\phi)^k}, & \text{αν η πιθανή διάμετρος ανήκει στη λύση του μυρμηγκιού } k \\ 0, & \text{σε κάθε άλλη περίπτωση} \end{cases} \quad (6)$$

όπου:  $R$  είναι ο παράγοντας προσθήκης φερομόνης και έχει σταθερή τιμή και  $f(\phi)^k$  είναι το κόστος της λύσης του μυρμηγκιού  $k$  σε €.

Όσο καλύτερη είναι η λύση που υπολογίζεται, τόσο περισσότερη φερομόνη αφήνεται από το μυρμήγκι που την κατασκεύασε. Η τιμή του παράγοντα  $R$  δεν είναι ιδιαίτερα σημαντική από μόνη της, καθώς σύμφωνα με τους Zecchin et al. (2005) σχετίζεται με την αρχική τιμή φερομόνης,  $\tau_0$ , με τη σχέση:

$$\tau_0 = R \sqrt{n \times NO_{avg}} / f(\phi)^{n^*} \quad (7)$$

όπου:  $R/f(\phi)^{n^*}$  είναι η αλλαγή στη συγκέντρωση φερομόνης,  $f(\phi)^{n^*}$  είναι το κόστος μίας σχεδόν βέλτιστης λύσης σε €,  $n$  είναι ο αριθμός των αγωγών και  $NO_{avg}$  είναι ο μέσος αριθμός πιθανών επιλογών για κάθε αγωγό.

Σύμφωνα με τους Zecchin et al. (2005), ο αριθμός των μυρμηγκιών που συμμετέχουν στην κατασκευή της λύσης μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$m = n \sqrt{NO_{avg}} \quad (8)$$

Για την επίλυση του προβλήματος ενός ακτινωτού αρδευτικού δικτύου με τον αλγόριθμο ACO, έγινε ανάπτυξη κώδικα σε γλώσσα προγραμματισμού Fortran. Τα δεδομένα που απαιτούνται είναι: οι παροχές των αγωγών, οι απαιτούμενες πιέσεις στους κόμβους, οι διαθέσιμες διαμέτροι του εμπορίου και το κόστος τους ανά μέτρο μήκους, η μέγιστη και η ελάχιστη ταχύτητα ροής στους αγωγούς, τα μήκη των αγωγών και τα υψόμετρα των κόμβων. Οι παροχές των αγωγών, όταν δεν είναι γνωστές, υπολογίζονται από το πρόγραμμα με τον πρώτο τύπο του Clemént. Με τις παροχές γνωστές, υπολογίζεται η ταχύτητα ροής για κάθε πιθανή διάμετρο σε κάθε αγωγό και οι αντίστοιχες απώλειες φορτίου με τη σχέση των Hazen-Williams (Kanakakis et al., 2014).

Το πρώτο βήμα του αλγορίθμου είναι ο υπολογισμός και η εισαγωγή μίας αρχικής τιμής φερομόνης  $\tau_0$  σε όλες τις πιθανές διαμέτρους κάθε αγωγού και ο υπολογισμός του αριθμού των μυρμηγκιών που θα αποτελέσουν την αποικία με τις σχέσεις (7) και (8) αντίστοιχα. Στη συνέχεια υπολογίζεται η πιθανότητα  $p_{i,j}^k$  να επιλεγεί κάθε μία από τις πιθανές διαμέτρους με τη σχέση (3). Στην εκκίνηση της διαδικασίας αυτή η πιθανότητα είναι ίδια για όλες τις πιθανές επιλογές. Σύμφωνα με αυτές τις πιθανότητες, τα μυρμήγκια επιλέγουν τυχαία διαμέτρους για κάθε αγωγό κατασκευάζοντας το καθένα μία λύση.

Μόλις ένα μυρμήγκι επιλέξει διαμέτρους, γίνεται υδραυλικός έλεγχος για να διαπιστωθεί εάν ικανοποιούνται οι περιορισμοί για την υδραυλική λειτουργία του δικτύου. Στη συνέχεια υπολογίζεται το συνολικό κόστος του δικτύου. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για το σύνολο των  $m$  μυρμηγκιών της επανάληψης και αποθηκεύεται η καλύτερη λύση που βρέθηκε στη συγκεκριμένη επανάληψη.

Ακολουθεί η ενημέρωση του ίχνους φερομόνης, που θα επηρεάσει τις επιλογές της επόμενης επανάληψης, στις πιθανές διαμέτρους των αγωγών του δικτύου, με τις διαδικασίες της εξάτμισης και της προσθήκης φερομόνης. Στον αλγόριθμο που αναπτύχθηκε για την παρούσα εργασία, μόνο το μυρμήγκι που κατασκεύασε την καλύτερη λύση της επανάληψης συμμετέχει στη διαδικασία της προσθήκης φερομόνης. Έτσι, η νέα τιμή φερομόνης στις διαμέτρους κάθε αγωγού του δικτύου είναι:

$$\tau_{i,j}(t+1) = \rho \cdot \tau_{i,j}(t) + \Delta \tau_{i,j}^k \quad (9)$$

Με το πέρας των επαναλήψεων ξεκινούν οι διαδικασίες υπολογισμού και εξαγωγής της τελικής λύσης. Σε κάθε αγωγό επιλέγεται η πιθανή διάμετρος στην οποία τα μυρμήγκια έχουν αφήσει τη μεγαλύτερη ποσότητα φερομόνης μετά το πέρας όλων των επαναλήψεων. Με αυτές τις διαμέτρους υπολογίζεται το τελικό κόστος του δικτύου. Μετά την ολοκλήρωση

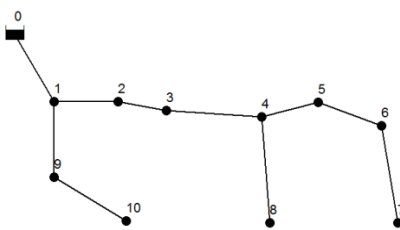
του αλγορίθμου ACO, εκτελείται μία διαδικασία τοπικής βελτίωσης της λύσης, η οποία προσπαθεί να εκμεταλλευτεί τυχόν περίσσεια φορτίου στους κόμβους. Είναι ξεχωριστή και αυτόνομη διαδικασία και δεν σχετίζεται με τον αλγόριθμο. Η εφαρμογή της γίνεται ως εξής:

- Γίνεται έλεγχος των υπολειπόμενων φορτίων στα πέρατα.
- Στα πέρατα στα οποία υπάρχουν επαρκή υπολειπόμενα φορτία, επιλέγεται μία μικρότερη διάμετρος και μοιράζεται το μήκος του αγωγού ανάμεσα στις δύο διαμέτρους, έτσι ώστε το διαθέσιμο φορτίο να τείνει στο μηδέν.
- Εάν ο αλγόριθμος είχε ήδη επιλέξει στον αγωγό του πέρατος τη μικρότερη διαθέσιμη διάμετρο και υπάρχει υπολειπόμενο φορτίο, ελέγχεται ο αμέσως προηγούμενος μέχρις ότου βρεθεί ένας αγωγός που μπορεί να μειωθεί η διάμετρός του για να εκμεταλλευτεί το φορτίο.
- Επαναλαμβάνεται η διαδικασία επιλέγοντας μικρότερη διάμετρο στον πρώτο διαθέσιμο από τους μεγάλους αγωγούς της αρχικής λύσης, μέχρι να μηδενιστούν τα διαθέσιμα φορτία στα πέρατα.
- Επιλέγεται ο συνδυασμός διαμέτρων που έδωσε τη μεγαλύτερη βελτίωση στη λύση.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η βιβλιογραφική έρευνα έδειξε ότι ουσιαστικά έχει εγκαταλειφθεί ο διαχωρισμός των αγωγών σε δύο διαμέτρους. Στην παρούσα εργασία έγινε χρήση της παραπάνω διαδικασίας για λόγους σύγκρισης με τη μέθοδο του γραμμικού προγραμματισμού.

### 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Το δίκτυο στο οποίο έγινε εφαρμογή της μεθόδου βελτιστοποίησης με τον αλγόριθμο ACO βασίζεται σε ένα δίκτυο που παρουσίασε ο Τζιμόπουλος (1982) και είναι τροποποιημένο έτσι ώστε να γίνει λίγο πιο δύσκολη η επίλυσή του. Το φορτίο στην κεφαλή είναι 60 m, η ελάχιστη απαιτούμενη πίεση στα υδροστόμια είναι 35 m και η παροχή τους 6 l/s. Όλοι οι κόμβοι που ορίζουν το τέλος των αγωγών έχουν ένα υδροστόμιο. Επειδή το δίκτυο είναι μικρό, ως παροχή κάθε αγωγού ορίστηκε το άθροισμα των παροχών των κατάντη υδροστομίων που αυτός τροφοδοτεί. Το σχέδιο του δικτύου δίνεται στο Σχήμα 2.



Σχήμα 2. Αναπαράσταση του δικτύου εφαρμογής.

Για την εφαρμογή του αλγορίθμου είναι απαραίτητη η εκτίμηση των παραμέτρων των σχέσεων που εμπεριέχει, δηλαδή των  $\alpha$ ,  $\beta$  και  $\rho$ . Για αυτό τον σκοπό διενεργήθηκε μία ανάλυση ευαισθησίας. Σύμφωνα με την ανάλυση, οι βέλτιστες τιμές για τις παραπάνω παραμέτρους ήταν  $\alpha=0.8$ ,  $\beta=0$  και  $\rho=0.98$ . Επειδή το δίκτυο είναι μικρό και σχετικά εύκολο να επιλυθεί, η τιμή της παραμέτρου  $\beta$  είναι 0, καθώς δεν είναι απαραίτητη η χρήση του ευρετικού παράγοντα  $\eta_{i,j}$ . Ο αριθμός των μυρμηγκιών από τη σχέση (10) είναι  $m = 28$ . Από τη σχέση (7) για  $R = 10^6$ , η αρχική τιμή φερομόνης είναι  $\tau_0 = 90$ .

Η εκτέλεση του αλγορίθμου με τις παραπάνω παραμέτρους έδωσε το βέλτιστο κόστος των **96.916 €**. Σε σύνολο 100 εκτελέσεων η βέλτιστη τιμή βρέθηκε στις 99, με μέσο χρόνο εκτέλεσης μόλις 0.039 sec. Η σύγκλιση σε αυτό το κόστος επερχόταν στην επανάληψη 73 κατά μέσο όρο, με πρώτη εμφάνιση της βέλτιστης λύσης στην επανάληψη 23. Οι τελικές

διάμετροι που επιλέχτηκαν σε κάθε αγωγό και τα τελικά φορτία στους κόμβους δίνονται στον Πίνακα 1. Οι τελικές τιμές φερομόνης για κάθε πιθανή διάμετρο σε όλους τους αγωγούς παρουσιάζονται στον Πίνακα 2 και αφορούν μία τυχαία εκτέλεση με τις παραπάνω παραμέτρους και 150 επαναλήψεις.

Στη συνέχεια έγινε εφαρμογή της μεθόδου του γραμμικού προγραμματισμού που ήταν εκ των προτέρων γνωστό πως θα δώσει βέλτιστη λύση με συνδυασμό δύο διαμέτρων σε κάποιους αγωγούς. Η εφαρμογή έγινε με χρήση του λογισμικού Lingo. Επειδή η μέθοδος δίνει δεκαδικές τιμές στο αντίστοιχο μήκος των διπλών διαμέτρων, όπου αυτές επιλέγονται, η λύση πρέπει να διορθωθεί. Το βέλτιστο κόστος που υπολογίστηκε ήταν **94.409 €**. Μετατρέποντας τη λύση του γραμμικού προγραμματισμού σε λύση ενιαίων διαμέτρων, η κατάληξη είναι η ίδια λύση με αυτή που έδωσε ο αλγόριθμος ACO, **96.916 €**.

**Πίνακας 1.** Επιλεγμένες διαμέτροι του βέλτιστου δικτύου και υπολειπόμενα φορτία στους κόμβους με τη μέθοδο του αλγορίθμου ACO

Αγωγός	Διάμετρος (mm)	Κόμβος	Υπολειπόμενο φορτίο (m)
1	226.2	1	8.72
2	180.8	2	7.04
3	180.8	3	6.75
4	180.8	4	6.66
5	144.6	5	4.26
6	126.6	6	0.53
7	99.4	7	0.002
8	99.4	8	5.02
9	113	9	7.81
10	99.4	10	3.35

**Πίνακας 2.** Τιμές ποσότητας φερομόνης κάθε πιθανής διαμέτρου των αγωγών

Αγωγός	Διάμετροι εμπορίου (mm)							
	81.4	99.4	113	126.6	144.6	180.8	203.4	226.2
1	0	0	0	0	0	0	13.5	485.4
2	0	0	0	0	0	484	14.9	4.3
3	0	0	0	0	4.3	489.3	9.6	4.3
4	0	0	0	0	4.3	494.5	4.3	4.3
5	0	0	4.3	7.3	486.8	9.2	4.3	0
6	0	4.3	5.2	483.5	14.5	0	0	0
7	4.3	486	12.9	0	0	0	0	0
8	5.7	488.4	9.1	0	0	0	0	0
9	0	4.3	488.9	9.5	4.8	0	0	0
10	4.3	485.9	13	0	0	0	0	0

Η λύση του γραμμικού προγραμματισμού εκμεταλλεύεται την περίσσεια φορτίου, χρησιμοποιώντας δύο διαμέτρους σε κάποιους αγωγούς. Η χρήση της διαδικασίας τοπικής βελτίωσης στη λύση του αλγόριθμου ACO, όπως περιγράφηκε προηγούμενα, έχει ανάλογο αποτέλεσμα. Το κόστος που υπολογίστηκε ήταν ανεπαίσθητα μικρότερο από αυτό του γραμμικού προγραμματισμού, **94.406 €**, βελτιωμένο κατά 2.6% από την αρχική λύση.

Παρόλο που η βιβλιογραφία δεν προτείνει μεθόδους που δίνουν λύσεις με διαχωρισμό αγωγών σε δύο διαμέτρους, ο γραμμικός προγραμματισμός εξακολουθεί να είναι μία αρκετά ικανοποιητική μέθοδος βελτιστοποίησης κόστους σωληνωτών δικτύων άρδευσης. Έτσι,



για την αξιολόγηση της δυναμικής του αλγόριθμου ACO επιλέχτηκε ο γραμμικός προγραμματισμός για σύγκριση. Τα αποτελέσματα είναι πολύ ικανοποιητικά, δεδομένου του μεγέθους του δικτύου που βελτιστοποιήθηκε, το οποίο έχει πολύ περιορισμένο εύρος εφικτών λύσεων και δεν επιτρέπει μεγάλες διαφορές ανάμεσα στις μεθόδους.

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η μέθοδος βελτιστοποίησης με χρήση του ευρετικού αλγορίθμου αποικίας μυρμηγκιών δεν έχει τύχει εφαρμογής στα αρδευτικά υπό πίεση συλλογικά δίκτυα. Με την παρούσα εργασία παρουσιάζεται μία εφαρμογή της μεθόδου σε ένα μικρού μεγέθους δίκτυο. Η εφαρμογή έδειξε πως ο αλγόριθμος ACO παράγει λύσεις ισάξιες του γραμμικού προγραμματισμού, ο οποίος με τη σειρά του δίνει παρόμοιες λύσεις με τις υπόλοιπες κλασικές μεθόδους βελτιστοποίησης. Όταν οι αγωγοί είχαν ενιαία διάμετρο σε όλο το μήκος τους, η μέθοδος ACO έδωσε υψηλότερο κόστος από το γραμμικό προγραμματισμό, ο οποίος όμως χώρισε κάποιους αγωγούς σε δύο τμήματα διαφορετικών διαμέτρων. Υπολογίζοντας τη λύση του γραμμικού προγραμματισμού με ενιαία διάμετρο και τη λύση της μεθόδου ACO με διαχωρισμό αγωγών σε δύο διαμέτρους, διαπιστώσαμε ότι οι δύο μέθοδοι έδωσαν πανομοιότυπα αποτελέσματα.

#### Ευχαριστίες

Η εργασία αυτή πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο εκπόνησης διδακτορικής διατριβής, η οποία χρηματοδοτήθηκε από το Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών (Ι.Κ.Υ.).

#### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Afshar, M., 2006. *Improving the efficiency of ant algorithms using adaptive refinement: Application to storm water network design*. Advances in Water Resources, 29, 1371-1382.
- Bullnheimer, B., Hartl, R., and Strauss, C., 1999. *A new rank based version of the ant system - a computational study*. Central European Journal of Operation Research, 7, 25-38.
- De Corte A., and Sörensen K., 2013. *Optimisation of gravity-fed water distribution network design: A critical review*. European Journal of Operations Research, 228, 1-10.
- Dorigo, M., Maniezzo, V., and Coloni, A., 1996. *The Ant System: Optimization by a colony of cooperative agents*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, 26(1), 29-41.
- Gil, C., Baños, R., Ortega, J., Márquez, A., Fernández, A., and Montoya, M., 2011. *Ant Colony Optimization for water distribution network design: A comparative study*. Proceedings of the 11th International Work-Conference on Artificial Neural Networks, Part II, Malaga, Spain, 300-307.
- Κανάκης, Π., Παπαμιχαήλ, Δ., και Γεωργίου, Π., 2012. *Βελτιστοποίηση υπό πίεση αρδευτικών δικτύων με ασαφή γραμμικό προγραμματισμό και ανάλυση λειτουργίας τους*. Πρακτικά 2<sup>ου</sup> κοινού Συνεδρίου ΕΥΕ – ΕΕΔΥΠ, Πάτρα, 1162-1173.
- Kanakis, P., Papamichail, D., and Georgiou, P., 2014. *Performance analysis of on-demand pressurized irrigation network designed with linear and fuzzy linear programming*. Irrigation and Drainage, 63, 451-462.
- Karmeli, D., Gadish, Y. and Meyers, S., 1968. *Design of optimal water distribution networks*. Journal of Pipeline Division, 94, 1-10.
- Labye, Y., Olson, M.A., Galand, A. and Tsiourtis, N., 1988. *Design and optimization of irrigation distribution networks*. FAO Irrigation and Drainage Paper, No 44, 247 p.



- Liang, T., 1971. *Design conduit system by dynamic programming*. Journal of the Hydraulics Division, 97(3), 383-393.
- Maier H., Simpson A., Zecchin A., Foong W., Phang K., Seah H., and Tan C., 2003. *Ant Colony Optimization for design of water distribution systems*. Journal of Water Resources Planning and Management, 129(3), 200-209.
- Stützle T., and Hoos H., 2000. *Max-Min Ant System*. Future generation computer systems, 16, 889-914.
- Swamee, P., Kumar, V., and Khanna, P., 1973. *Optimization of dead end water distribution mains*. Journal of Environmental Engineering Division, 99(2), 123-134.
- Τζιμόπουλος Χ., 1982. *Γεωργική Υδραυλική – Συλλογικά αρδευτικά δίκτυα με καταιονισμό, Τόμος II*. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 263 σελ.
- Zecchin, A., Simpson, A., Maier, H., and Nixon, J., 2005. *Parametric study for an Ant Algorithm applied to water distribution system optimization*. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 9(2), 175-191.



## ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΡΔΕΥΤΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΤΗΣ ΠΕΔΙΑΔΑΣ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ VIKOR

Δ. Ζορμπά<sup>✉</sup>, Χ. Τζιμόπουλος, Χ. Ευαγγελίδης

Εργαστήριο Υδραυλικών Έργων και Διαχείρισης Περιβάλλοντος, Τμήμα Αγρονόμων και  
Τοπογράφων Μηχανικών, Α.Π.Θ., 54124, Θεσσαλονίκη, ✉ dzormpa@yahoo.gr

### Περίληψη

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. Η μέθοδος VIKOR αναπτύχθηκε από τον Opricovic στο Πολυτεχνείο του Βελιγραδίου το 1998 και βασίζεται στις  $L_1$  ( $S_i$ ) και  $L_\infty$  ( $R_i$ ) νόρμες, με εισαγωγή μιας ενδιάμεσης  $Q$  νόρμας ως γραμμικού συνδυασμού των  $S_i$  και  $R_i$ . 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 παρουσιάζει τα αποτελέσματα της έρευνας, που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της εκπόνησης διδακτορικής διατριβής, σε ένα σύνολο αρδευτικών δικτύων στην πεδιάδα Θεσσαλονίκης. Η επιλογή των αρδευτικών δικτύων έγινε με γνώμονα την μελλοντική ενσωμάτωση των αποτελεσμάτων στον οικονομικό χρονικό προγραμματισμό του ΓΟΕΒ Θεσσαλονίκης - Λαγκαδά.

*Λέξεις κλειδιά:* Πολυκριτηριακή ανάλυση, Μέθοδος VIKOR, Πεδιάδα Θεσσαλονίκης, Αρδευτικά δίκτυα

## MANAGEMENT OF IRRIGATION NETWORKS IN THE THESSALONIKI PLAIN USING THE THEORY OF THE VIKOR METHOD

D. Zormpa<sup>✉</sup>, C. Tzimopoulos, C. Evangelides

Laboratory of Hydraulics and Environmental Management, Faculty of Rural and Surveying  
Engineering, AUTH., 54124, Thessaloniki, ✉ dzormpa@yahoo.gr

### Abstract

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. The VIKOR method was developed by Opricovic at the University of Belgrade (Opricovic, 1998) and it is based on  $L_1$  and  $L_\infty$  norms, by inserting an intermediate  $Q$  norm as a linear combination of  $L_1$  and  $L_\infty$ . 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 presents the results of research conducted of doctoral thesis in a series of irrigation networks in the plain of Thessaloniki. The selection of irrigation networks was guided by the future use of research results in order to be incorporated in the Economic Plan of the General Land Reclamation Organisation (G.L.R.O.) of Thessaloniki – Lagadas.

*Key words:* Multi-criteria analysis, Vikor method, 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 αειφόρο 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; 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); Μαραβέα (1998); Καρασαββίδης (2003); Μπάκα (2006); Zarghami (2006); Schiau and Wu (2006); Καρασαββίδης κ.ά. (2009); Ζορμπά (2010); Τζιμόπουλος κ.α. (2011, 2013). Θα πρέπει να επισημανθεί ότι οι συγγραφείς του παρόντος άρθρου, έχουν πραγματοποιήσει δημοσίευση σχετικά με την μέθοδο VIKOR για την περιοχή μελέτης που όμως διαπραγματευόταν τα αρχικά δεδομένα και την θέσπιση κριτηρίων. Τα κριτήρια ήταν 8 στον αριθμό και το πλήθος των αρδευτικών δικτύων ήταν 16, Τζιμόπουλος κ.α. (2013).

## 2. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Η μέθοδος VIKOR (Opricovic, 2002, 2009; Opricovic and Zeng, 2004, 2006) θέτει προς επίλυση το εξής πρόβλημα:

$$mco\{(f_{ij}, (F_i), i = 1, \dots, m), j = 1, \dots, n\} \quad (1)$$

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  $F_i$  και n= ο αριθμός των κριτηρίων.

Με βάση τα παραπάνω καθορίζεται το μητρώο απόφασης:

$$\begin{matrix} & \begin{matrix} x_1 & x_2 & \dots & x_n \end{matrix} \\ \begin{matrix} F_1 \\ F_2 \\ \dots \\ F_m \end{matrix} & \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & \dots & f_{1n} \\ f_{21} & f_{22} & \dots & f_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ f_{m1} & f_{m2} & \dots & f_{mn} \end{bmatrix} \end{matrix}$$

και ο αλγόριθμος συμβιβαστικής κατάταξης VIKOR ακολουθεί τα εξής βήματα:

Προσδιορίζεται η καλύτερη και η χειρότερη τιμή από όλες τις τιμές που αντιστοιχούν στα κριτήρια  $x_j$ ,  $j=1,2,\dots,n$

$$f_j^* = \max_i f_{ij}, \quad f_j^- = \min_i f_{ij}, \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (2)$$

Οι ως 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.

Υπολογίζονται οι τιμές  $S_i = L_1$ ,

$$S_i = \sum_{j=1}^n w_j \frac{f_j^* - f_{ij}}{f_j^* - f_j^-} \quad (3)$$

και  $R_i = L_\infty, i=1,2,\dots,m$

$$R_i = \max_j [w_j \frac{f_j^* - f_{ij}}{f_j^* - f_j^-}], \quad (4)$$

όπου  $w_j$  είναι τα βάρη των κριτηρίων που εκφράζουν τις προτιμήσεις των ληπτών (DM) της απόφασης.

Υπολογίζονται οι τιμές  $Q_i, i=1,2,\dots,m$ , από τη σχέση:

$$Q_i = v \frac{S_i - S^*}{S^- - S^*} + (1-v) \frac{R_i - R^*}{R^- - S^*}, \quad (5)$$

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.

Κατατάσσονται οι εναλλακτικές δραστηριότητες, ταξινομώντας τις τιμές των  $S, R$ , και  $Q$  κατά φθίνουσα σειρά. Τα αποτελέσματα συνιστούν τρεις στήλες κατάταξης.

Προτείνεται ως συμβιβαστική λύση η εναλλακτική δραστηριότητα  $F_{(1)}$ , η οποία είναι η καλύτερη κατατασσόμενη ως προς το μέτρο της  $Q$  (ελάχιστο), εφόσον ικανοποιούνται οι ακόλουθες δύο συνθήκες:

Αποδεκτό όφελος,

$Q(F^{(2)} - F^{(1)}) \geq DQ$ , όπου  $F_{(2)}$  είναι η εναλλακτική με δεύτερη κατάταξη στη στήλη της  $Q$ , και  $DQ=1/(m-1)$ .

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:  $F_1$ = το αρδευτικό δίκτυο του Αγ. Αθανασίου,  $F_2$ = το αρδευτικό δίκτυο της Ακρολίμνης,  $F_3$ =το αρδευτικό δίκτυο της Βραχιάς,  $F_4$ = το αρδευτικό δίκτυο του Βρυσακίου,  $F_5$ = το αρδευτικό δίκτυο του Ζερβοχωρίου,  $F_6$ = το αρδευτικό δίκτυο του Κλειδίου,  $F_7$ = το αρδευτικό δίκτυο της Κορυφής,  $F_8$ = το αρδευτικό δίκτυο των Μαλγάρων,  $F_9$ = το αρδευτικό δίκτυο του Νησιού (Α'),



$F_{10}$ = το αρδευτικό δίκτυο της Ξεχασμένης,  $F_{11}$ = το αρδευτικό δίκτυο της Πρασινάδας,  $F_{12}$ = το αρδευτικό δίκτυο του Σταυρού,  $F_{13}$ = το αρδευτικό δίκτυο των Τρικάλων,  $F_{14}$ = το αρδευτικό δίκτυο της Χαλάστρας,  $F_{15}$ = το αρδευτικό δίκτυο της Χαλκηδόνας και  $F_{16}$ = 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 Σχοινιά).

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:  $C_1$  = ο όγκος του αρδευτικού νερού που παροχετεύεται από τον Γ.Ο.Ε.Β. στην καλλιεργητική περίοδο ανά στρέμμα,  $C_2$  = η μέση παραγωγικότητα ανά στρέμμα με βάση τις καλλιέργειες,  $C_3$  = το παραγωγικό κόστος των καλλιεργειών ανά στρέμμα,  $C_4$  = οι δαπάνες των εκτελεσθέντων έργων συντήρησης και αποκατάστασης των αρδευτικών δικτύων ανά στρέμμα,  $C_5$  = η μηχανική σύσταση του κάθε αρδευτικού δικτύου, η οποία επηρεάζει την ικανότητα του να συγκρατεί νερό και θρεπτικά στοιχεία. Επιπρόσθετα, δίνει πληροφορίες για την κατεργασία των εδαφών, καθώς και για πιθανά προβλήματα άρδευσης και λίπανσης και το τελευταίο κριτήριο είναι το  $C_6$  = η δυνατότητα διάθεσης των παραγόμενων προϊόντων δηλαδή η φυσική διακίνηση των προϊόντων, από την παραγωγή τους, μέχρι τον τελικό καταναλωτή. Θα πρέπει να επισημανθεί ότι τα πρωτογενή δεδομένα, που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση των κριτηρίων, είναι από το έτος 1988 έως το έτος 2010.

Στην παρούσα έρευνα τα βάρη αξιολογήθηκαν με την διαδικασία προσδιορισμού της εντάσεως του ενδιαφέροντος - θεωρία του Saaty (1980) (Α.Η.Ρ.). Ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία αδιαστατοποίησης και υπολογισμού των ιδιοδιανυσμάτων τόσο για τις εναλλακτικές δραστηριότητες όσο και για τα βάρη ( $w_j$ ) και παρουσιάζεται στον Πίνακα 1. Ο χείριστος βαθμός είναι το 1 ενώ ο μέγιστος το 9. Στην περίπτωση που το εξεταζόμενο κριτήριο εμπεριέχει οικονομική διάσταση τότε η παραπάνω κλίμακα μπορεί να εφαρμοστεί με αντίστροφη έννοια. 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 Α.Η.Ρ. (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

Το σύμβολο  $I$  αποτελεί το σύνολο των διαφορετικών εναλλακτικών δραστηριοτήτων, ενώ το σύμβολο  $J$  είναι το σύνολο των διαφορετικών κριτηρίων. Ο  $F(I,J)$  είναι ο πίνακας του οποίου τα στοιχεία δείχνουν την αξία των διαφορετικών εναλλακτικών δραστηριοτήτων,

για τα διαφορετικά κριτήρια. Δείχνει δηλαδή την «βαθμολογία» ή την αξιολόγηση της κάθε εναλλακτικής δραστηριότητας ως προς τα διάφορα κριτήρια.

Μετά την δημιουργία του μητρώου απόφασης, ακολουθεί η αδιαστατοποίηση του κάθε κριτηρίου. Ουσιαστικά για κάθε κριτήριο δημιουργείται ένας πίνακας, όπου συγκρίνονται ανά ζεύγη οι εναλλακτικές δραστηριότητες (αρδευτικά δίκτυα), ως προς τη σπουδαιότητα τους (ενδιαφέρον). Συνεπάγεται λοιπόν ότι για τα διαγωνικά στοιχεία του εκάστοτε κριτηρίου θα ισχύει ότι είναι ίσα με το ένα. Οπότε το μητρώο που δημιουργείται είναι ένα συμμετρικοαντίστροφο μητρώο. Μετά την δημιουργία του παραπάνω μητρώου υπολογίζεται το ιδιοδιάνυσμα του κάθε κριτηρίου. Ακολουθώντας την παραπάνω διαδικασία δημιουργείται το αδιάστατο μητρώο απόφασης για τα υπόλοιπα κριτήρια.

Στον Πίνακα 2 παρουσιάζεται το αδιάστατο μητρώο απόφασης για την περιοχή μελέτης σε μορφή ιδιοδιανυσμάτων. Θα πρέπει να επισημανθεί ότι στα κριτήρια  $C_1$ ,  $C_3$ ,  $C_4$  και  $C_6$ , ισχύει η αντίστροφη κλίμακα αξιολόγησης της μεθόδου A.H.P., ενώ στον Πίνακα 3 παρουσιάζονται τα ιδιοδιανύσματα των βαρών. 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.

**Πίνακας 2.** Μητρώο απόφασης

	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$
$F_1$	0.0106	0.0276	0.0494	0.1916	0.1564	0.1495
$F_2$	0.0646	0.1096	0.0096	0.0165	0.0220	0.0098
$F_3$	0.0140	0.0202	0.0709	0.1247	0.0909	0.0718
$F_4$	0.0375	0.0903	0.0355	0.0537	0.0377	0.0308
$F_5$	0.1768	0.1528	0.0139	0.0144	0.0195	0.0086
$F_6$	0.0186	0.0093	0.0273	0.0488	0.0335	0.1223
$F_7$	0.0910	0.0382	0.1137	0.0452	0.0810	0.0361
$F_8$	0.0125	0.0130	0.0317	0.1072	0.1260	0.1010
$F_9$	0.0467	0.0653	0.0903	0.0414	0.0172	0.0261
$F_{10}$	0.0300	0.1259	0.0121	0.0383	0.0293	0.0172
$F_{11}$	0.1051	0.0461	0.0603	0.0353	0.0711	0.0534
$F_{12}$	0.0530	0.1957	0.0176	0.0325	0.0151	0.0797
$F_{13}$	0.1340	0.0112	0.1823	0.0297	0.0460	0.0454
$F_{14}$	0.0083	0.0241	0.0241	0.1393	0.1159	0.1301
$F_{15}$	0.0248	0.0170	0.1318	0.0203	0.0957	0.0939
$F_{16}$	0.1727	0.0538	0.1294	0.0612	0.0427	0.0243

**Πίνακας 3.** Ιδιοδιανύσματα βαρών  $w_j$

$W_1$	$W_2$	$W_3$	$W_4$	$W_5$	$W_6$
0.39	0.17	0.22	0.07	0.05	0.11

Για τον υπολογισμό του βέλτιστου αρδευτικού δικτύου, της μεθόδου VIKOR (Opricovic, 1998), χρησιμοποιήθηκε σαν βάση ένας αλγόριθμος (Τζιμόπουλος και Παπαδόπουλος, 2013) που λειτουργεί σε περιβάλλον Visual Fortran. Θα πρέπει να επισημανθεί ότι ο παραπάνω αλγόριθμος, έχει χρησιμοποιηθεί και σε παλαιότερες εφαρμογές με αξιόπιστα

αποτελέσματα. Στον Πίνακα 4 παρουσιάζεται η απόσταση των εναλλακτικών δραστηριοτήτων από το ιδεατό αρδευτικό δίκτυο για τις παραμέτρους  $p = 1$  και  $p = \infty$ . Ο προσδιορισμός της τιμής  $p=\infty$  υπολογίζεται στον αλγόριθμο, θέτοντας  $p=K$  (όπου  $K=$  μια μεγάλη τιμή) έτσι ώστε να ισχύει:  $\lim_{p \rightarrow K} (L_p) = L_\infty$ . Στην παρούσα έρευνα το  $p$  τίθεται ίσο με την τιμή 25 ( $L_{25} \rightarrow L_\infty$ ).

**Πίνακας 4.** Ιεράρχηση με την χρήση της μεθόδου VIKOR

	S	R	Q
F <sub>1</sub>	0,707	0,385	0,829
F <sub>2</sub>	0,784	0,260	0,673
F <sub>3</sub>	0,789	0,377	0,903
F <sub>4</sub>	0,795	0,322	0,805
F <sub>5</sub>	0,482	0,215	0,257
F <sub>6</sub>	0,855	0,366	0,954
F <sub>7</sub>	0,603	0,199	0,358
F <sub>8</sub>	0,821	0,380	0,944
F <sub>9</sub>	0,742	0,301	0,707
F <sub>10</sub>	0,829	0,340	0,876
F <sub>11</sub>	0,625	0,166	0,319
F <sub>12</sub>	0,664	0,287	0,593
F <sub>13</sub>	0,452	0,168	0,135
F <sub>14</sub>	0,798	0,390	0,938
F <sub>15</sub>	0,712	0,352	0,771
F <sub>16</sub>	0,396	0,129	0,000

Σύμφωνα με τον Πίνακα 4 όπου δείχνει την κατάταξη κατά VIKOR η σειρά κατάταξης έχει ως εξής:

$$F_{16} \succ F_{13} \succ F_5 \succ F_{11} \succ F_7 \succ F_{12} \succ F_2 \succ F_9 \succ F_{15} \succ F_4 \succ F_1 \succ F_{10} \succ F_3 \succ F_{14} \succ F_8 \succ F_6.$$

Οι δύο συνθήκες της μεθόδου, αποδεκτό όφελος και αποδεκτή ευστάθεια στη λήψη απόφασης είναι αληθείς και πληρούν τις προϋποθέσεις επειδή

$$Q(F^{(2)} - F^{(1)}) \geq DQ \Rightarrow (0,276-0) > 1/(16-1)=0.067$$

και επιπρόσθετα σύμφωνα με τη δεύτερη συνθήκη οι κατατάξεις των S, R συμπίπτουν με την κατάταξη της Q.

Το βέλτιστο αρδευτικό δίκτυο, είναι το ενοποιημένο δίκτυο Π.Λ.Γ. (εναλλακτική δραστηριότητα 16), έπεται των Τρικάλων (εναλλακτική δραστηριότητα 13), ενώ τα χειρότερα όλων είναι της Χαλάστρας (εναλλακτική δραστηριότητα 14), των Μαλγάρων (εναλλακτική δραστηριότητα 8), και του Κλειδίου (εναλλακτική δραστηριότητα 6) με πολύ μικρή διαφορά βαθμών αξιολόγησης. Σε αυτή την αξιολόγηση τα κριτήρια που κυριαρχούν στα παραπάνω αποτελέσματα είναι το αρδευτικό νερό που παροχετεύεται από τον ΓΟΕΒ Θεσσαλονίκης-Λαγκαδά ( $w_1$ ) και η παραγωγικότητα των καλλιεργειών ( $w_2$ ) και οι πραγματικές δαπάνες κάθε καλλιέργειας ( $w_3$ ). Τα τρία αυτά κριτήρια αποτελούν το 78% του

συνολικού αθροίσματος των βαρών, ενώ μόνο το βάρος του κριτηρίου  $w_1$  αποτελεί το 39% του συνόλου.

Έτσι τα αποτελέσματα του προγράμματος ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα, και η άποψη αυτή είναι δομημένη, επειδή μόνο στο αρδευτικό δίκτυο Π.Λ.Γ. εφαρμόζεται άρδευση με καταιονισμό, μικροάρδευση και άρδευση με σταγόνα, οι οποίες είναι πολύ καλύτερες ως προς τα ανοικτά αρδευτικά δίκτυα σε σχέση με την κατανάλωση νερού και τις απώλειες. Επιπρόσθετα, παρόλο που το ενοποιημένο αρδευτικό δίκτυο Π.Λ.Γ. περιέχει το μεγαλύτερο αριθμό αντλιοστασίων σε σχέση με την υπόλοιπη πεδιάδα, εντούτοις τα αντλιοστάσια αυτά έχουν μικρό κόστος συντήρησης, επειδή κατασκευάστηκαν μεταγενέστερα από τα αντλιοστάσια του θαλάσσιου μετώπου, δηλαδή του Κλειδίου, Μαλγάρων και της Χαλάστρας, αλλά και ο κύκλος εργασιών τους είναι πολύ μικρός.

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Είναι σημαντικό να επισημανθεί πως, τα ανοικτά αρδευτικά δίκτυα που δημιουργήθηκαν, κατά την δεκαετία του '60 και '70, ήταν πρωτοποριακής λειτουργίας για την εποχή που κατασκευάστηκαν, όμως με την πάροδο του χρόνου, την ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας, της αυτοματοποίησης και της επιστήμης της υδραυλικής θεωρούνται πλέον ξεπερασμένα, και οι δαπάνες συντήρησης είναι δυσβάστακτες για τους ΤΟΕΒ.

Η εφαρμογή του αλγόριθμου της μεθόδου VIKOR έχει ως στόχο, την επιλογή του βέλτιστου αρδευτικού δικτύου, μέσα από ένα σύνολο εναλλακτικών δραστηριοτήτων / σεναρίων, και σε σύγκριση με ένα πλήθος κριτηρίων. Τα κριτήρια αυτά μπορεί να είναι και αλληλοσυγκρουόμενα. Σαν αποτέλεσμα της παραπάνω διαδικασίας είναι ο εντοπισμός εκείνου του αρδευτικού δικτύου που έχει την μικρότερη απόσταση από το θεωρητικό ιδανικό αρδευτικό δίκτυο, δηλαδή έχει την καλύτερη αξιολόγηση ως προς τα κριτήρια που έχουν τεθεί.

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων του προγράμματος, καταρχήν αποδεικνύει την σημασία της παραμέτρου  $\rho$  στην τελική κατάταξη των λύσεων. Ειδικά στη μέθοδο VIKOR η λύση αποτελεί ένα σταθμισμένο γραμμικό συνδυασμό της κανονικοποιημένης  $L_1$  νόρμας και της κανονικοποιημένης  $L_\infty$  νόρμας.

Το βέλτιστο αρδευτικό δίκτυο ιεραρχικά προέκυψε το Π.Λ.Γ., δηλαδή τα αρδευτικά δίκτυα της πρώην Λίμνης Γιαννιτσών ( $Q=0$ ) και μάλιστα με αρκετή διαφορά από το δεύτερο δίκτυο των Τρικάλων ( $Q=0.135$ ). Το συμπέρασμα αυτό ήταν και αναμενόμενο δεδομένου ότι το Π.Λ.Γ. αποτελείται από δίκτυα υπό πίεση με κλειστούς αγωγούς και είναι μεταγενέστερο χρονικά όλων των άλλων δικτύων, τα οποία και θεωρούνται παλαιά και συγχρόνως είναι δίκτυα βαρύτητας με ανοικτούς αγωγούς και επομένως παρουσιάζουν μεγάλες απώλειες αρδευτικού νερού επιπρόσθετα λόγω της παλαιότητας έχουν μεγάλες δαπάνες συντήρησης.

#### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Duckstein, L. and Opricovic, S., 1980. *Multiobjective optimization in river basin development*. Water Resources Research, 16(1): 14-20.
- Zarghaami, M., 2006. *Integrated water resources management in Polrud irrigation system*. Water Resources Management, 20(2): 215-225.
- Zeleny, M., 1982. *Multiple Criteria Decision Making*. McGraw-Hill, New York.
- Ζορμπά, Δ., 2010. Πολυκριτηριακή ανάλυση με χρήση συμβιβαστικού προγραμματισμού. Εφαρμογή σε αρδευτικά δίκτυα της πεδιάδας Θεσσαλονίκης. Μεταπτυχιακή Διατριβή, ΤΑΤΜ, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 64-71.

- Καρασαββίδης, Π., 2003. *Εφαρμογή της Πολυκριτηριακής Ανάλυσης (Συμβιβαστικός Προγραμματισμός) στη Διαχείριση Υδατικών Πόρων στην Περιοχή Λιβαδείου Λαρίσης. Επιλογή Βέλτιστης Θέσης Φράγματος*. Μεταπτυχιακή Διατριβή, ΤΑΤΜ, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 89-91.
- Καρασαββίδης, Π., Τζιμόπουλος, Χ. και Ευαγγελίδης, Χ., 2009. *Εφαρμογή της πολυκριτηριακής ανάλυσης (συμβιβαστικός προγραμματισμός) στη διαχείριση υδατικών πόρων στην περιοχή Λιβαδίου Λάρισας*. Πρακτικά 6<sup>ου</sup> Πανελλήνιου Συνεδρίου Γεωργικής Μηχανικής, Ε.Γ.Μ.Ε.. Θεσσαλονίκη, 123-130.
- Κωνσταντινίδης, Κ., 1989. *Τα εγγειοβελτιωτικά έργα στην πεδιάδα Θεσσαλονίκης*. Εκδόσεις ΓΕΩΤ.Ε.Ε, Θεσσαλονίκη, 133-134.
- Μαραβέα, Ε., 1998. *Μέθοδος πολυκριτηριακής ανάλυσης στη διαχείριση των υδατικών πόρων*. Διπλωματικά εργασία, Ε.Μ.Π., 97.
- Μπάκα, Μ., 2006. *Διαχείριση Υδατικών Πόρων με Μεθόδους Πολυκριτηριακής Ανάλυσης (Συμβιβαστικός Προγραμματισμός) και Εφαρμογή στην Υδρολογική Λεκάνη του Ποταμού Νέστου*. Μεταπτυχιακή Διατριβή, ΤΑΤΜ, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 115-117.
- Μπαλιώτη, Β., 2009. *Διαχείριση αρδευτικών δικτύων με τη βοήθεια του γραμμικού προγραμματισμού. Εφαρμογή στο Αρδευτικό δίκτυο Γέφυρας*. Μεταπτυχιακή διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 36 σελ.
- 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., 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. and Tzeng, GH., 2006. *Extended VIKOR method in comparison with outranking methods*. Eur J Oper Res 178(2): 514-529.
- Saaty, T.L., 1980. *The Analytic Hierarchy Process*. Mc Graw-Hill, New York.
- 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.
- Τζιμόπουλος, Χ., Ζορμπά, Δ. και Ευαγγελίδης, Χ., 2011. *Πολυκριτηριακή ανάλυση με χρήση συμβιβαστικού προγραμματισμού: εφαρμογή σε αρδευτικά δίκτυα της πεδιάδας Θεσσαλονίκης*. Πρακτικά 7<sup>ου</sup> Πανελλήνιου Συνεδρίου Γεωργικής Μηχανικής, Ε.Γ.Μ.Ε.. Αθήνα.
- Τζιμόπουλος, Χ., Ζορμπά, Δ. και Ευαγγελίδης, Χ., 2013. *Διαχείριση αρδευτικού δικτύου της πεδιάδας Θεσσαλονίκης με την χρήση της θεωρίας της μεθόδου VIKOR*. Πρακτικά 8<sup>ου</sup> Πανελλήνιου Συνεδρίου Γεωργικής Μηχανικής, Ε.Γ.Μ.Ε.. Βόλος, 182-186.
- Τζιμόπουλος Χ. και Παπαδόπουλος Β., 2013. *Ασαφής λογική με εφαρμογή στις επιστήμες του μηχανικού*. Εκδόσεις, Ζήτη, 265-491.
- Yu, P.L., 1985. *Multiple-Criteria Decision Making, Concepts, Techniques, and Extension*. Plenum Press, Lawrence, Kansas, 388.



## Η ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΛΙΜΝΗΣ ΚΑΡΛΑΣ ΚΑΙ Η ΑΝΑΓΚΑΙΟΤΗΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΗΣ ΕΠΙΘΕΩΡΗΣΗΣ ΤΩΝ ΑΡΔΕΥΤΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

**Η. Χαλκίδης<sup>✉</sup>, Χ. Καρασαββίδης, Μ. Σακελλαρίου - Μακραντωνάκη**

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος,  
Νέα Ιωνία, 38446 Βόλος, ✉ ichalkidis@agr.uth.gr

### Περίληψη

Η περιοχή της λίμνης Κάρλας είναι μια ευαίσθητη περιβαλλοντικά περιοχή που τις τελευταίες δεκαετίες γνώρισε, τις εκτεταμένες πλημμύρες της τέως λίμνης Κάρλας, την αποξήρανση και καθίζηση από την υπεράντληση του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα έως την επανασύσταση αυτής σύμφωνα με τη συνθήκη RAMSAR. Τα νέα έργα λιμνοδεξαμενών και επανασύστασης της λίμνης Κάρλας έδωσαν νέα προοπτική στις γεωργικές εκμεταλλεύσεις, αυξάνοντας το κόστος του αρδευτικού νερού. Στο άρθρο αυτό, με βάση το πλαίσιο της Οδηγίας 2000/60 αναλύεται το κόστος κατασκευής και λειτουργίας των λιμνοδεξαμενών και το κόστος λειτουργίας του αρμόδιου Τ.Ο.Ε.Β. εκτιμώντας έτσι το συνολικό χρηματοοικονομικό κόστος του νερού άρδευσης. Το συνεχώς αυξανόμενο κόστος του νερού άρδευσης σε συνδυασμό με τις μειωμένες στρεμματικές αποδόσεις των καλλιεργειών της περιοχής, επιβάλλει ορθολογικότερη διαχείριση του νερού με νέες και πιο αποτελεσματικές μεθόδους, όπως η επιθεώρηση των αρδευτικών δικτύων, ατομικών και συλλογικών.

*Λέξεις κλειδιά:* Επιθεώρηση αρδευτικών δικτύων, Ανασύσταση, Κόστος αρδευτικού νερού, Οδηγία 2000/60

## THE FINANCIAL COST EVOLUTION OF IRRIGATION WATER IN THE AREA OF KARLA LAKE AND THE APPLICATION OF IRRIGATION AUDITING

**I. Chalkidis<sup>✉</sup>, C. Karasavvidis, M. Sakellariou - Makrantonaki**

University of Thessaly, Department of Agriculture Crop Production and Rural Environment,  
Nea Ionia, 38446 Volos, ✉ ichalkidis@agr.uth.gr

### Abstract

The area of Lake Karla is a sensitive environmental area and in recent decades has experienced the widespread flooding of former Lake Karla, drying and sedimentation from overpumping of groundwater to reconstitute this under the RAMSAR convention. The construction of water reservoirs and the reconstitution of Lake Karla gave new perspectives on farming activities, but increasing the cost of irrigation water. In this article under the framework of directive 2000/60 analyzed the construction and operating costs of water reservoirs and the operating cost of the competent Local Land Reclamation Agency (LLRA) when evaluating the total financial cost of irrigation water. The continuously increasing cost of irrigation water in conjunction with the reduced crop yields, require rational water management with new and more efficient methods, such as irrigation auditing.

*Key words:* Irrigation auditing, Reconstitution, Irrigation water cost, Directive 2000/60

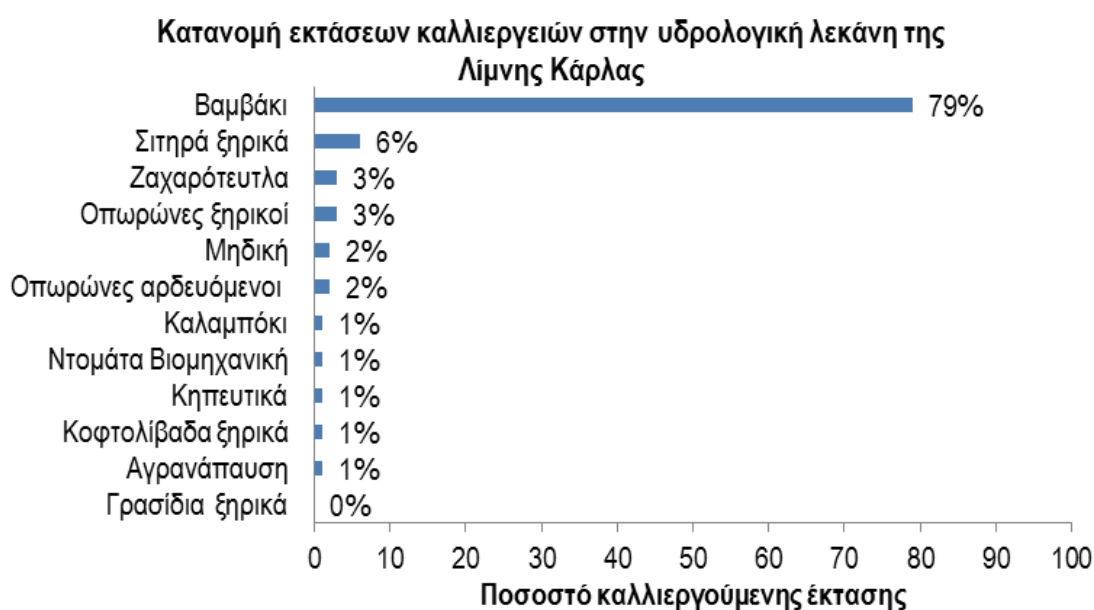
## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η λεκάνη της Κάρλας βρίσκεται στο νότιο ανατολικό άκρο της πεδιάδας της Λάρισας και παρουσιάζει μορφή κλειστής επιμήκους λεκάνης μήκους 35 km και πλάτους 9-15 km και έχει συνολική έκταση 1663 Km<sup>2</sup>. Η λεκάνη βρίσκεται μεταξύ του γεωγραφικού πλάτους 39°20'56" έως 39°45'15" N και γεωγραφικού μήκους 22°26'10" έως 23°0'27" E. Το μέγιστο βάθος της από 5,5 μέτρα που ήταν πριν το 1940 μειώθηκε στα 2 μέτρα το 1950 – 1955. Η μέση θερμοκρασία στην περιοχή είναι 16 – 17 °C και η μέση ετήσια σχετική υγρασία 62 – 72%. Όσον αφορά την ετήσια μέση βροχόπτωση αυτή είναι 500 – 700 mm ενώ οι βροχοπτώσεις είναι σπάνιες από τον Ιούνιο έως τον Αύγουστο (Sidiropoulos et al., 2013).

Το 1964 ολοκληρώθηκε η ολική αποξήρανση της λίμνης, παρόλο που προβλέπονταν η διατήρηση 64.700 στρεμμάτων τα οποία θα λειτουργούσαν ως ταμιευτήρας (Loukas et al., 2007).

Οι δυσμενείς περιβαλλοντικές συνθήκες που προκλήθηκαν από την αποξήρανση της λίμνης οδήγησαν το 1982 την Ελληνική κυβέρνηση να δημιουργήσει σχέδιο μερικής αποκατάστασης της λίμνης Κάρλας. Έτσι, εκπληρώνοντας το σχέδιο αποκατάστασης Ramsar και αργότερα το Natura 2000, το εθνικό πρόγραμμα για την αποκατάσταση της λίμνης Κάρλας, σκοπό είχε την ανασύσταση της λίμνης και την αποκατάσταση μέρους των λειτουργιών του υγροτόπου:

- ✓ Η άνοδος του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα και η αποκατάσταση του υδάτινου δυναμικού
- ✓ Ο περιορισμός των εξαντλητικών αντλήσεων των υπόγειων υδροφορέων με παροχή υδάτων για άρδευση
- ✓ Η βελτίωση της ποιότητας των υδάτων
- ✓ Προστασία του Παγασητικού κόλπου λόγω του αντιπλημμυρικού σκοπού του ταμιευτήρα και της βελτίωσης των υπερχειλισμένων υδάτων
- ✓ Υποχώρηση του μετώπου θαλασσινού νερού που έχει εισχωρήσει στο εδαφικό στρώμα του Παγασητικού και έχει επηρεάσει τους υδροφόρους ορίζοντες
- ✓ Μερική αποκατάσταση του μικροκλίματος της περιοχής
- ✓ Μερική αποκατάσταση της χλωρίδας και της πανίδας της περιοχής.



**Σχήμα 1.** Κατανομή των καλλιεργειών στην υδρολογική λεκάνη της Λίμνης Κάρλας.

Δυστυχώς τα αποτελέσματα της αποκατάστασης της Λίμνης Κάρλας ήταν κατώτερα των προσδοκιών με μειωμένη εισροή υδάτων στην λίμνη και με σοβαρά προβλήματα ποιότητας του νερού.

Όσον αφορά τις γεωργικές δραστηριότητες αυτές αντιστοιχούν σε 80% περίπου της συνολικής χρήσης νερού, ενώ γενικά οι αρδευτικές ανάγκες στο σύνολο της χώρας αυξάνονται. Η συνολική αύξηση των αρδευόμενων εκτάσεων κατά τη διάρκεια της τελευταίας 20ετίας εκτιμάται ότι ήταν της τάξης του 65% (Μαργαρίτη., 2012).

Το μεγαλύτερο τμήμα των καλλιεργούμενων εκτάσεων στην υδρολογική λεκάνη της Λίμνης Κάρλας καλύπτεται από την καλλιέργεια του βαμβακιού (ΕΛ.ΣΤΑΤ.). Αναλυτικότερα η κατανομή των καλλιεργειών της περιοχής δίνεται στο Σχήμα 1.

## **2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ**

### **2.1. Επιθεώρηση των Αρδεύσεων**

Η επιθεώρηση των συστημάτων άρδευσης εφαρμόζεται με σκοπό τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας της χρήσης του νερού. Αυτό επιτυγχάνεται με τον έλεγχο της ομοιομορφίας εφαρμογής, τον εντοπισμό προβλημάτων στο σύστημα άρδευσης (απωλειών, λειτουργία μειωμένης απόδοσης, κ.τ.λ.), τον έλεγχο του εφαρμοζόμενου προγράμματος άρδευσης, τον έλεγχο της ποιότητας του νερού άρδευσης και τέλος παρέχει συστάσεις βελτίωσης (Irrigation Association). Σύμφωνα με το Irrigation Management ETCP Project μετά την επιθεώρηση των αρδεύσεων, το νερό που θα χρησιμοποιείται θα είναι 40 – 60 % λιγότερο, απ' αυτό που χρησιμοποιούνταν πριν γίνει η επιθεώρηση των αρδεύσεων.

Πολλές εταιρείες και Πανεπιστήμια ανά τον κόσμο που ασχολούνται με την επιθεώρηση των αρδεύσεων, έχουν σχεδιάσει κάποιες κατευθυντήριες γραμμές. Ο σκοπός τους είναι να βοηθήσουν τους επιθεωρητές, στην αξιολόγηση των αρδευτικών δικτύων, καθώς επίσης και να διευκολύνουν τους επιτόπιους υπολογισμούς (Myriounis et al., 2015).

Πριν την επιθεώρηση των αρδευτικών δικτύων, γίνεται ένας έλεγχος της τοποθεσίας και έλεγχος του συστήματος άρδευσης για την τήρηση ή μη, όλων των απαιτήσεων της νομοθεσίας. Ακολουθεί η επιθεώρηση, η ανάλυση των δεδομένων και τέλος συντάσσεται τεχνική έκθεση, η οποία περιλαμβάνει προτάσεις για βελτίωση, οι οποίες ταξινομούνται με σειρά προτεραιότητας και κοστολογούνται (Myriounis et al., 2015).

Η επιθεώρηση των αρδεύσεων εφαρμόζεται σε χώρες όπως τον Καναδά, τις Η.Π.Α. και την Αυστραλία. Στην χώρα μας αλλά και στην Ευρώπη γενικότερα, βρίσκεται ακόμα σε πιλοτικό στάδιο στο πλαίσιο του ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος (IRMA – Irrigation-Management) και η εφαρμογή της είναι ακόμα περιορισμένη.

### **2.2. Τιμολόγηση Αρδευτικού Νερού**

Το νερό που χρησιμοποιείται για άρδευση, για την ορθολογική διαχείριση του θα έπρεπε να τιμολογείται κατά κύριο λόγο με βάση, την κατανάλωση, την ποιότητα και την μέθοδο άρδευσης. Δυστυχώς, σήμερα η τιμολόγηση του νερού άρδευσης γίνεται κυρίως ανταποδοτικά σύμφωνα με τα έξοδα συντήρησης και λειτουργίας των ΤΟΕΒ και ΓΟΕΒ λαμβάνοντας υπόψη κάποιες διαφοροποιήσεις σε υδροβόρες και μη καλλιέργειες. Συνεπώς δεν παρέχεται κίνητρο για εξοικονόμηση νερού, σε αντίθεση με την τιμολόγηση κατά όγκο του καταναλισκόμενου νερού ή την κατανάλωση ενέργειας για τις αντλήσεις.

Ένα μεγάλο ποσοστό των αρδεύσεων (40%), στην Ελλάδα, πραγματοποιείται μέσω των 414 Τοπικών Οργανισμών Εγγείων Βελτιώσεων (Τ.Ο.Ε.Β.), ενώ η κατασκευή των μεγάλων αρδευτικών έργων πραγματοποιείται μέσω των 10 Γενικών Οργανισμών Εγγείων Βελτιώσεων (Γ.Ο.Ε.Β.)

Οι Τοπικοί Οργανισμοί Εγγείων Βελτιώσεων είναι νομικά πρόσωπα ιδιωτικού δικαίου που διέπονται από το νόμο 3881/58 και των κατ' εξουσιοδότηση κανονιστικών πράξεων αυτού. Οι οικονομικοί πόροι των οργανισμών προέρχονται από τις ανταποδοτικές εισφορές των μελών τους, τα οποία είναι ιδιοκτήτες αγροτεμαχίων και όχι από κρατικές επιδοτήσεις. Ένα μεγάλο μέρος των εκτάσεων (37,5% το 1999) αρδεύεται από ιδιωτικές γεωτρήσεις. Το γεγονός αυτό καθιστά προβληματική την εκτίμηση του όγκου των ετήσιων απολήψεων από υπόγειους υδροφορείς. Το περιβαλλοντικό κόστος που προκαλείται από τη συχνή υπερεκμετάλλευση δεν εκτιμάται και οι μηχανισμοί χρέωσης των απολήψεων και επιβολής προστίμων για υπερκατανάλωση είναι από ανεπαρκείς έως ανύπαρκτοι.

### 2.3. Αρδευτικά έργα

Στην ευρύτερη περιοχή της πεδιάδας Κάρλας, δεν υπάρχουν συστηματικά αρδευτικά έργα και, τα υπάρχοντα αρδευτικά έργα είναι κάποια κινητά σωληνωτά δίκτυα, μικρά αντλιοστάσια κλπ. τα οποία χρησιμοποιούν κυρίως το νερό ιδιωτικών γεωτρήσεων. Επίσης, πρόσφατα (1988 - 2007) έχουν κατασκευασθεί 11 λιμνοδεξαμενές οι οποίες χρησιμοποιούνται για την άντληση νερού για την άρδευση της περιοχής οι οποίοι δίνονται στον Πίνακα 1.

**Πίνακας 1.** Τεχνικά χαρακτηριστικά λιμνοδεξαμενών πεδιάδας Κάρλας

Τεχνικά χαρακτηριστικά λιμνοδεξαμενών					
	Λιμνοδεξαμενή	Χωρητικότητα $10^6 \text{m}^3$	Επιφάνεια $10^3 \text{m}^2$	Κόστος Κατασκευής	Έτος Κατασκευής
1	Πλατύκαμπου Ι	0,50	250	112.000 €	1989 – 1992
2	Πλατύκαμπου ΙΙ	1,45	500	2.241.000 €	2002 – 2004
3	Γλαύκης	2,10	550	651.000 €	1993 – 1997
4	Ναμάτων Ι	1,80	570	205.000 €	1988 – 1989
5	Ναμάτων ΙΙ	1,10	413	580.000 €	2001 – 2002
6	Δήμητρας	1,00	400	385.000 €	1990 – 1997
7	Ελευθερίου Ι	0,90	300	165.000 €	1990 – 1991
8	Ελευθερίου ΙΙ	0,80	300	792.000 €	2003 – 2004
9	Καστρί	1,10	350	355.000 €	1992 – 1993
10	Καλαμάκι Ι	5,50	2000	390.000 €	1989
11	Καλαμάκι ΙΙ	2,50	750	898.000 €	1999 – 2000

(Lokkas et al, 2007)

Με βάση το πλαίσιο της Οδηγίας 2000/60 αναλύεται το κόστος κατασκευής και λειτουργίας των λιμνοδεξαμενών και το κόστος λειτουργίας του αρμόδιου Τ.Ο.Ε.Β. και εξετάζεται το εκτιμώμενο κόστος του αρδευτικού νερού με τη σημερινή τιμολογιακή πολιτική, εκτιμώντας το χρηματοοικονομικό κόστος (Οδηγία 2000/60/ΕΚ).

Σύμφωνα με το Άρθρο 9 «Ανάκτηση κόστους για υπηρεσίες ύδατος» της Οδηγίας 2000/60, τα κράτη μέλη λαμβάνουν υπόψη την αρχή της ανάκτησης του κόστους των υπηρεσιών ύδατος, συμπεριλαμβανομένου του κόστους για το περιβάλλον και τους φυσικούς πόρους, σύμφωνα με την αρχή «ο ρυπαίνων πληρώνει» (Lokkas et al, 2007).

## 2.4. Χρηματοοικονομικό κόστος

Για τον υπολογισμό του χρηματοοικονομικού κόστους έπρεπε να αναλυθεί το κόστος κατασκευής και λειτουργίας του έργου, λαμβάνοντας υπ' όψιν το συνολικό κόστος κατασκευής για κάθε λιμνοδεξαμενή το οποίο φαίνεται στον πίνακα 1. Έτσι έγινε αναγωγή της συνολικής επένδυσης σε ετήσια βάση, με τη βοήθεια του Ετήσιου Ισοδύναμου Κόστους (Ντάναση, 2012), σύμφωνα με τη σχέση (1):

$$E.I.K. = E_0 x \frac{\varepsilon x(1+\varepsilon)^V}{(1+\varepsilon)^V - 1} \quad (1)$$

όπου E.I.K. το ετήσιο κόστος επένδυσης,  $E_0$  το κόστος της επένδυσης,  $\varepsilon$  το επιτόκιο προεξόφλησης ανά περίοδο και  $V$  η εκτιμώμενη διάρκεια σε έτη.

## 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

### 3.1. Κόστος συντήρησης και λειτουργίας

Τα έξοδα συντήρησης και λειτουργίας ενός Τ.Ο.Ε.Β. περιλαμβάνουν επισκευές και συντηρήσεις μηχανημάτων όπως αντλίες, υδρόμετρα και Ηλεκτρομηχανολογικούς (Η/Μ) πίνακες, καύσιμα και λιπαντικά, αξία ηλεκτρικού ρεύματος, αμοιβές εργατών, εργοδοτικές εισφορές κτλ.

**Πίνακας 2.** Μέσος όρος λειτουργικών δαπανών Τ.Ο.Ε.Β. Πηνειού ετών 2002 – 2010

Διοικητικές Δαπάνες	15.436,35 €
Συντήρηση Έργων και Αντλιοστασίων	337.564,39 €
Συμ/ση Έργων και Αντλιοστασίων	58.478,96 €
Λειτουργία Έργων και Αντλιοστασίων	622.364,60 €
Λοιπές Δαπάνες	38.877,63 €
Εξόφληση Υποχρεώσεων	152.811,22 €
Σύνολο Δαπανών	1.225.530,18 €

(Πηγή: ΤΟΕΒ Πηνειού)

Με τα παραπάνω στοιχεία προκύπτει ότι τα έξοδα του Τ.Ο.Ε.Β. Πηνειού είναι 1.225.530,18 €. Η ποσότητα του αρδευτικού νερού που χρησιμοποιείται είναι 18.750.000m<sup>3</sup>, άρα προκύπτει ότι το κόστος ανά m<sup>3</sup> αρδευτικού νερού θα είναι 1.225.530,18/18.750.000=0,065 €/m<sup>3</sup>.

Η τιμή αυτή χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του συνολικού χρηματοοικονομικού κόστους. Το μεγαλύτερο σύνολο δαπανών παρατηρείται το έτος 2007 με 1.594.526 €, το μικρότερο σύνολο δαπανών το 2002 με 1.208.853 € και η ενδιάμεση τιμή στο εύρος 2002 – 2010 ήταν το 2003 με 1.364.876 €.

### 3.2. Συνολικό χρηματοοικονομικό κόστος

Εφαρμόζοντας την σχέση (1) στο υπό εξέταση έργο, το κόστος επένδυσης του οποίου είναι 6.774.000 € και η εκτιμώμενη διάρκεια «ζωής» 50 έτη και λαμβάνοντας επιτόκιο προεξόφλησης 3,5% προκύπτει ότι το Ετήσιο Ισοδύναμο Κόστος της επένδυσης είναι 288.800,75 €.

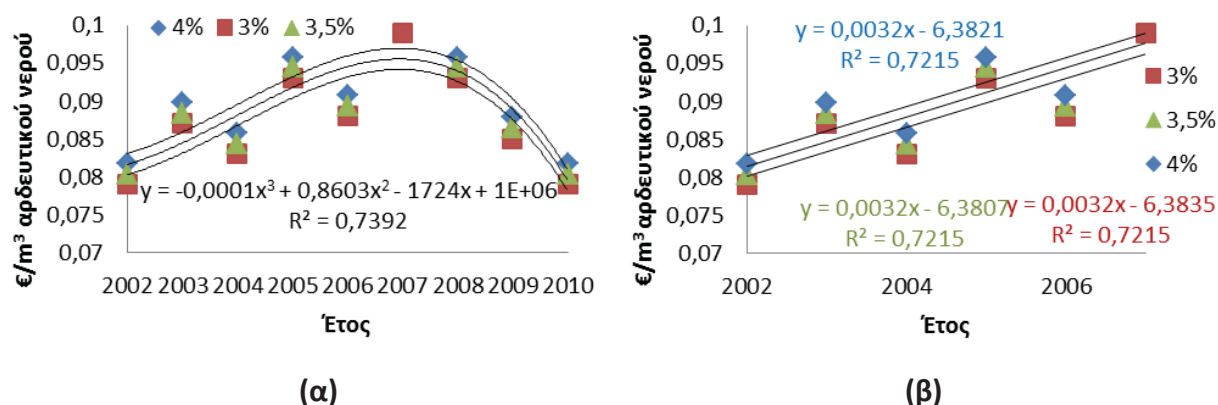
Δεδομένου ότι, το Έργο εκτιμάται ότι θα παρέχει **18.750.000 m<sup>3</sup>** αρδευτικού νερού σε ετήσια βάση, το ανηγμένο κόστος επένδυσης ανά m<sup>3</sup> είναι **0,0154 €**.

Συνεπώς, το συνολικό χρηματοοικονομικό κόστος (κόστος επένδυσης και λειτουργίας) ανά m<sup>3</sup> αρδευτικού νερού είναι **0,065 € + 0,0154 € = 0,0804 €**.



Για επιτόκιο προεξόφλησης 3%, προκύπτει ότι το συνολικό χρηματοοικονομικό κόστος ανά  $\text{m}^3$  αρδευτικού νερού, για το έτος με το μικρότερο σύνολο δαπανών είναι **0,064 € + 0,0154 € = 0,0794 €**. Ενώ, το συνολικό χρηματοοικονομικό κόστος ανά  $\text{m}^3$  αρδευτικού νερού, με επιτόκιο προεξόφλησης 4% και για το έτος με το μεγαλύτερο σύνολο δαπανών είναι **0,085 € + 0,0154 € = 0,1004 €**.

Η εξέλιξη του κόστους χρήσης του αρδευτικού νερού ανά  $\text{m}^3$  για τα έτη 2002 έως 2010 και για τρία διαφορετικά επιτόκια προεξόφλησης (3%, 3,5% και 4%), παρουσιάζεται αναλυτικότερα στο Σχήμα 2 (α). Όμως από το 2002 έως και το 2007 η εξέλιξη του κόστους χρήσης του αρδευτικού νερού παρουσιάζεται αυξητική και δίνεται στο Σχήμα 2 (β). Όμως, το 2007 προκειμένου να μειωθούν οι δαπάνες λειτουργίας, ο Τ.Ο.Ε.Β. μείωσε το προσωπικό που απασχολούσε κατά έξι άτομα (μείωση της τάξης του 20,6%). Στη συνέχεια λόγω κρίσης υπήρξαν συνεχείς περικοπές με αποτέλεσμα η πορεία να είναι πλέον πτωτική. Αυτή η μείωση του προσωπικού όμως δημιούργησε προβλήματα στον έλεγχο και τη συντήρηση των αρδευτικών δικτύων. Παρόλα αυτά το πρόβλημα της επιθεώρησης των αρδευτικών δικτύων θα μπορούσε να αντιμετωπιστεί από έναν εξωτερικό φορέα επιθεώρησης αρδευτικών δικτύων.



**Σχήμα 2.** Εξέλιξη του κόστους χρήσης του αρδευτικού νερού ανά  $\text{m}^3$  για τρία διαφορετικά επιτόκια προεξόφλησης τα έτη (α) 2002 έως 2010 και (β) 2002 έως 2007.

Με την επιθεώρηση των αρδευτικών δικτύων, μέσω του εντοπισμού και της αξιολόγησης των απωλειών τους, εκτιμάται η ποσότητα του νερού που χάνεται και συνεπώς η ποσοστιαία απώλεια του δικτύου. Στην αρχική έκθεση της επιθεώρησης, εκτός από την αξιολόγηση του ποσοστού των απωλειών θα πρέπει να γίνεται και κοστολόγηση των επιδιορθώσεων που απαιτούνται σε συνάρτηση με την εξοικονόμηση που θα επιτευχθεί, με στόχο την αξιολόγηση κόστους – οφέλους. Για παράδειγμα στο συγκεκριμένο δίκτυο άρδευσης του Τ.Ο.Ε.Β. Πηνειού εκτιμάται ότι σε ετήσια βάση η παροχή νερού είναι  $18.750.000 \text{ m}^3$ . Με μείωση των απωλειών κατά 1%, δηλαδή  $187.500 \text{ m}^3$ , θα εξοικονομούσε 39.375€. Το ποσό αυτό προκύπτει από το ανηγμένο κόστος επένδυσης το οποίο είναι 0,21 € επί το 1% του καταναλισκόμενου νερού ( $187.500 \text{ m}^3$ ). Συνεπώς το κόστος κατασκευής ορισμένων έργων για την μείωση των απωλειών κατά 1% δεν θα πρέπει να ξεπερνά το όφελος των 39.375€, το οποίο εξοικονομείται με τη μείωση των απωλειών. Αν το ξεπερνά τότε η εφαρμογή της επιθεώρησης των αρδεύσεων δεν θα είναι συμφέρουσα για την περιοχή.

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα συμπεράσματα που μπορούμε να εξάγουμε από την έρευνα που πραγματοποιήθηκε για την εξέλιξη του κόστους χρήσης του αρδευτικού νερού στην υδρολογική λεκάνη της λίμνης “Κάρλα” είναι ότι:

- Από το 2002 έως και το 2007 το κόστος ανά  $m^3$  αρδευτικού νερού συνεχώς αυξάνεται. Μείωση του κόστους παρατηρείται από το 2007 έως το 2010, λόγω μείωσης των λειτουργικών δαπανών του Τ.Ο.Ε.Β. εξαιτίας της μείωσης προσωπικού.
- Η μείωση του προσωπικού των Τ.Ο.Ε.Β., επιβάλλει ακόμα περισσότερο την ανάγκη για επιθεώρηση των αρδευτικών δικτύων από έναν φορέα επιθεώρησης.
- Η εφαρμογή της επιθεώρησης των αρδεύσεων θα είναι συμφέρουσα για την περιοχή της Κάρλας αν συνολικά κοστολογηθεί λιγότερο από 39.000€ για κάθε ποσοστιαία μονάδα μείωσης του νερού άρδευσης.
- Το μέτρο αξιολόγησης της αποτελεσματικότητας της επιθεώρησης των αρδευτικών δικτύων θα μπορούσε να είναι το όφελος ανά ποσοστιαία μονάδα μείωσης της κατανάλωσης του αρδευτικού νερού σε σύγκριση με το κόστος επίτευξης αυτής της μείωσης.

#### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική Στατιστική Αρχή (ΕΛ.ΣΤΑΤ.)

Lokkas, P., Kotsopoulos, S., Alexiou, J., Gravanis, G., Vassiloglou, V., Magalios, S., and Kas-sos, V., 2007. *The efficiency of water reservoirs at the region of the former Lake Karla in Thessaly to meet irrigation requirements*. 5<sup>th</sup> WSEAS International Conference on Environment, Ecosystems and Development, Tenerife, Spain, 277 – 282

Loukas, A., Mylopoulos, N., and Vasiliades, L., 2007. *A Modelling System for the Evaluation of Water Resources Management Strategies in Thessaly, Greece*. Water Resources Management, 21, 1673 – 1702.

Μαργαρίτη, Μ., 2012. *Η ανασύσταση της Λίμνης Κάρλας – Αειφορική διαχείριση των Υδάτινων Πόρων*. Πρακτικά Πανελλήνιου Συνεδρίου Περιβάλλον και Ανάπτυξη, Αθήνα.

Myriounis, Ch., Tsirogiannis, I.L., Malamos, N., Barouchas, P., Babilis, D.I., and Chalkidis, I., 2015. *Agricultural and Urban Green Infrastructure Irrigation Systems Auditing – A case study for the Region of Epirus*. Agriculture and Agricultural Science Procedia, 4, 300 – 309.

Ντάναση, Κ., 2012. *Κοστολόγηση του αρδευτικού νερού στην περιοχή Μεσσαρά του Νομού Ηρακλείου Κρήτης*, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 81 – 82 σελ.

Οδηγία 2000/60/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 23-10-2000 για τη θέσπιση πλαισίου κοινοτικής δράσης στον τομέα της πολιτικής των υδάτων.

(<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/TXT/PDF/?uri=CELEX:32000L0060&from=EL>)

Sidiropoulos, P., Mylopoulos, N., and Loukas, A., 2013. *Optimal Management of an Overexploited Aquifer under Climate Change: The Lake Karla Case*. Water Resources Management, 27, 1635 – 1649

[www.irrigation – management.eu](http://www.irrigation-management.eu)

[www.irrigation.org](http://www.irrigation.org)



## ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ ΣΤΙΣ ΑΝΑΓΚΕΣ ΣΕ ΝΕΡΟ ΤΩΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ ΚΑΙ ΣΤΗ ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ

Π. Κουκούλη✉, Π. Γεωργίου

Τομέας Εγγείων Βελτιώσεων, Εδαφολογίας και Γεωργικής Μηχανικής, Τμήμα Γεωπονίας, Α.Π.Θ.,  
54124 Θεσσαλονίκη, ✉ koukouli\_giota@yahoo.gr

### Περίληψη

Η κλιματική αλλαγή θεωρείται από τα σημαντικότερα προβλήματα σε παγκόσμιο επίπεδο, γεγονός που επιβάλλει την εκτίμηση των επιπτώσεών της σε διάφορους τομείς της κοινωνικής δραστηριότητας και στο φυσικό περιβάλλον. Στην παρούσα εργασία, μελετήθηκαν οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στις ανάγκες σε νερό και στις αρδευτικές ανάγκες των καλλιεργειών και στη διαθεσιμότητα των υδατικών πόρων στην περιοχή του Αγ. Μάμα Χαλκιδικής. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκαν τρία σενάρια κλιματικής αλλαγής (SRES A2, A1B και B1), τα οποία προέκυψαν από τρία Μοντέλα Γενικής Κυκλοφορίας (CGCM3.1/T63, MPEH5-OM, HadGEM1), για τις περιόδους κλιματικής αλλαγής 2020-2050 και 2070-2100 ενώ ο υποβιβασμός κλίμακας έγινε με τη γεννήτρια καιρού GlimGen. Η κλιματική αλλαγή θα αυξήσει τις αρδευτικές ανάγκες των καλλιεργειών ενώ θα μειώσει τη διαθεσιμότητα των υδατικών πόρων, με αποτέλεσμα τη μείωση των εκτάσεων προς άρδευση ή την ελλειμματική άρδευση των υπαρχόντων εκτάσεων των καλλιεργειών.

*Λέξεις κλειδιά:* Κλιματική αλλαγή, Ανάγκες σε νερό των καλλιεργειών, Υδατικοί πόροι

## IMPACTS OF CLIMATE CHANGE ON CROP WATER REQUIREMENTS AND ON WATER RESOURCES AVAILABILITY

P. Koukouli✉, P. Georgiou

Department of Hydraulics, Soil Science and Agricultural Engineering, School of Agriculture, A.U.Th.,  
54124 Thessaloniki, ✉ koukouli\_giota@yahoo.gr

### Abstract

Climate change is considered one major problem worldwide and this requires an assessment of its impacts on different aspects of social activity and on the natural environment. In the present paper, the impacts of climate change on water requirements and crop water requirements and water resources availability were studied in Agios Mamas area of Chalkidiki. For this purpose, three climate change scenarios were used (SRES A2, A1B and B1) - which were taken from three General Circulation Models (CGCM3.1/T63, MPEH5-OM, HadGEM1) - for the time periods of climate change 2020-2050 and 2070-2100 while the downscaling was done using the weather generator GlimGen. Climate change will increase crop water requirements while water resources availability will be decreased, resulting in a decrease of the irrigated areas or the deficient irrigation of the existing irrigated areas.

*Key words:* Climate change, Crop water requirements, Water resources

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η κλιματική αλλαγή αποτέλεσε και αποτελεί αντικείμενο μελέτης πολλών ερευνητών. Η θέρμανση του πλανήτη αποτελεί πλέον αδιαμφισβήτητο γεγονός. Η άνοδος της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας άρχισε από το τέλος του 19<sup>ου</sup> αιώνα και ο μέσος ρυθμός θέρμανσης της ατμόσφαιρας του πλανήτη κατά τον 20<sup>ο</sup> αιώνα ήταν 0.7°C ανά 100 χρόνια. Σύμφωνα με προβλέψεις της «Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Κλιματική Αλλαγή» (IPCC, 2007), ανάλογα με την εξέλιξη των συγκεντρώσεων των αερίων του θερμοκηπίου, η μέση θερμοκρασία της ατμόσφαιρας αναμένεται να αυξηθεί κατά 1.8-4°C κατά τον 21<sup>ο</sup> αιώνα.

Η παγκόσμια εγρήγορση σχετικά με την κλιματική αλλαγή εντείνεται χρόνο με το χρόνο καθώς οι ενδείξεις για τη σοβαρότητα των επιπτώσεων της γίνονται όλο και πιο ανησυχητικές ιδιαίτερα για το γεωργικό τομέα. Οι αλλαγές στις κλιματικές συνθήκες θα επηρεάσουν σημαντικά το ρυθμό ανάπτυξης των καλλιεργειών, τις ανάγκες τους σε νερό και γενικότερα τη διαθεσιμότητα των υδατικών πόρων, κυριότερος χρήστης των οποίων είναι η γεωργία, που καταναλώνει περίπου το 80% στη χώρα μας (Γεωργίου κ. άλ., 2012).

Στην παρούσα εργασία έγινε εκτίμηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στις ανάγκες σε νερό και τις αρδευτικές ανάγκες των καλλιεργειών καθώς επίσης και στη διαθεσιμότητα των υδατικών πόρων για τις περιόδους 2020-2050 και 2070-2100, στην περιοχή του Αγίου Μάμα Χαλκιδικής. Για την επίτευξη του στόχου αυτού λήφθηκαν δεδομένα από τα Μοντέλα Γενικής Κυκλοφορίας CGCM3.1/T63 (Flato et al., 2000) από το «Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (CCCma)», MPEH5-OM ή ECHAM5/MPI-OM (Roeckner et al., 2003) από το «Max Planck Institute for Meteorology (MPI)» και HadGEM1 (Johns et al., 2006) από το «Hadley Centre for Climate Prediction and Research», για τρία σενάρια κλιματικής αλλαγής (SRES A2, A1B και B1) (IPCC, 2000) για δύο περιόδους κλιματικής αλλαγής 2020-2050 και 2070-2100 και την περίοδο αναφοράς (1977-2000). Με βάση τα δεδομένα που λήφθηκαν από τα Μοντέλα Γενικής Κυκλοφορίας, έγινε υποβιβασμός κλίμακας των κλιματικών παραμέτρων με τη γεννήτρια καιρού GlimGen (Nelson, 2002) για την παραγωγή συνθετικών σειρών, οι οποίες αποτελούν τις μελλοντικές εκτιμήσεις των κλιματικών παραμέτρων. Με τη βοήθεια των συνθετικών σειρών των κλιματικών παραμέτρων, προσδιορίστηκε η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς από την οποία υπολογίστηκε η εξατμισοδιαπνοή των καλλιεργειών καθώς επίσης οι καθαρές και ολικές αρδευτικές τους ανάγκες. Τέλος, υπολογίστηκε ο όγκος απορροής υδρολογικής λεκάνης ποταμού, ο οποίος θα τροφοδοτεί με νερό τις αρδευόμενες εκτάσεις των καλλιεργειών. Με βάση τις αρδευτικές ανάγκες και τη διαθεσιμότητα του νερού, υπολογίστηκαν οι αρδευόμενες εκτάσεις των καλλιεργειών για την περίοδο αναφοράς αλλά και τις περιόδους κλιματικής αλλαγής.

## 2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

### 2.1. Σενάρια κλιματικής αλλαγής

Για την εκτίμηση των επιπτώσεων της αλλαγής του κλίματος στο μέλλον δημιουργήθηκαν τα σενάρια εκπομπών αερίων, γνωστά ως SRES (Special Report on Emissions Scenarios) (IPCC, 2000), τα οποία καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα των αιτιών των μελλοντικών εκπομπών, όπως οι δημογραφικές αλλαγές, η τεχνολογική εξέλιξη και οι κοινωνικοοικονομικές αλλαγές. Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιήθηκαν τα σενάρια εκπομπών SRES A2, A1B και B1 (Σενάριο 1, 2, 3) εκ των οποίων το Σενάριο 1 είναι το ακραίο και δυσμενέστερο σενάριο, το Σενάριο 2 είναι ενδιάμεσο και το Σενάριο 3 είναι ένα ήπιο σενάριο ανθρωπογενών εκπομπών (IPCC, 2000; 2007). Τα σενάρια εκπομπών χρησιμοποιούνται σε διάφορα κλιματικά μοντέλα γνωστά ως «Μοντέλα Γενικής Κυκλοφορίας» (General Circulation Models-GCMs) τα



οποία αποτελούν το κυριότερο εργαλείο στην κατανόηση του κλίματος και στην πρόβλεψη της κλιματικής αλλαγής. Τα GCMs είναι αριθμητικά μοντέλα που προσομοιώνουν το παγκόσμιο κλίμα υπολογίζοντας την εξελικτική πορεία της ατμόσφαιρας και στις τρεις διαστάσεις (IPCC, 2007). Επιλέχθηκαν τρία GCMs, τα CGCM3.1/T63, MPEH5-OM και HadGEM1 από τα οποία λήφθηκαν τα δεδομένα των ημερήσιων τιμών μετεωρολογικών μεταβλητών τόσο για την περίοδο αναφοράς (1977-2000) όσο και για τις περιόδους κλιματικής αλλαγής 2020-2050 και 2070-2100.

Τα GCMs ενώ έχουν την ικανότητα να προσομοιώνουν το παγκόσμιο κλίμα, δεν περιγράφουν όμως ικανοποιητικά το τοπικό κλίμα. Για την επίλυση της παραπάνω αδυναμίας των GCMs αναπτύχθηκαν οι μέθοδοι υποβιβασμού κλίμακας, οι οποίες αποτελούν μια μετάβαση από τη μεγάλη κλίμακα των GCMs σε μικρότερη τοπική κλίμακα. Οι μέθοδοι υποβιβασμού κλίμακας χωρίζονται σε δυο μεγάλες κατηγορίες: (α) Τις εμπειρικές-στατιστικές και των (β) μοντέλων περιοχικής-τοπικής κλίμακας ή δυναμικού υποβιβασμού κλίμακας. Στην κατηγορία των εμπειρικών-στατιστικών μεθόδων ανήκουν οι εμπειρικές συναρτήσεις μετάβασης, η συνοπτική προσέγγιση και οι γεννήτριες καιρού (Γεωργίου κ.ά., 2012; Κουκούλη, 2014) που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία.

Η γεννήτρια καιρού GlimGen (Nelson, 2002) αποτελεί ένα στοχαστικό μοντέλο με ημερήσιο χρονικό βήμα το οποίο παράγει συνθετικές χρονοσειρές κλιματικών παραμέτρων. Σύμφωνα με τη μέθοδο υποβιβασμού κλίμακας αυτής της κατηγορίας, αφού λήφθηκαν τα δεδομένα για την περίοδο βάσης και για τις περιόδους κλιματικής αλλαγής από τα τρία Μοντέλα Γενικής Κυκλοφορίας, για τις διάφορες κλιματικές παραμέτρους, υπολογίστηκε η μεταβολή που επέρχεται ανάμεσα στην περίοδο βάσης και την περίοδο της κλιματικής αλλαγής. Στη συνέχεια με βάση αυτή τη μεταβολή, διαταράχθηκε η ιστορική σειρά των δεδομένων της υπό μελέτη περιοχής. Η διαταραγμένη πλέον ιστορική σειρά χρησιμοποιήθηκε από τη γεννήτρια καιρού GlimGen για την παραγωγή συνθετικών σειρών, οι οποίες διατηρούν τα στατιστικά χαρακτηριστικά της ιστορικής σειράς μετά τη διατάραξή τους και αποτυπώνουν τη μελλοντική μεταβολή των διαφόρων κλιματικών παραμέτρων.

## **2.2. Εκτίμηση αναγκών σε νερό και αρδευτικών αναγκών των καλλιεργειών**

Οι καθαρές σε νερό άρδευσης ανάγκες των καλλιεργειών ( $IR_n$ ) υπολογίζονται λαμβάνοντας υπόψη την εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας ( $ET_c$ ), την ωφέλιμη βροχόπτωση ( $P_e$ ), την υγρασία που υπάρχει αποθηκευμένη στην αρχή της βλαστικής περιόδου στη ζώνη του ριζοστρώματος (SM) και το νερό που φτάνει με τριχοειδή ανύψωση από τα βαθύτερα στρώματα στη ζώνη των ριζών (GW). Οι ολικές σε νερό άρδευσης ανάγκες των καλλιεργειών ( $IR_t$ ) συμπεριλαμβάνουν τις καθαρές σε νερό άρδευσης ανάγκες μαζί με την αποδοτικότητα άρδευσης (E) και το συντελεστή έκπλυσης (LR) (Παπαμιχαήλ και Μπαμπατζιμόπουλος, 2014).

Η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας ( $ET_c$ ) προκύπτει από το γινόμενο της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας αναφοράς και ενός φυτικού συντελεστή ( $k_c$ ) που είναι χαρακτηριστικός της κάθε καλλιέργειας. Για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς ( $ET_o$ ) έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι, από τις οποίες η μέθοδος Penman-Monteith κατά FAO (Allen et al., 1998; Παπαμιχαήλ και Μπαμπατζιμόπουλος, 2014) θεωρείται η πιο αξιόπιστη και χρησιμοποιείται ευρέως. Η ωφέλιμη βροχόπτωση ( $P_e$ ) μπορεί να υπολογιστεί αν από τη συνολική βροχόπτωση αφαιρεθεί η απορροϊκή. Η εκτίμηση της απορροϊκής βροχής, στις περιπτώσεις που δεν υπάρχουν ταυτόχρονες παρατηρήσεις βροχής και απορροής γίνεται με τη μέθοδο του απορροϊκού συντελεστή CN (Curve Number) της Soil Conservation Service (S.C.S.) (Παπαμιχαήλ, 2004).

### 2.3. Υδατικό ισοζύγιο υδρολογικής λεκάνης

Η σωστή μελέτη και η ορθολογική αξιοποίηση και διαχείριση των υδατικών πόρων μίας υδρολογικής λεκάνης προϋποθέτουν την ποσοτική εκτίμηση των διαφόρων φάσεων του υδρολογικού κύκλου, που οδηγεί στην εκτίμηση της απορροής. Η εκτίμηση αυτή γίνεται με τη βοήθεια υδρολογικών μοντέλων βροχής-απορροής, οι παράμετροι των οποίων υπολογίζονται από ταυτόχρονες μετρήσεις κλιματικών παραμέτρων και απορροής της περιόδου ρύθμισης (Παπαμιχαήλ κ.άλ., 2000; Παπαμιχαήλ, 2004).

Στην εργασία αυτή, λόγω παντελούς έλλειψης μετρήσεων παροχών και αδυναμίας κατά συνέπεια ρύθμισης των μοντέλων βροχής-απορροής, η εκτίμηση των απορροών στην υδρολογική λεκάνη, σε μηνιαία βάση, έγινε με τη βοήθεια ενός μαθηματικού ομοιώματος, που αποτελεί παραλλαγή του ομοιώματος Thornthwaite and Mather (Steenhuis and Van Der Molen, 1986; Παπαμιχαήλ κ.άλ., 2000; Παπαμιχαήλ, 2004) και βασίζεται στο υδατικό ισοζύγιο. Το μοντέλο αυτό έχει τρεις βασικές παραμέτρους, τη μέγιστη εδαφική υγρασία και τους συντελεστές βαθιάς διήθησης και υστέρησης, η διερεύνηση των οποίων γίνεται με τη βοήθεια των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών και της βλάστησης της λεκάνης και τα μόνα δεδομένα εισόδου είναι οι μέσες μηνιαίες τιμές της βροχόπτωσης και της θερμοκρασίας της λεκάνης.

### 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

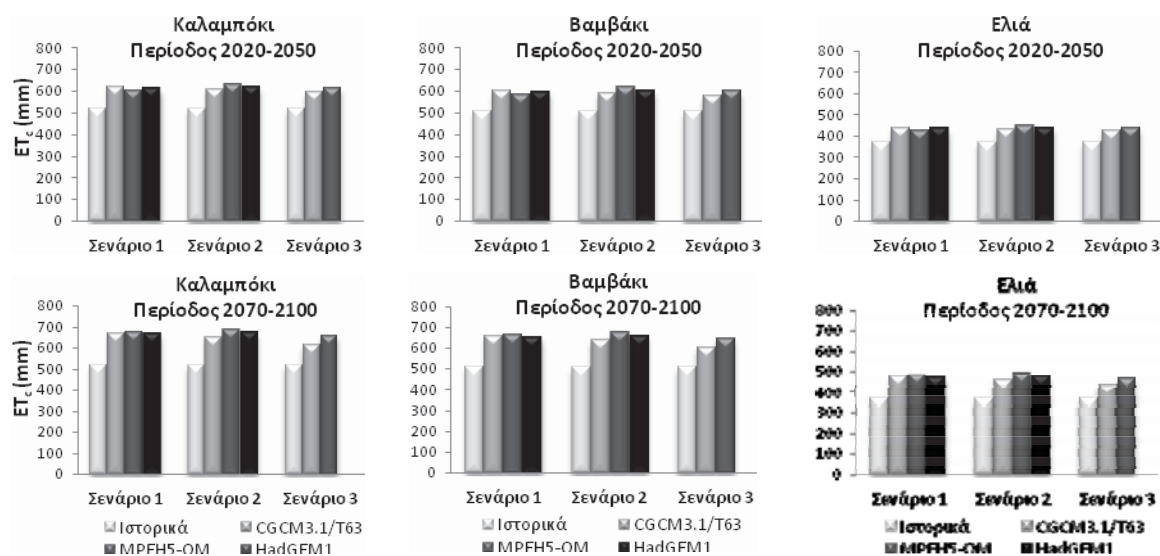
Η περιοχή μελέτης αφορά την περιοχή του Αγίου Μάμα Χαλκιδικής για το γεγονός ότι λειτουργεί μετεωρολογικός σταθμός με πλήρη κλιματικά δεδομένα για την παραγωγή των σεναρίων κλιματικής αλλαγής. Επιπλέον, η ευρύτερη περιοχή είναι γεωργική με αρδευόμενες εκτάσεις, ενώ ανάντη της περιοχής υπάρχει ο ποταμός Ολύνθιος στον οποίο σχεδιάζεται κατασκευή φράγματος (Καραμούζης κ.άλ., 2008) για την αποθήκευση νερού και τη χρησιμοποίησή του για την κάλυψη υδρευτικών και αρδευτικών αναγκών.

Χρησιμοποιήθηκαν ημερήσια δεδομένα από τα τρία GCMs, για την περίοδο αναφοράς και για τις δύο περιόδους κλιματικής αλλαγής, για τα τρία Σενάρια, σε σημεία (grid) που ήταν κοντύτερα προς την περιοχή μελέτης. Συγκεκριμένα, ο σταθμός του Αγίου Μάμα έχει συντεταγμένες 40°15' N και 23°20' E ενώ οι συντεταγμένες από τα GCMs είναι 40°46' N και 22°50' E (CGCM3.1/T63), 40°10' N και 22°50' E (MPEH5-OM) και 40° N και 22°50' E (HadGEM1). Οι κλιματικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν αφορούσαν τη βροχόπτωση, τη μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία, την ηλιακή ακτινοβολία, τη μέγιστη και ελάχιστη σχετική υγρασία και την ταχύτητα ανέμου. Η διαταραγμένη ιστορική σειρά των δεδομένων, χρησιμοποιήθηκε από τη γεννήτρια καιρού GlimGen για την παραγωγή 100 συνθετικών σειρών και στη συνέχεια υπολογίστηκε μια μέση συνθετική σειρά για κάθε κλιματική παράμετρο για το σταθμό του Αγίου Μάμα. Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι η μέγιστη θερμοκρασία του αέρα θα αυξηθεί από 1.6°C (Σενάριο 3-MPEH5-OM) έως 2.1°C (Σενάριο 2-CGCM3.1/T63) και από 2.7°C (Σενάριο 3-CGCM3.1/T63) έως 5.4°C (Σενάριο 1-CGCM3.1/T63), ενώ η ελάχιστη θερμοκρασία θα εμφανίσει αύξηση μεταξύ 0.8°C (Σενάριο 3-MPEH5-OM) και 1.2°C (Σενάριο 2-HadGEM1) και από 1.7°C (Σενάριο 3-CGCM3.1/T63) έως 3.8°C (Σενάριο 1-MPEH5-OM) κατά το 2020-2050 και 2070-2100 αντίστοιχα. Η ετήσια βροχόπτωση αναμένεται να μειωθεί μεταξύ 4% (Σενάριο 1-MPEH5-OM) και 20% (Σενάριο 3-MPEH5-OM) κατά το 2020-2050 και από 3% (Σενάριο 3-CGCM3.1/T63) έως 36% (Σενάριο 2-MPEH5-OM) κατά το 2070-2100, ενώ θα παρουσιάσει μικρή αύξηση (1%-3%) με βάση το HadGEM1 (Κουκούλη, 2014).

Για την εκτίμηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στις ανάγκες σε νερό καθώς και στις ανάγκες σε νερό άρδευσης των καλλιεργειών, επιλέχθηκαν οι εξής καλλιέργειες: (α)

καλαμπόκι, (β) βαμβάκι και (γ) ελιά. Η ελιά επιλέχθηκε γιατί είναι μία από τις επικρατούσες καλλιέργειες στην περιοχή ενώ το καλαμπόκι και το βαμβάκι αποτελούν δυναμικές καλλιέργειες της Ελλάδας. Με τη βοήθεια των συνθετικών σειρών των κλιματικών παραμέτρων, προσδιορίστηκε η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς από την οποία υπολογίστηκε η εξατμισοδιαπνοή των τριών καλλιεργειών για τα τρία GCMs με βάση τα Σενάρια για τις περιόδους κλιματικής αλλαγής 2020-2050 και 2070-2100 και την περίοδο αναφοράς. Βάσει των Σεναρίων 1, 2, 3 των τριών GCMs, η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς αναμένεται να αυξηθεί κατά 13%, 15% και 13% κατά το 2020-2050 ενώ κατά τη χρονική περίοδο 2070-2100 η παραπάνω αύξηση θα είναι σχεδόν διπλάσια (25%, 27%, 20%).

Στο Σχήμα 1 φαίνεται η μέση ετήσια εξατμισοδιαπνοή των τριών καλλιεργειών σύμφωνα με τα τρία Σενάρια των τριών GCMs για τις περιόδους κλιματικής αλλαγής (2020-2050 και 2070-2100) και για την περίοδο αναφοράς (1977-2000). Όπως προκύπτει από το Σχήμα 1, η εξατμισοδιαπνοή και των τριών καλλιεργειών προβλέπεται να αυξηθεί στο μέλλον σε σχέση με την περίοδο αναφοράς, με τη μεγαλύτερη αύξηση να παρατηρείται κατά τη χρονική περίοδο 2070-2100 (22% έως 30%) σε σχέση με την περίοδο 2020-2050 (16% έως 19%) με βάση και τα τρία Σενάρια των τριών GCMs. Το παραπάνω οφείλεται στην αντίστοιχη αύξηση της θερμοκρασίας και κατά συνέπεια της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς κατά τις περιόδους κλιματικής αλλαγής. Δεν παρατηρήθηκαν διαφορές στην παραπάνω αύξηση μεταξύ των τριών καλλιεργειών. Επιπλέον, στο CGCM3.1/T63 η μικρότερη αύξηση παρατηρήθηκε στο Σενάριο 3 και για τις δυο χρονικές περιόδους επειδή το παραπάνω σενάριο αντιστοιχεί στις μικρότερες εκπομπές αερίων μεταξύ των τριών Σεναρίων.

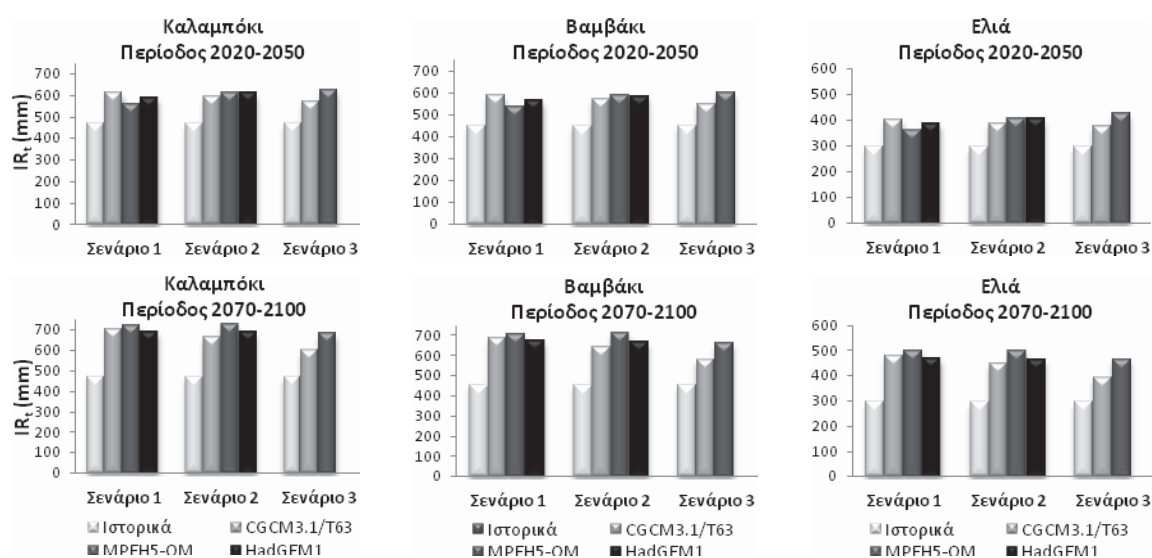


**Σχήμα 1.** Μέση ετήσια εξατμισοδιαπνοή των τριών καλλιεργειών για τις περιόδους κλιματικής αλλαγής 2020-2050 και 2070-2100 και την περίοδο αναφοράς.

Στη συνέχεια υπολογίστηκαν οι καθαρές και ολικές σε νερό άρδευσης ανάγκες των υπό μελέτη καλλιεργειών κατά την περίοδο αναφοράς (1977-2000) και για τις περιόδους 2020-2050 και 2070-2100. Για τον υπολογισμό των καθαρών αναγκών σε νερό άρδευσης των καλλιεργειών, η υγρασία που υπάρχει αποθηκευμένη στο έδαφος και το νερό που φτάνει με τριχοειδή ανύψωση στη ζώνη του ριζοστρώματος θεωρήθηκαν μηδενικές ενώ για τον υπολογισμό των ολικών αναγκών σε νερό άρδευσης των καλλιεργειών, η αποδοτικότητα άρδευσης θεωρήθηκε ίση με 0.85 και ο συντελεστής έκπλυσης μηδενικός.

Στο Σχήμα 2 φαίνονται οι μέσες ολικές αρδευτικές ανάγκες των τριών καλλιεργειών σύμφωνα με τα τρία Σενάρια των τριών GCMs για τις περιόδους κλιματικής αλλαγής (2020-

2050 και 2070-2100) και για την περίοδο αναφοράς (1977-2000). Από το Σχήμα 2 προκύπτει ότι οι μέσες ολικές αρδευτικές ανάγκες των τριών καλλιεργειών θα εμφανίσουν αύξηση στο μέλλον, η οποία θα είναι μεγαλύτερη κατά το 2070-2100 (50%) σε σχέση με το 2020-2050 (30%) με βάση και τα τρία Σενάρια των τριών GCMs. Η παραπάνω αύξηση μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι στο μέλλον η εξατμισοδιαπνοή των καλλιεργειών θα εμφανίσει αύξηση ενώ θα μειωθούν οι βροχοπτώσεις με τη μεγαλύτερη μείωση να παρατηρείται την περίοδο 2070-2100. Μεταξύ των τριών καλλιεργειών, η μεγαλύτερη αύξηση των αρδευτικών αναγκών παρατηρήθηκε στην ελιά, ενώ στο καλαμπόκι και το βαμβάκι η ποσοστιαία αύξηση είχε παρόμοιες τιμές. Επίσης σύμφωνα με το CGCM3.1/T63 η μικρότερη αύξηση παρατηρήθηκε στο Σενάριο 3, το οποίο είναι το ήπιο σενάριο εκπομπών και η μεγαλύτερη στο Σενάριο 1 που αντιστοιχεί στο δυσμενές σενάριο.

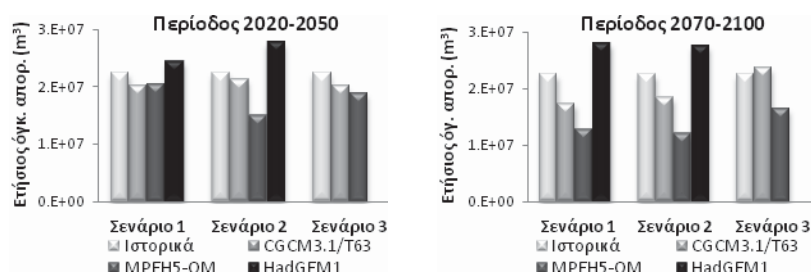


**Σχήμα 2.** Μέσες ολικές αρδευτικές ανάγκες των τριών καλλιεργειών για τις περιόδους κλιματικής αλλαγής 2020-2050 και 2070-2100 και την περίοδο αναφοράς.

Η εκτίμηση του υδατικού ισοζυγίου έγινε στη λεκάνη απορροής του ποταμού Ολυνθίου Χαλκιδικής με την εφαρμογή του τροποποιημένου μηνιαίου μοντέλου των Thornthwaite and Mather (Παράγραφος 2.3). Η μέση βροχόπτωση υπολογίστηκε με τη μέθοδο της βροχοβαθμίδας και η μέση θερμοκρασία υπολογίστηκε με τη μέθοδο της θερμοβαθμίδας (Παπαμιχαήλ, 2004).

Στο Σχήμα 3 φαίνεται ο μέσος ετήσιος όγκος απορροής της υδρολογικής λεκάνης του Ολυνθίου σύμφωνα με τα Σενάρια 1, 2, 3 των τριών GCMs για τις περιόδους κλιματικής αλλαγής (2020-2050 και 2070-2100) και για την περίοδο αναφοράς (1977-2000). Ο ετήσιος όγκος απορροής του ποταμού Ολυνθίου προβλέπεται να μειωθεί σύμφωνα με τα μοντέλα CGCM3.1/T63 και MPEH5-OM μεταξύ 5% (Σενάριο 2) και 33% (Σενάριο 2) και από 18% (Σενάριο 2) έως 47% (Σενάριο 2) κατά τις περιόδους 2020-2050 και 2070-2100 αντίστοιχα. Το MPEH5-OM προβλέπει μεγαλύτερη ποσοστιαία μείωση του όγκου απορροής σε σχέση με το CGCM3.1/T63. Αντιθέτως, με βάση το HadGEM1 ο ετήσιος όγκος απορροής θα αυξηθεί κατά 9% (Σενάριο 1)-23% (Σενάριο 2) το 2020-2050 και κατά 22% (Σενάριο 2)-25% (Σενάριο 1) το 2070-2100. Τα παραπάνω μπορούν να εξηγηθούν από το γεγονός ότι τα CGCM3.1/T63 και MPEH5-OM προβλέπουν μείωση της ετήσιας βροχόπτωσης κατά τις περιόδους κλιματικής αλλαγής ενώ σύμφωνα με το HadGEM1 η ετήσια βροχόπτωση θα έχει μικρή αύξηση.





**Σχήμα 3.** Μέσος ετήσιος όγκος απορροής της υδρολογικής λεκάνης του Ολυνθίου για τις περιόδους κλιματικής αλλαγής 2020-2050 και 2070-2100 και την περίοδο αναφοράς.

Για τη μελέτη των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής με βάση το διαθέσιμο υδατικό δυναμικό στην άρδευση των καλλιεργειών προσδιορίστηκαν οι προς άρδευση εκτάσεις των υπό μελέτη καλλιεργειών από τον ποταμό Ολύνθιο θεωρώντας ότι όλη η ποσότητα του νερού χρησιμοποιείται αποκλειστικά για άρδευση. Οι προς άρδευση εκτάσεις αναμένεται να μειωθούν για τα Σενάρια 1, 2, 3 σύμφωνα με τα τρία GCMs και για τις δυο περιόδους κλιματικής αλλαγής. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη μείωση του όγκου απορροής της υδρολογικής λεκάνης και στην αύξηση των αρδευτικών αναγκών των καλλιεργειών στο μέλλον.

Στον Πίνακα 1 δίνονται οι αρδευόμενες εκτάσεις των τριών καλλιεργειών με τη μεγαλύτερη εκατοστιαία μείωση μεταξύ των τριών GCMs για τις περιόδους κλιματικής αλλαγής (2020-2050 και 2070-2100) και για την περίοδο αναφοράς (1977-2000). Η εκατοστιαία μείωση προβλέπεται να είναι μεγαλύτερη κατά τη χρονική περίοδο 2070-2100 και μπορεί να φθάσει και το 73% (Σενάριο 2-MPEH5-OM). Οι προς άρδευση εκτάσεις με καλαμπόκι και βαμβάκι θα εμφανίσουν μικρότερη μείωση σε σχέση με την ελιά.

**Πίνακας 1.** Αρδευόμενες εκτάσεις των τριών καλλιεργειών για τις περιόδους κλιματικής αλλαγής 2020-2050 και 2070-2100 και την περίοδο αναφοράς.

Καλλιέργειες	Αρδευόμενες εκτάσεις (στρέμματα)						
	1977-2000	Περίοδος 2020-2050			Περίοδος 2070-2100		
		Σενάριο 1	Σενάριο 2	Σενάριο 3	Σενάριο 1	Σενάριο 2	Σενάριο 3
Καλαμπόκι	56.261	CGCM3.1/T63	MPEH5-OM	MPEH5-OM	MPEH5-OM	MPEH5-OM	MPEH5-OM
		38.748	28.883	35.662	20.507	17.277	28.256
		-31%	-49%	-37%	-64%	-69%	-50%
Βαμβάκι	58.453	CGCM3.1/T63	MPEH5-OM	MPEH5-OM	MPEH5-OM	MPEH5-OM	MPEH5-OM
		40.218	29.798	36.772	21.089	17.712	29.262
		-31%	-49%	-37%	-64%	-70%	-50%
Ελιά	89.659	CGCM3.1/T63	MPEH5-OM	MPEH5-OM	MPEH5-OM	MPEH5-OM	MPEH5-OM
		58.916	43.744	52.503	29.863	24.385	41.633
		-34%	-51%	-41%	-67%	-73%	-54%

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή διερευνήθηκαν οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής κατά τις περιόδους 2020-2050 και 2070-2100 στις αρδευτικές ανάγκες τριών καλλιεργειών καθώς και στη διαθεσιμότητα των υδατικών πόρων στην περιοχή του Αγίου Μάμα Χαλκιδικής. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα αναμένεται αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του αέρα και μείωση των βροχοπτώσεων για τις περιόδους κλιματικής αλλαγής 2020-2050 και 2070-2100 σε σχέση με την περίοδο αναφοράς. Επίσης, προβλέπεται αύξηση των ετήσιων καθαρών και ολικών αναγκών σε νερό άρδευσης των υπό μελέτη καλλιεργειών, η οποία οφείλεται στην αντίστοιχη μείωση της βροχόπτωσης και στην αύξηση της εξατμισοδιαπνοής που θα λάβουν χώρα στο μέλλον. Τέλος, ο ετήσιος όγκος απορροής της λεκάνης απορροής του Ολυνθίου προ-



βλέπεται να μειωθεί σύμφωνα με τα μοντέλα CGCM3.1/T63 και MPEH5-OM, ενώ αναμένεται να αυξηθεί με βάση το HadGEM1 για τις δύο περιόδους κλιματικής αλλαγής. Επομένως, οι μεταβολές του κλίματος στο μέλλον θα μειώσουν τη διαθεσιμότητα των υδατικών πόρων ενώ θα αυξήσουν τις αρδευτικές ανάγκες των καλλιεργειών με αποτέλεσμα τη μείωση των εκτάσεων προς άρδευση ή την ελλειμματική άρδευση των υπαρχόντων εκτάσεων των καλλιεργειών. Για το λόγο αυτό, κρίνεται σκόπιμη η εφαρμογή μέτρων προσαρμογής στην κλιματική αλλαγή με σκοπό την αξιοποίηση των διαθέσιμων υδατικών πόρων και την εξοικονόμηση και αποτελεσματική χρήση του αρδευτικού νερού.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Allen, R.G., Pereira, L.S, Raes, D. and Smith, M., 1998. *Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, Rome, 300 pp.
- Flato, G.M. et al., 2000. *The Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis global coupled model and its climate*. Climate Dynamics, 16, 451-467.
- Γεωργίου, Π.Ε., Παπαμιχαήλ, Δ.Μ. και Λιάπης, Α.Γ., 2012. *Επίδραση των κλιματικών αλλαγών στις ανάγκες σε νερό των καλλιεργειών και στην οικονομική αξία του αρδευτικού νερού*. Πρακτικά Κοινού Συνεδρίου EYE & ΕΕΔΥΠ, Πάτρα, 278-290.
- IPCC, 2000. *Special Report: Emissions scenarios*. In: N. Nakićenović and Swart R. (Editors), A special report of working group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, UK, 570 pp.
- IPCC, 2007. *Climate Change 2007: Synthesis report*. In: R.K. Pachauri and Reisinger A. (Editors), Contribution of working groups I, II and III to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Geneva, Switzerland, 104 pp.
- Johns, T.C. et al., 2006. *The New Hadley Centre Climate Model HadGEM1: Evaluation of coupled simulations*. Journal of Climate, 19, 1327-1353.
- Καραμούζης, Δ.Ν. κ.άλ., 2008. *Προκαταρκτική μελέτη φράγματος Ολύνθιου (Θέση Λουζίκι)*. Υ.ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ./Γ.Γ..Δ.Ε./Γ.Δ.Υ.Ε. Δ/νση Έργων Ύδρευσης και Αποχέτευσης, Θεσσαλονίκη.
- Κουκούλη, Π.Γ., 2014. *Κλιματική αλλαγή και επιπτώσεις στις ανάγκες σε νερό, στην απόδοση των καλλιεργειών και στη διαθεσιμότητα των υδατικών πόρων*. Μεταπτυχιακή Διατριβή, Τμήμα Γεωπονίας Α.Π.Θ., 312 σελ.
- Nelson, R., 2002. *Description of ClimGen: A weather generation program*. Available from <http://www.bsyse.wsu.edu/climgen/documentation/description.htm>.
- Παπαμιχαήλ, Δ.Μ., 2004. *Τεχνική Υδρολογία Επιφανειακών Υδάτων*. Εκδόσεις Γιαχούδη-Γιαπούλη, Θεσσαλονίκη, 394 σελ.
- Παπαμιχαήλ, Δ.Μ., Γεωργίου, Π.Ε. και Καραμούζης, Δ.Ν., 2000. *Εκτίμηση μηνιαίων εισροών του ταμειευτήρα του χειμάρρου Πετρένια Χαλκιδικής και σχεδιασμός λειτουργίας του*. Πρακτικά 8<sup>ου</sup> Πανελληνίου Συνεδρίου Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης, Αθήνα, 277-284.
- Παπαμιχαήλ, Δ.Μ. και Μπαμπατζιμόπουλος, Χ.Σ., 2014. *Εφαρμοσμένη Γεωργική Υδραυλική*. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 550 σελ.
- Roeckner, E. et al., 2003. *The atmospheric general circulation model ECHAM5. Part I: Model Description*. Max Planck Institute for Meteorology Report No 349, 127 pp.
- Steenhuis, T.S. and Van Der Molen, W.H., 1986. *The Thornthwaite-Mather procedure as a simple engineering method to predict recharge*. Journal of Hydrology, 84, 221-229.

# ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΜΕ ΤΟΝ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ CS655 ΚΑΙ Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΦΑΙΝΟΜΕΝΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

Γ. Κάργας<sup>1,✉</sup>, Γ. Φλώρος<sup>1</sup>, Γ. Μπουραζάνης<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Ιερά Οδός 75, 11855 Αθήνα, ✉ kargas@aua.gr

<sup>2</sup>Δ/νση Αγροτικής Οικονομίας & Κτηνιατρικής, Περιφερειακή Ενότητα Λακωνίας, Περιφέρεια Πελοποννήσου, 2<sup>ο</sup> χλμ. Σπάρτης Γυθείου, 23100 Σπάρτη

## Περίληψη

Οι διηλεκτρικοί αισθητήρες μετρούν την διηλεκτρική σταθερά του εδάφους ( $\epsilon_r'$ ) η οποία στη συνέχεια χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της περιεκτικότητας σε νερό του εδάφους ( $\theta$ ). Για την ακριβή εκτίμηση της  $\theta$  είναι αναγκαία η βαθμονόμηση των αισθητήρων και η διερεύνηση της επίδρασης των εδαφικών παραμέτρων. Το κύριο αντικείμενο της εργασίας είναι η βαθμονόμηση της συσκευής CS655 σε διαφορετικά εδάφη. Η υψηλή τιμή του συντελεστή συσχέτισης ( $R^2 > 0.93$ ) στη σχέση  $\theta - \sqrt{\epsilon_r'}$ , δείχνει ότι η εξίσωση των Topp and Reynolds (1998) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ακριβή εκτίμηση της  $\theta$ . Επιπλέον εξετάστηκε και η μέθοδος Kelleners, η οποία δίνει ίδιες τιμές της  $\epsilon_r'$  με αυτές του αισθητήρα CS655 μέχρι μια μέγιστη τιμή της φαινόμενης ηλεκτρικής αγωγιμότητας ( $\sigma_b$ ) περίπου 0.8 dS/m.

Λέξεις κλειδιά: Διηλεκτρικοί αισθητήρες, Βαθμονόμηση, Αλατότητα

## THE EVALUATION OF SOIL MOISTURE WITH THE SENSOR CS655 AND THE EFFECT OF APPARENT ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF SOIL

G. Kargas<sup>1,✉</sup>, G. Floros<sup>1</sup>, G. Bourazanis<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Agricultural University of Athens, Sector of water resources management, ✉ kargas@aua.gr

<sup>2</sup>Department of Rural Economy and Veterinary of Regional Government of Laconia, Sparta, 23100, Laconia

The dielectric sensors measure the dielectric constant of the soil ( $\epsilon_r'$ ) which is then used to calculate the water content of the soil ( $\theta$ ). For the accurate estimation of  $\theta$ , it is necessary to calibrate the sensors and to investigate the other soil properties effects. The main objective of the study is the calibration of the device CS655 for different soil types. The high value of  $R^2 > 0.93$  shows that the equation of Topp and Reynolds (1998) can be used for the accurate measurement of  $\theta$ . Furthermore, the method of Kelleners was examined, which for the cases of non conductive soils, gives similar results for the  $\epsilon_r'$  with that of the CS655 sensor until a maximum apparent electrical conductivity ( $\sigma_b$ ) value at approximately 0.8 dS/m.

**Key words:** Dielectric sensors, Calibration, Salinity

## 1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η γνώση της περιεκτικότητας σε υγρασία,  $\theta$ , του εδάφους παίζει καθοριστικό ρόλο στην εκτίμηση του υδατικού ισοζυγίου της εδαφικής κατατομής, στη μελέτη της κίνησης των αλάτων και των διάφορων αγροχημικών στο έδαφος, καθώς και στην διαχείριση του αρδευτικού νερού γενικότερα. Τις τελευταίες τρεις δεκαετίες έχει υπάρξει σημαντική πρόοδος στις τεχνολογίες μέτρησης της περιεκτικότητας σε νερό του εδάφους και γενικότερα των πορωδών μέσων. Το κλειδί αυτής της προόδου συνίσταται στην ικανότητα μέτρησης της  $\varepsilon'_r$  και στο γεγονός της ύπαρξης σχέσης ανάμεσα στη διηλεκτρική σταθερά του εδάφους και της περιεχόμενης υγρασίας του. Η βασική αρχή λειτουργίας των διηλεκτρικών συσκευών στηρίζεται στο γεγονός ότι η διηλεκτρική σταθερά ενός πορώδους μέσου, καθορίζεται κυρίως από την περιεκτικότητα του σε νερό αφού η διηλεκτρική σταθερά του νερού είναι περίπου 80 σε αντίθεση με τα άλλα συστατικά του εδάφους που έχουν πολύ μικρή τιμή διηλεκτρικής σταθεράς (αέρας:1, στερεά συστατικά: 2-5) (Seyfried and Murdock, 2004).

Η διηλεκτρική διαπερατότητα  $\varepsilon^*$  είναι η ιδιότητα εκείνη του διηλεκτρικού μέσου που ελέγχει τη συμπεριφορά του Η/Μ κύματος κατά τη μετάδοση του μέσα στο διηλεκτρικό. Το Η/Μ κύμα είναι δυνατόν να εκπέμπεται σε μια συχνότητα ή σε ένα εύρος συχνοτήτων. Κατά τη διέλευσή του, διαμέσου του διηλεκτρικού μέσου (π.χ. έδαφος) είναι δυνατόν να ανακλασθεί, να υποστεί περίθλαση, ή να χάσει μέρος της ενέργειάς του.

Η  $\varepsilon^*$  είναι μια μιγαδική συνάρτηση. Με  $j = \sqrt{-1}$ , η  $\varepsilon^*$  γράφεται ως εξής:

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (1)$$

Διαιρώντας την Εξ. (1) με τη διηλεκτρική διαπερατότητα του κενού  $\varepsilon_0$  ( $8.854 \cdot 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$ ) επιτυγχάνεται η αδιαστατοποίηση της (σχετική διηλεκτρική διαπερατότητα) και προκύπτει:

$$\varepsilon_r^* = \varepsilon'_r - j\varepsilon''_r \quad (2)$$

Το πραγματικό μέρος της Εξ. (2) έχει επικρατήσει να λέγεται διηλεκτρική σταθερά,  $\varepsilon'_r$ , και ισούται με την διηλεκτρική διαπερατότητα  $\varepsilon_s$  που μετρά ο αισθητήρας στις περιπτώσεις υψηλής συχνότητας λειτουργίας αισθητήρων (TDR) και σε αδρανή πορώδη μέσα όπου  $\varepsilon'_r \gg \varepsilon''_r$  (Torr et al., 1980). Σε αυτή την περίπτωση η σχέση  $\theta = f(\varepsilon'_r)$ , είναι ανεξάρτητη από τον τύπο του εδάφους, την αλατότητα κ.λ.π., εκτός των περιπτώσεων οργανικών εδαφών ή εδαφών με μεγάλη περιεκτικότητα σε σίδηρο (Torr et al., 1980). Το φανταστικό μέρος  $\varepsilon''_r$  σχετίζεται με την απώλεια ενέργειας λόγω της τάσης προσανατολισμού των διπόλων μορίων του νερού και άλλων φορτισμένων σωματιδίων στο επιβαλλόμενο εναλλασσόμενο Η/Μ πεδίο ( $\varepsilon''_{r,mr}$ ) και λόγω της ηλεκτρικής αγωγιμότητας ( $\sigma_b$ ) σε χαμηλής συχνότητας ηλεκτροστατικό πεδίο. Η  $\varepsilon''_r$  δίνεται από την σχέση:

$$\varepsilon''_r = \varepsilon''_{r,mr} + \frac{\sigma_b}{2\pi f \varepsilon_0} \quad (3)$$

όπου  $f$  είναι η συχνότητα του Η/Μ πεδίου.

Ο πρώτος όρος  $\varepsilon''_{r,mr}$  επηρεάζεται ισχυρά από τη συχνότητα  $f$  στο εύρος συχνοτήτων 10-1000 MHz σε αυτό δηλαδή που κυρίως λειτουργούν οι συμβατικές διηλεκτρικές συσκευές υπολογισμού της  $\theta$  (Kelleners et al., 2005; 2009; Logsdon, 2009). Ο δεύτερος όρος, όπως ρητά φαίνεται, είναι αντιστρόφως ανάλογος της  $f$ . Και στις δύο περιπτώσεις η  $\varepsilon''_r$  μειώνεται με την αύξηση της  $f$ . Οι σχέσεις αυτές είναι ιδιαίτερα σημαντικές αφού η μετρούμενη από τη συσκευή  $\varepsilon_s$  εξαρτάται και από τις δύο συνιστώσες της  $\varepsilon_r^*$ , δηλαδή τις  $\varepsilon'_r$  και  $\varepsilon''_r$ . Το τελικό αποτέλεσμα των διεργασιών αυτών είναι ότι η  $\varepsilon_s$  τείνει να μειώνεται καθώς η  $f$  αυ-

ξάνει, όταν η  $\varepsilon_r'$  αποκτά σημαντικές τιμές (Kelleners et al., 2009; Robinson et al., 2005). Για την TDR, η οποία λειτουργεί σε μεγάλες συχνότητες, οι Torpp et al. (1980) παρουσίασαν για τα ανόργανα πορώδη μέσα, μια εξίσωση βαθμονόμησης η οποία έχει ως εξής:

$$\theta = 0.115\sqrt{\varepsilon_r'} - 0.176 \quad (4)$$

Οι συσκευές TDR καταγράφουν το χρόνο διαδρομής της απόστασης  $2L$  (όπου  $L$  είναι το μήκος των ραβδίων), που διανύει το ηλεκτρομαγνητικό κύμα (H/M) κατά τη μετάβαση του κατά μήκος των ραβδίων και την επιστροφή του λόγω ανάκλασης στο τέρμα των ραβδίων. Ο χρόνος μετάδοσης συσχετίζεται άμεσα με την  $\varepsilon_r'$ . Πολλές διηλεκτρικές συσκευές προσδιορίζουν τις διηλεκτρικές ιδιότητες των εδαφών με διαφορετικό τρόπο από ότι οι TDR. Η κατηγορία των αισθητήρων CS615, CS625, CS655 παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον διότι λειτουργεί σαν TDR αλλά δεν χρειάζεται τον ιδιαίτερο εξοπλισμό τους (Kelleners et al., 2005).

Οι Seyfried and Murdock (2001) βρήκαν ότι για τον CS615 απαιτούνται ξεχωριστές εξισώσεις βαθμονόμησης σε 4 διαφορετικά εδάφη που εξέτασαν, για να υπάρξει ακριβής πρόβλεψη της  $\theta$ . Επίσης, οι Chandler et al. (2004) σε πειράματα αγρού βρήκαν ότι απαιτείται ξεχωριστή βαθμονόμηση ανάλογα με τον τύπο του εδάφους. Οι Kelleners et al. (2005) από την σύγκριση του CS625 και του TDR σε εδάφη του Wyoming, έδειξαν ότι η  $\varepsilon_s$  του CS655 ήταν μέχρι 187% μεγαλύτερη αυτής του TDR και ότι ο τύπος του εδάφους είχε μικρή επίδραση στις μετρήσεις του οργάνου. Επίσης, παρουσίασαν εξισώσεις με υψηλό  $R^2$ , οι οποίες συσχετίζουν την κλίση της γραμμικής σχέσης μεταξύ της  $\theta$  και της  $\varepsilon_s$  με την μέγιστη φαινόμενη ηλεκτρική αγωγιμότητα του εδάφους ( $Max \sigma_b$ ). Η γραμμικότητα της σχέσης  $\theta - \sqrt{\varepsilon_s}$  έχει παρατηρηθεί σε αρκετούς διηλεκτρικούς αισθητήρες για τα ανόργανα εδάφη (Seyfried et al., 2005; Kargas and Kerkides, 2008; Kargas et al., 2011; Kargas and Soulis, 2012; Kargas et al., 2013).

Το κύριο αντικείμενο της εργασίας είναι η βαθμονόμηση της συσκευής CS655 σε διαφορετικά εδάφη και η διερεύνηση της επίδρασης παραγόντων όπως η αλατότητα του εδάφους, στη βαθμονόμηση.

## 2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

### 2.1. Αισθητήρας CS655

Ο CS655 περιλαμβάνει δύο ραβδία μήκους 12 cm και διαμέτρου 3.2 mm, σε απόσταση 32 mm μεταξύ τους. Κάθε μέτρηση αντιστοιχεί σε  $3600 \text{ cm}^3$  όγκου εδάφους. Ο αισθητήρας μετρά την  $\theta$ , την  $\sigma_b$  και τη θερμοκρασία του εδάφους. Για τον υπολογισμό της  $\theta$  σε εύρος (5-50%) χρησιμοποιείται η εξίσωση του Torpp με ακρίβεια υπολογισμού της  $\theta$  σε  $\pm 3\%$ , για τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) του εδαφικού διαλύματος  $EC \leq 10 \text{ dS/m}$ , ενώ η ακρίβεια των μετρήσεων για την φαινόμενη ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι  $\pm 5\%$  για εύρος τιμών μέχρι  $3 \text{ dS/m}$ , ενώ το εύρος μέτρησης της θερμοκρασίας είναι από  $-10$  έως  $70^\circ\text{C}$  (Instruction manual CS650 and CS655 Water Content Reflectometers,). Η συχνότητα λειτουργίας του αισθητήρα είναι 175 MHz.

Για τις ανάγκες του πειράματος χρησιμοποιήθηκε ο καταγραφέας δεδομένων (data logger) CR850 (Instruction manual CS650 and CS655 Water Content Reflectometers).

Ο CS655 μετρά τον αριθμό των παλμών που ανακλώνται ανά δευτερόλεπτο. Ο αριθμός αυτός διαιρούμενος με έναν παράγοντα κλιμάκωσης  $S_f$  δίνεται σαν περίοδος (P) από τον καταγραφέα. Ο χρόνος μεταφοράς του σήματος δίνεται από την Εξ. (5) (Kelleners et al. 2005):

$$t = \frac{2}{f_r} = \frac{P}{S_f} = \frac{4L\sqrt{\varepsilon_s}}{c} + 2t_d \quad (5)$$

όπου  $t_d$  είναι ο χρόνος καθυστέρησης της εκπομπής μεταξύ δύο διαδοχικών σημάτων από την συσκευή και  $c$  η ταχύτητα του φωτός. Από την Εξ. (5) μπορεί να υπολογιστεί η  $\varepsilon_s$ .

## 2.2. Μετρήσεις στα υγρά

Μετρήσεις έγιναν στον αέρα ( $\varepsilon'_r=1$ ), στην αιθανόλη ( $\varepsilon'_r = 24.3$ ) και σε απεσταγμένο νερό ( $\varepsilon'_r = 80$ ). Η χρήση των ρευστών απαλλάσσει από προβλήματα επαφής του αισθητήρα τα οποία ενδεχομένως να εμφανίζονται στα εδάφη.

## 2.3. Μετρήσεις στα εδάφη

Εξετάστηκαν 4 διαφορετικοί τύποι εδαφών σε ένα εύρος υγρασιών από  $\theta = 0\%$  έως τον κορεσμό. Η τιμή της υγρασίας κορεσμού είναι διαφορετική σε κάθε έδαφος. Τα ξηρά εδαφικά δείγματα αναμίχθηκαν με διαφορετικές προεπιλεγμένες ποσότητες νερού και τοποθετήθηκαν σε στήλες PVC ύψους 30 cm και διαμέτρου 20 cm. Με την μέθοδο αυτή αποκτήθηκε ικανός αριθμός μετρήσεων της  $\varepsilon_s$ ,  $\theta$  και της περιόδου  $P$  (Kargas and Soulis, 2012). Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του νερού  $EC_w$  που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα είναι 0.28 dS/m.

Η βαθμονόμηση της συσκευής βασίστηκε στην παρακάτω Εξ. (6) η οποία έχει χρησιμοποιηθεί εκτεταμένα για την TDR και άλλες διηλεκτρικές συσκευές (Ledieu et al., 1986; Kargas et al., 2011; Kargas and Soulis, 2012).

$$\theta = a\sqrt{\varepsilon'_r} + b \quad (6)$$

όπου οι παράμετροι  $a$  και  $b$  εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του μέσου.

Με την ίδια πειραματική διάταξη εκτιμήθηκε και η ευαισθησία της συσκευής στην αλατότητα, στο πηλώδες και το αμμώδες πορώδες μέσο. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιήθηκαν, διαλύματα KCl με  $EC_w$  1.17, 3.6, 6.1 και 12 dS/m.

## 2.4. Μέθοδος των Kelleners et al. (2005)

Η Εξ. (5) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της  $\varepsilon_s$  και της  $P$  όταν το μήκος των ραβδίων ( $L$ ) και ο χρόνος  $t_d$  είναι γνωστά. Το μήκος των ραβδίων είναι 12 cm αλλά από το Η/Μ κύμα καταγράφεται ένα μήκος ελαφρά διαφορετικό. Το μήκος αυτό μπορεί να υπολογιστεί από την Εξ. (5) όταν γίνει αφαίρεση των μετρήσεων στο απεσταγμένο νερό αυτών του αέρα, με μια εξίσωση της μορφής:

$$L = \frac{c(P_w - P_a)}{4S_f(\sqrt{\varepsilon_w} - \sqrt{\varepsilon_a})} \quad (7)$$

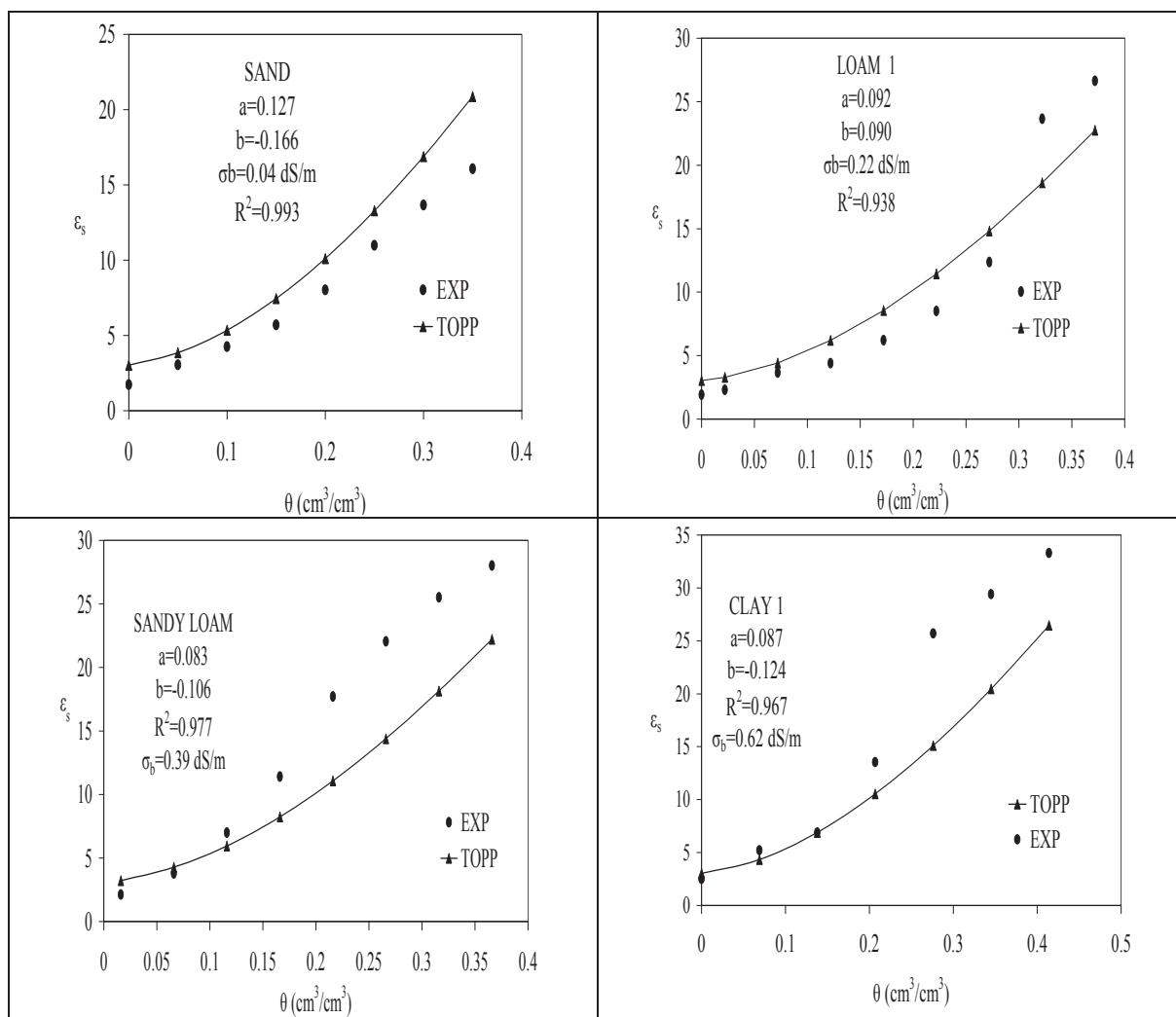
Εφόσον υπολογιστεί η τιμή του  $L$ , ο  $t_d$  υπολογίζεται από την Εξ. (5) με την βοήθεια των μετρήσεων στο νερό ή στον αέρα. Μετά την εύρεση των παραπάνω παραμέτρων ο υπολογισμός της  $\varepsilon_s$  γίνεται με την βοήθεια της Εξ. (5).

## 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

### 3.1. Ειδική βαθμονόμηση του CS655

Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται η σχέση μεταξύ της  $\varepsilon_s$  και της  $\theta$  καθώς και η μέγιστη τιμή της φαινόμενης ηλεκτρικής αγωγιμότητας ( $\sigma_b$ ) για κάθε πορώδες μέσο.





**Σχήμα 1.** EXP: Η σχέση μεταξύ της μετρούμενης  $\theta$  και της  $\epsilon_s$  για τα 4 πορώδη μέσα: sand (αμμώδες), Loam1 (πηλώδες), Sandy Loam (αμμοπηλώδες), Clay1 (αργιλώδες). TOPP: Η σχέση μεταξύ της μετρούμενης  $\theta$  και της  $\epsilon_s$  όπως προβλέπεται από την εξίσωση των Topp et al. (1980) TOPP.

Από το Σχήμα 1 προκύπτει ότι η τιμή της κλίσης  $a$  (Εξ. 6) είναι για κάθε έδαφος, εκτός της άμμου, μικρότερη από αυτή των Topp and Reynolds (1998) ( $a = 0.115$ ). Οι μικρές τιμές της κλίσης  $a$  υποδηλώνουν ότι ο CS655 καταγράφει υψηλότερες τιμές  $\epsilon_s$  συγκριτικά με την TDR. Η μέγιστη διαφορά ανάμεσα στον CS655 και την εξίσωση των Topp et al. (1980) είναι περίπου 12 διηλεκτρικές μονάδες και η διαφορά αρχίζει να εμφανίζεται σε τιμές  $\theta$  μεγαλύτερες από 0.20-0.25  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ . Το φαινόμενο αυτό μπορεί να αποδοθεί εν μέρει στην χαμηλότερη συχνότητα λειτουργίας του CS655 ( $f < 175 \text{ MHz}$ ). Επιπλέον, λόγω της σχετικά χαμηλής συχνότητας λειτουργίας του CS655, στην αύξηση της  $\epsilon_s$  μπορεί να συμβάλλει και ο όρος

$\frac{\sigma_b}{2\pi f \epsilon_0}$  (Εξ. 3) (Topp et al., 2000). Επίσης, στην αύξηση των τιμών της  $\epsilon_s$  μπορεί να συμβάλει

και ο σχεδιασμός του ηλεκτρονικού κυκλώματος του αισθητήρα (Kelleners et al., 2009). Το μέγεθος της παρατηρούμενης διαφοράς είναι μεγαλύτερο από αυτό που διαπιστώθηκε σε έδαφος silty loam με τον CS616 που λειτουργεί στην ίδια συχνότητα με τον CS655 (Kelleners et al., 2005).

Η επίδραση του τύπου του εδάφους (Πίνακας 1) φαίνεται να μην είναι σημαντική εφόσον οι κλίσεις της εξίσωσης μεταβάλλονται σχεδόν ασήμαντα, από 0.083 έως 0.092, ενώ το σημείο τομής στον άξονα  $\psi$  από 0.090 έως 0.124, ανάλογα με το είδος του εδάφους. Διαφορές όμως προκύπτουν στις τιμές που λαμβάνονται για την άμμο, σε σχέση με τα υπόλοιπα εδάφη.

Οι υψηλές τιμές του  $R^2 > 0.938$  (Πίνακας 1) δείχνουν ότι η ειδική βαθμονόμηση μπορεί να γίνει με την αξιοποίηση της εξίσωσης των Torp end Reynolds (1998).

**Πίνακας 1.** Οι τιμές της κλίσης, του σημείου τομής και του  $R^2$  της ειδικής βαθμονόμησης

Τύπος Εδάφους	Κλίση a	Σημείο Τομής b	Συντελεστής $R^2$
Sand	0.125	0.157	0.997
Loam1	0.092	0.090	0.938
Clay1	0.087	0.124	0.967
Sandy Loam	0.083	0.106	0.977

Για την εκτίμηση της μεθόδου βαθμονόμησης υπολογίστηκε η στατιστική παράμετρος RMSE η οποία δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left( \hat{\theta}_i - \theta_{m_i} \right)^2}{n}} \quad (8)$$

όπου  $\hat{\theta}_i$  είναι η προβλεπόμενη τιμή της  $\theta$ ,  $\theta_{m_i}$  είναι η πραγματική τιμή της  $\theta$  και  $n$  είναι ο αριθμός των παρατηρήσεων. Από τον Πίνακα 2 προκύπτει ότι οι τιμές του RMSE από την βαθμονόμηση του CS655 κυμαίνονται από 0.01 έως 0.028  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ . Σε όλες τις περιπτώσεις οι τιμές είναι μικρότερες από 0.03  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ .

**Πίνακας 2.** Οι τιμές του RMSE για την ειδική βαθμονόμηση του CS655 και για τη μέθοδο Kellener

Τύπος Εδάφους	Ειδική Βαθμονόμηση $\text{cm}^3/\text{cm}^3$	Μέθοδος Kellener $\text{cm}^3/\text{cm}^3$
Sand	0.010	0.013
Loam1	0.028	0.029
Clay1	0.025	0.026
Sandy Loam	0.017	0.018

### 3.2. Η επίδραση της αλατότητας

Από τις μετρήσεις σε διαλύματα αυξημένης  $EC_w$ , προκύπτει ότι ο CS655 δίνει σταθερές τιμές  $\varepsilon_s$  (80-81) με την αύξηση της  $EC_w$  μέχρι την τιμή 3 dS/m. Για μεγαλύτερες τιμές της  $\sigma_b$  ο αισθητήρας τίθεται εκτός λειτουργίας. Συνεπώς, η τιμή 3 dS/m της  $\sigma_b$  φαίνεται να είναι το ανώτερο όριο λειτουργίας του αισθητήρα. Το ίδιο όριο έχει παρατηρηθεί και σε άλλους αισθητήρες (Kargas et al., 2011 για τον αισθητήρα WET, Seyfried and Murdock (2004) για τον Hydra Probe και Hilhorst (2000) για τον Sigma probe ).

Από τα πειράματα στο αμμώδες και το πηλώδες έδαφος σε διαφορετικά επίπεδα  $EC_w$  προέκυψε ότι η σχέση  $\theta_m - \sqrt{\varepsilon_s}$  είναι γραμμική για όλα τα επίπεδα EC και Max  $\sigma_b$  (Πίνακας 3).

**Πίνακας 3.** Τιμές της κλίσης και του σημείου τομής σε διάφορα επίπεδα αλατότητας για τα δύο εδάφη

EC <sub>w</sub> (dS/m)	Αμμώδες (Sand)			Πηλώδες (Loam1)		
	a	b	Max σ <sub>b</sub> dS/m	a	b	Max σ <sub>b</sub> dS/m
0	0.127	0.166	0.040	0.092	0.090	0.220
0.28	0.125	0.157	0.050	0.092	0.091	0.250
1.17	0.131	0.169	0.190	0.094	0.101	0.430
3.6	0.141	0.186	0.630	0.093	0.103	0.860
6.1	0.172	0.237	0.900	0.093	0.097	1.480
12				0.076	0.067	2.690

Για το πηλώδες έδαφος οι παράμετροι της γραμμικής σχέσης διατηρούνται σχεδόν ίδιοι μέχρι ένα επίπεδο σ<sub>b</sub> περίπου 1.5 dS/m. Από την τιμή αυτή και πάνω υπάρχει σημαντική αλλαγή. Πιο συγκεκριμένα, η κλίση και το σημείο τομής μέχρι την μέγιστη τιμή της σ<sub>b</sub> = 1.48 dS/m (για EC=6.1 dS/m και θ=0.416 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>) έχουν μικρό εύρος μεταβολής και κυμαίνονται μεταξύ 0.092-0.094 και 0.90-0.103, αντίστοιχα. Για μεγαλύτερες μέγιστες τιμές σ<sub>b</sub> (για EC=12 dS/m και θ=0.416 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>) φαίνεται ότι οι τιμές των παραμέτρων μεταβάλλονται σημαντικά (a = 0.076 και b = 0.067). Στην περίπτωση της άμμου η συμπεριφορά είναι αντίθετη, διότι με την αύξηση της EC παρατηρείται μείωση της ε<sub>s</sub>. Οι τιμές της κλίσης αυξάνονται από 0.127 έως 0.172 ενώ του σημείου τομής από 0.157 έως 0.237. Η συμπεριφορά αυτή στην άμμο είναι δύσκολο να εξηγηθεί. Η μέγιστη διαφορά για το πηλώδες έδαφος στις τιμές της ε<sub>s</sub> συγκριτικά με τις τιμές της εξίσωσης των Torpp et al. (1980) ήταν 4 διηλεκτρικές μονάδες για EC=0.28 dS/m, ενώ όταν η διαβροχή έγινε με EC=12 dS/m η διαφορά αυτή ήταν 12 μονάδες. Τα αποτελέσματα αυτά υποδηλώνουν την επίδραση της σ<sub>b</sub> στην λειτουργία του CS655.

### 3.3. Μεθοδολογία KELLENNERS

Από τις μετρήσεις της περιόδου P στον αέρα και σε απεσταγμένο νερό με την εφαρμογή της Εξ. (7) βρίσκουμε το μήκος L των ραβδίων του CS655 το οποίο είναι 0,1157 m. Στην συνέχεια με την βοήθεια της Εξ.(5) και του μήκους L βρίσκουμε τον t<sub>d</sub> = 3.4 nS. Στην συνέχεια η ε<sub>s</sub> υπολογίζεται από την περίοδο P με την επίλυση της Εξ. (5). Γνωρίζοντας ότι η μέθοδος δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε εδάφη με υψηλή σ<sub>b</sub> την χρησιμοποιήσαμε για την περίπτωση EC = 0.28 dS/m. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι σε όλα τα εδάφη οι τιμές της ε<sub>s</sub> ήταν σχεδόν ίδιες με αυτές της βιομηχανικής βαθμονόμησης. Επιπλέον από την εξέταση στο πηλώδες έδαφος σε διαφορετικές EC<sub>w</sub> φαίνεται ότι οι τιμές της ε<sub>s</sub> με την μέθοδο Kellenners και αυτές που δίνει ο αισθητήρας παραμένουν σχεδόν ίδιες μέχρι μια μέγιστη σ<sub>b</sub> περίπου 0.8 dS/m. Από την τιμή αυτή και πάνω οι τιμές της ε<sub>s</sub> που προκύπτουν από την μεθοδολογία Kellenners είναι πολύ μεγαλύτερες ιδιαίτερα στις μεγάλες θ συγκριτικά με τις βιομηχανικές, λόγω επίδρασης της σ<sub>b</sub> στην περίοδο P (Kellenners et al., 2005).

## 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η βαθμονόμηση της συσκευής CS655 μπορεί να γίνει με την γραμμική εξίσωση η οποία έχει χρησιμοποιηθεί εκτεταμένα για την TDR και άλλες διηλεκτρικές συσκευές. Η επίδραση του τύπου του εδάφους φαίνεται να μην είναι σημαντική εφόσον οι κλίσεις της εξίσωσης μεταβάλλονται σχεδόν ασήμαντα, από 0.083 έως 0.092, ενώ το σημείο τομής στον άξονα ψ από 0.090 έως 0.124, ανάλογα με το είδος του εδάφους. Για το πηλώδες έδαφος οι παράμετροι της γραμμικής σχέσης διατηρούνται σχεδόν ίδιοι μέχρι ένα επίπεδο σ<sub>b</sub> περίπου 1.5 dS/m. Από την τιμή αυτή και πάνω υπάρχει σημαντική αλλαγή. Επιπλέον από την εξέταση

στο πηλώδες έδαφος σε διαφορετικές  $EC_w$  φαίνεται ότι οι τιμές της  $\epsilon_s$  με την μέθοδο Kelleners και αυτές που δίνει ο αισθητήρας παραμένουν σχεδόν ίδιες μέχρι μια μέγιστη  $\sigma_b$  περίπου 0.8 dS/m.

### Βιβλιογραφία

- Chandler D.G., M. Seyfried, M. Murdock and J.P. McNamara. 2004. *Field calibration of water content reflectometers*. Soil Sci. Soc. Am. J. 68:1501-1507.
- Hilhorst M.A. 2000. *A pore water conductivity sensor*. Soil Science Society of America Journal 64: 1922-1925.
- Instruction manual, CS650 and CS655 Water Content Reflectometers Revision: 2/14, Copyright 2011 – 2014, Campbell Scientific, Inc.
- Kargas, G. and Kerkides, P., 2008. *Water content determination in mineral and organic porous media by ML2 theta probe*. Irrigation and Drainage 57, 435–449.
- Kargas, G., Kerkides, P., Seyfried, M.S. and Sgoumbopoulou, A., 2011. *WET sensor performance in organic and inorganic media with heterogeneous moisture distribution*. Soil Science Society of America Journal, 75, 1244–1252.
- Kargas, G. and Soulis, K., 2012. *Performance analysis and calibration of a new low-cost capacitance soil moisture sensor*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 138, 632–641.
- Kargas, G., Ntoulas, N. and Nektarios, P., 2013. *Soil texture and salinity effects on calibration of TDR300 dielectric moisture sensor*. Soil Research, 51(4), 330-340.
- Kelleners, T, Seyfried M, Blonquist J, Bilskie J, Chandler D., 2005. *Improved interpretation of water content reflectometer measurements in soils*. Soil Science Society of America Journal, 69, 1684–1690.
- Kelleners, T, Paige G.B., Gray S.T., 2009. *Measurement of the dielectric properties of Wyoming soils using electromagnetic sensors*. Soil Science Society of America Journal, 73, 1626–1637.
- Ledieu J, de Ridder P, de Clerck P, Dautrebande S., 1986. *A method of measuring soil moisture by time-domain reflectometry*. Journal of Hydrology 88, 319–328.
- Logsdon S.D., 2009. *CS616 calibration: field versus laboratory*. Soil Science Society of America Journal 73, 1–6.
- Robinson D.A., Jones SB, Blonquist JM, Friedman S.P., 2005. *A physical derived water content/permittivity calibration model for coarse – textured layered soils*. Soil Science Society of America Journal 69, 1372–1378.
- Seyfried M.S., Murdock M.D., 2001. *Response of a new soil water sensor to variable soil, water content and temperature*. Soil Science Society of America Journal 65, 28–34.
- Seyfried M.S., Murdock M.D., 2004. *Measurement of soil water content with a 50-MHz soil dielectric sensor*. Soil Science Society of America Journal 68, 394–403.
- Seyfried MS, Grant LE, Du E, Humes K., 2005. *Dielectric loss and calibration of the hydra probe soil water sensor*. Vadose Zone Journal 4, 1070–1079.
- Topp G.C., Davis J.L., Annan A.P., 1980. *Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines*. Water Resources Research 16, 574–582.
- Topp G.C., Reynolds W.D., 1998. *Time domain reflectometry: a seminal technique for measuring mass and energy in soil*. Soil and Tillage Research, 47, 125–132.
- Topp G.C., Zegelin S., White I., 2000. *Impacts of the real and imaginary components of relative permittivity on time domain reflectometry measurements in soils*. Soil Science Society of America Journal 64, 1244–1252.

## ΜΙΑ ΓΡΗΓΟΡΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΑΛΑΤΟΤΗΤΑΣ ΑΠΟ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΗΣ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ triSCAN

Γ. Κάργας<sup>1,✉</sup>, Γ. Μπουραζάνης<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο  
Αθηνών, Ιερά Οδός 75, 11855 Αθήνα, ✉ kargas@aua.gr

<sup>2</sup>Δ/νση Αγροτικής Οικονομίας & Κτηνιατρικής, Περιφερειακή Ενότητα Λακωνίας, Περιφέρεια  
Πελοποννήσου, 2<sup>ο</sup> χλμ. Σπάρτης Γυθείου, 23100 Σπάρτη

### Περίληψη

Ο διηλεκτρικός αισθητήρας TriSCAN παρέχει την δυνατότητα ταυτόχρονων μετρήσεων της εδαφικής υγρασίας ( $\theta$ ) και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του εδαφικού διαλύματος. Για τον υπολογισμό της εδαφικής αλατότητας η συσκευή παρέχει πρωτογενείς μετρήσεις (VIC) οι οποίες πρέπει να συσχετιστούν με την μέτρηση της εδαφικής αλατότητας σε εκχύλισμα κορεσμού (ECe). Όμως η προτεινόμενη μέθοδος από τους κατασκευαστές για την συσχέτιση είναι πολύπλοκη και δύσκολη. Στην παρούσα εργασία διερευνάται μια γρηγορότερη και πιο απλή μέθοδος. Κατά την μέθοδο αυτή χρησιμοποιείται ένας άλλος διηλεκτρικός αισθητήρας (WET) ο οποίος παρέχει την δυνατότητα υπολογισμού της  $\theta$  και της φαινόμενης ηλεκτρικής αγωγιμότητας του εδάφους ( $\sigma_b$ ). Με την βοήθεια του αισθητήρα WET γίνεται συσχέτιση της  $\sigma_b$  –VIC. Από τα καταρχήν πειραματικά δεδομένα προέκυψε ότι η σχέση μεταξύ  $\sigma_b$  – VIC είναι αρκετά γραμμική ( $R^2=0.692$ ).

*Λέξεις κλειδιά:* Διηλεκτρικοί αισθητήρες, Αλατότητα

## A NEW METHOD FOR EVALUATION SOIL SALINITY USING DIELECTRIC DEVICE triSCAN

G. Kargas<sup>1,✉</sup>, G. Bourazanis<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Agricultural University of Athens, Sector of water resources management, ✉ kargas@aua.gr

<sup>2</sup>Department of Rural Economy and Veterinary of Regional Government of Laconia, Sparta, 23100, Laconia

### Abstract

The dielectric sensor TriSCAN enables simultaneous measurements of soil moisture ( $\theta$ ) and soil salinity. For the calculation of soil salinity device provides primary measurements (VIC) that should be associated with the measurement of soil salinity in the saturation extract (ECe). However, the method proposed by the manufacturers for the correlation is complex and difficult. This paper studies a faster and simpler method. In this method, another dielectric sensor is used (WET) which enables calculation of  $\theta$  and apparent electrical conductivity of the soil ( $\sigma_b$ ). By means of the WET sensor EC<sub>b</sub> and VIC can be correlated. From the first experimental data showed that the relationship between  $\sigma_b$  – VIC is quite linear ( $R^2 = 0.692$ )

*Key words:* Dielectric sensor, Salinity



## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι συσκευές TDR καθώς και πολλές διηλεκτρικές συσκευές έχουν την δυνατότητα, η οποία αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα, να μετρούν στο ίδιο εδαφικό όγκο ταυτόχρονα με την διηλεκτρική σταθερά και την φαινόμενη ηλεκτρική αγωγιμότητα  $\sigma_b$  η οποία εξαρτάται από την υγρασία  $\theta$ , την ηλεκτρική αγωγιμότητα του εδαφικού διαλύματος ( $\sigma_p$ ), και τις εδαφικές ιδιότητες που σχετίζονται με την προσρόφηση των ιόντων στα ορυκτά της αργίλου. Έχουν προταθεί διάφορα μοντέλα τα οποία συσχετίζουν την  $\sigma_b$  με την  $\sigma_p$  (Rhoades et al., 1976; Rhoades et al., 1989; Muallem and Friedman, 1991; Malicki et al., 1994; Malicki and Walczak, 1999; Hilhorst, 2000; Amente et al., 2000).

Η ακρίβεια αυτών των μοντέλων με δεδομένα διηλεκτρικών συσκευών έχει εξεταστεί εκτεταμένα τα τελευταία χρόνια (Kargas and Kerkides, 2012).

Μερικοί διηλεκτρικοί αισθητήρες (profiler) παρέχουν επιπλέον την δυνατότητα του υπολογισμού της αλατότητας κατά βάθος μέχρι το 1 m. Με τον τρόπο αυτό αποκτάται το προφίλ της εδαφικής αλατότητας μαζί με το προφίλ της εδαφικής υγρασίας. Στην όλη διαδικασία κρίσιμο ζήτημα αποτελεί η συγκεκριμένη βαθμονόμηση της συσκευής ώστε να εξασφαλίζεται η αξιοπιστία των μετρήσεων.

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται μια εναλλακτική βαθμονόμηση της συσκευής triSCAN. Για την επίτευξη του σκοπού αυτού γίνεται ένας συνδυασμός των μετρήσεων της triSCAN με μια άλλη διηλεκτρική συσκευή (WET)

## 2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

### 2.1. Η συσκευή triSCAN

Για την καταγραφή μετρήσεων η συσκευή εισέρχεται μέσα σε πλαστικό σωλήνα ο οποίος έχει τοποθετηθεί μόνιμα στο έδαφος στην επιθυμητή θέση καταγραφής της υγρασίας ( $\theta$ ) και της αλατότητας. Η συσκευή παρέχει την δυνατότητα απόκτησης μετρήσεων κατά βάθος ανά διαστήματα συνήθως 100 mm.

Σε κάθε βάθος καταγράφονται δύο μετρήσεις-σήματα. Το πρώτο από αυτά σχετίζεται με τον υπολογισμό της  $\theta$  ενώ το δεύτερο (Volumetric Ion Content (VIC)) είναι ανάλογο των αλλαγών της  $\theta$  και της αλατότητας. Οι μετρήσεις VIC μπορούν να συσχετιστούν με την ηλεκτρική αγωγιμότητα, με την λήψη εδαφικών δειγμάτων και τον προσδιορισμό της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στο εκχύλισμα κορεσμού (ECe).

Το εύρος τιμών της ECe το οποίο μπορεί να υπολογιστεί από την συσκευή είναι από 0 έως 17 dS/m για αμμώδη, αμμοπηλώδη και πηλοαμμώδη εδάφη (TriSCAN Agronomic User Manual Version 1.2a., 2003).

Για την βαθμονόμηση της συσκευής προτείνεται από την κατασκευάστρια εταιρεία η εξής διαδικασία:

Επιλέγονται δύο σημεία του χωραφίου στα οποία να μην παρουσιάζεται εδαφική παραλλακτικότητα. Τοποθετούνται δύο σωλήνες του triscan σε απόσταση περίπου 5m μέτρων. Τοποθετείται διαδοχικά σε κάθε σωλήνα η συσκευή και παραμένει εκεί παίρνοντας μέσω του καταγραφέα μετρήσεων (data logger) μετρήσεις για 10 min και μέσω αυτών των μετρήσεων ελέγχεται η ομοιομορφία των δύο θέσεων ανά αισθητήρα. Στην συνέχεια αφαιρείται ο αισθητήρας και τοποθετείται στην κεφαλή των σωλήνων μεταλλικός ή πλαστικός δακτύλιος ο οποίος εισχωρεί στο έδαφος μερικά εκατοστά για να αποφευχθεί η οριζόντια διαφυγή νερού. Προσθέτονται 25 Lt αρδευτικού ύδατος μικρής αγωγιμότητας

στον ένα δακτύλιο και 25 Lt διαλύματος  $\text{NH}_3\text{NO}_4$  (λίπασμα) στον άλλο δακτύλιο με αγωγιμότητα  $5\text{-}10 \text{ dSm}^{-1}$ . Η ποσότητα των 25 Lt μπορεί να αυξηθεί αν δεν επαρκεί για να φτάσει το μέτωπο διαβροχής στο βαθύτερο αισθητήρα. Ακολουθώντας αφήνονται οι δύο κατατομές να στραγγίσουν για 24-48 h ανάλογα με τις ταχύτητες διήθησης. Τοποθετείται ο αισθητήρας διαδοχικά σε κάθε σωλήνα και λαμβάνονται μέσω του data logger τιμές επί δεκάλεπτο με χρονικό βήμα λεπτού. Μετά το βήμα αυτό αφαιρούνται εδαφικά δείγματα με δειγματολήπτη περιφερειακά των δύο σωλήνων του οργάνου (access tubes) ανά βάθος αισθητήρα. Πρέπει να δοθεί μεγάλη προσοχή κατά τη δειγματοληψία ώστε αυτή να γίνει στο επίπεδο του αισθητήρα. Τα δείγματα οδηγούνται στο εργαστήριο και προσδιορίζεται η ηλεκτρική αγωγιμότητα της πάστας κορεσμού. Εναλλακτική διαδικασία της περιγραφείσας είναι ο προσδιορισμός της EC στην αναλογία (1:5). Προσδιορίζεται ακολούθως ο μέσος όρος των τιμών Volumetric ion Content (VIC) που μετρήθηκαν με τον αισθητήρα στο δεκάλεπτο και αντιστοιχίζονται με τις τιμές ECe.

Οι προτεινόμενες βιομηχανικές εξισώσεις υπολογισμού της ECe αν έχει μετρηθεί η EC(1:5) είναι

$$\text{ECe} = \text{EC}_{1:5} \times \text{WCF} \quad (1)$$

$$\text{WCF} = -2.21 \times \% \text{CLAY}^{0.5} + 23.78 \quad (2)$$

Ενώ απευθείας υπολογισμός της ECe από τις μετρήσεις VIC δίνεται από την εξίσωση

$$\text{ECe} = 1.095.5 \times \text{VIC} - 50.157 \quad (3)$$

Βέβαια υπογραμμίζεται από την κατασκευάστρια εταιρεία ότι η εξ. (3) θα είναι διαφορετική σε κάθε διαφορετικό τύπο εδάφους αλλά τέτοιες εξισώσεις ακόμα δεν προτείνονται.

## 2.2. Εναλλακτική βαθμονόμηση με την βοήθεια του αισθητήρα WET

Πρόκειται για έναν καινούριο διηλεκτρικό αισθητήρα, που εκτιμά τη διηλεκτρική σταθερά, την  $\sigma_b$  με ηλεκτρομαγνητικό κύμα συχνότητας 20MHz. Ο αισθητήρας ανιχνεύει τις μεταβολές στο ηλεκτρομαγνητικό κύμα και στέλνει την πληροφορία αυτή στο μετρητή υγρασίας HH2, με τον οποίο είναι συνδεδεμένος (Delta –T Devices Ltd, 2005). Η  $\sigma_p$  υπολογίζεται από το γραμμικό μοντέλο (Hilhorst, 2000) το οποίο εφαρμόζεται για  $\theta > 0.1 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ . Οι μετρήσεις του αισθητήρα WET για την  $\sigma_b$  μπορούν να θεωρηθούν εξίσου καλές με αυτές της μεθόδου TDR, σύμφωνα με τους Regalado et al. (2007).

Με την βοήθεια του αισθητήρα WET κατά το Φθινόπωρο του 2014 ελήφθησαν μετρήσεις της  $\sigma_b$  κοντά στο ανώτερο σημείο μετρήσεων (10 cm) της triSCAN. Ταυτόχρονα ελήφθησαν μετρήσεις των τιμών VIC από την συσκευή triSCAN. Έτσι γίνεται προσπάθεια συσχέτισης των τιμών της  $\sigma_b$  με τις τιμές VIC της συσκευής triSCAN για το βάθος των 10 cm.

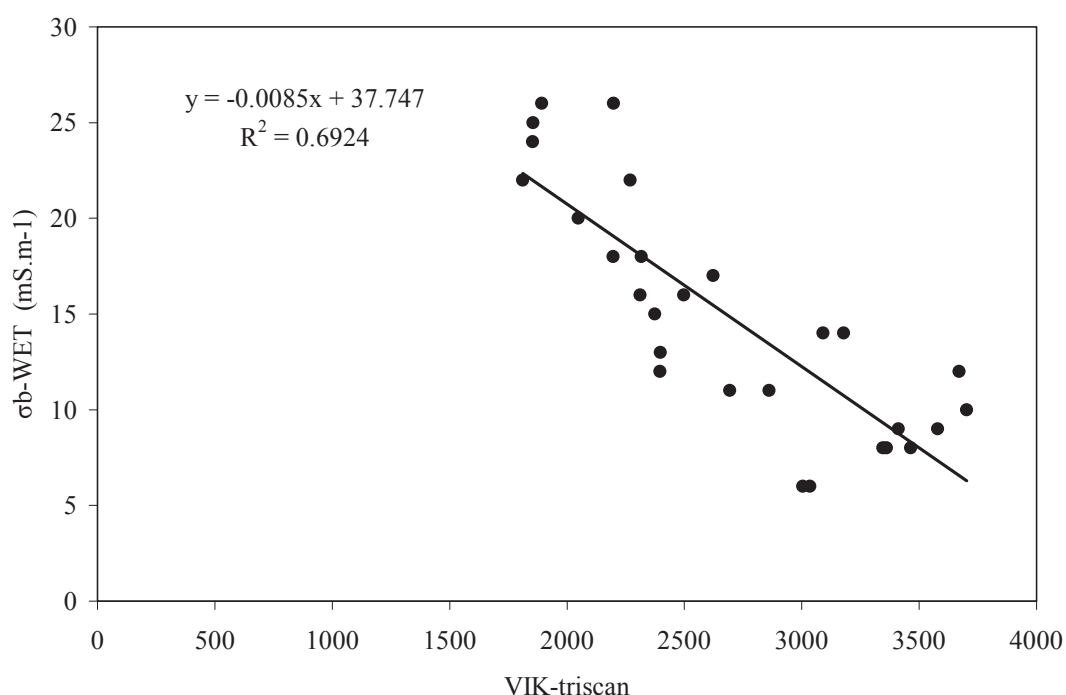
Οι μετρήσεις έγιναν σε πειραματικό αγρό με αργιλοπηλώδες έδαφος (Άργιλος 31%, Ιλύς 49% και άμμος 20%) με  $\text{ECe} = 0.6 \text{ dS.m}^{-1}$  στην περιοχή της Λακωνίας.

## 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στο σχήμα 1 παρουσιάζονται τα δεδομένα των μετρήσεων καθώς και η σχέση μεταξύ  $\sigma_b$ -VIC. Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι η σχέση μεταξύ  $\sigma_b$ -VIC είναι γραμμική με  $R^2 = 0.692$ .

Τα καταρχήν αυτά αποτελέσματα που δείχνουν την ύπαρξη γραμμικής σχέσης μεταξύ sb-VIC είναι αρκετά ενθαρρυντικά αλλά πρέπει να γίνει διερεύνηση σε περισσότερους τύπους εδαφών καθώς και κατά βάθος. Επιπλέον είναι αναγκαία η διερεύνηση της σχέσης σε μεγαλύτερο εύρος τιμών της αλατότητας διότι το εύρος των μεταβολών της sb στο συγκεκριμένο αγρό ήταν σχετικά μικρό.

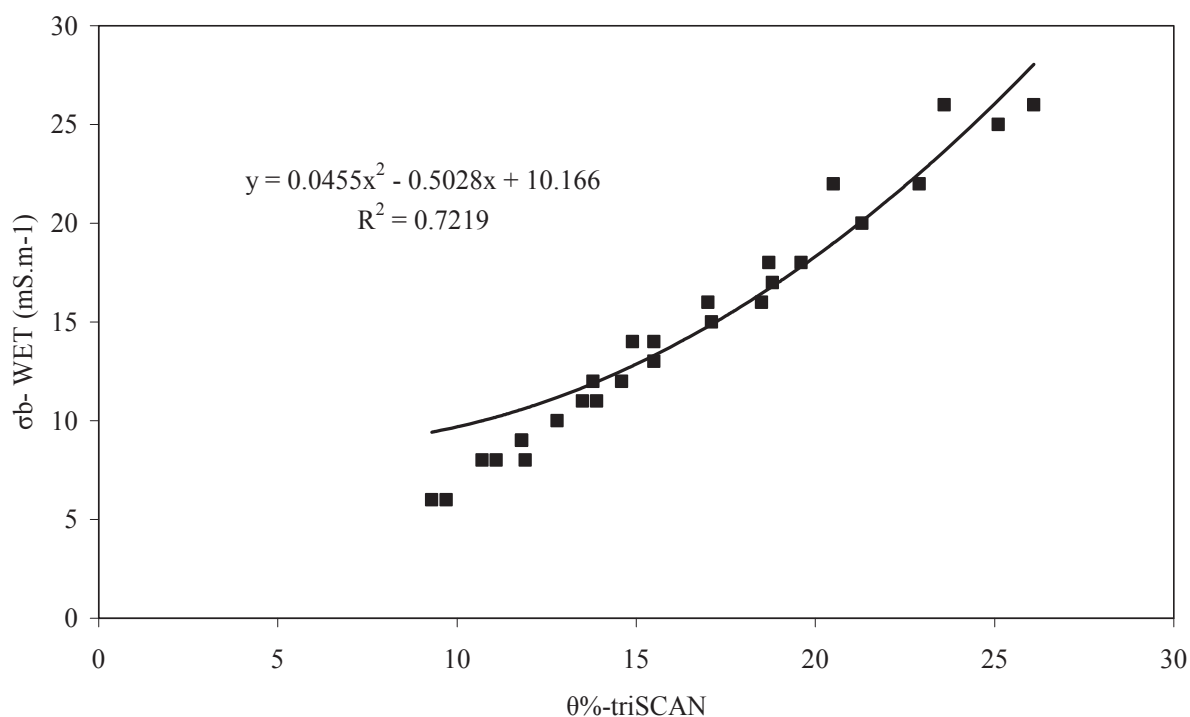
Στην συνέχεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα από τα γνωστά μοντέλα πρόβλεψης της  $s_p$  από τα δεδομένα της sb. Η εφαρμογή του γραμμικού μοντέλου (Hilhorst, 2000) έδωσε τιμές της  $s_p$  από 1.30 έως 1.60 dS.m<sup>-1</sup>. Εάν θεωρήσουμε ότι η τιμή της  $s_p$  στο σημείο ιδατοικανότητας είναι διπλάσια από αυτήν της πάστας κορεσμού (USDA, 1954) τότε το γραμμικό μοντέλο (Hilhorst, 2000) προβλέπει σχετικά σωστά την ηλεκτρική αγωγιμότητα του εδαφικού διαλύματος.



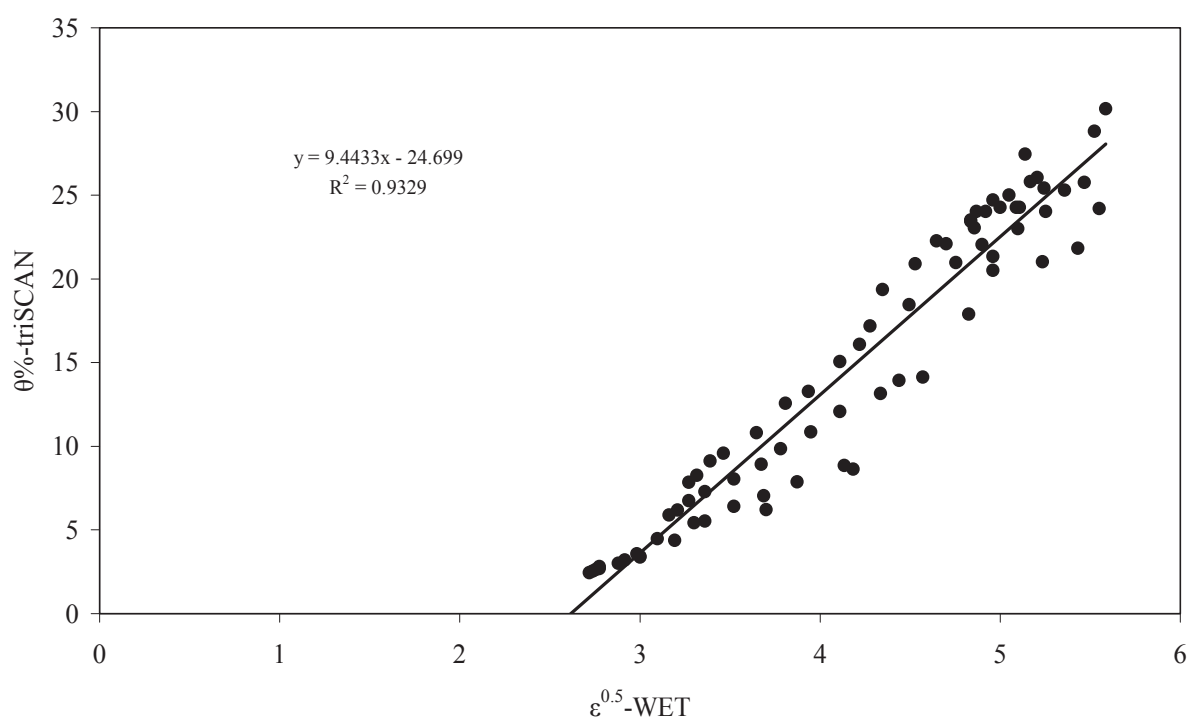
**Σχήμα 1.** Η σχέση μεταξύ της sb όπως μετρήθηκε από την WET και των τιμών VIC από την συσκευή triSCAN.

Για τον έλεγχο της αξιοπιστίας των μετρήσεων διερευνήθηκε επιπλέον η σχέση μεταξύ της  $\theta$  όπως υπολογίστηκε από τον αισθητήρα triSCAN και της sb όπως μετρήθηκε από τον WET (Σχήμα 2). Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι η σχέση έχει την μορφή την οποία προβλέπει το μοντέλο των Rhoades et al.(1976).

Από την σύγκριση των δύο αισθητήρων στην πρόβλεψη της  $\theta$  προέκυψε ότι μεταξύ τους υπάρχει σημαντική απόκλιση στην εκτίμηση της. Ο αισθητήρας triSCAN υπολογίζει σαφώς μικρότερες τιμές συγκριτικά με τον WET. Επειδή ο triSCAN δεν δίνει τιμές της διηλεκτρικής σταθεράς ( $\epsilon$ ) διερευνήθηκε η σχέση  $\theta$  και  $\sqrt{\epsilon}$  μεταξύ των τιμών της  $\theta$  από τον triSCAN και των τιμών της  $\epsilon$  από τον WET. Από τα αποτελέσματα (Σχήμα 3) φαίνεται ότι η σχέση αυτή είναι ισχυρά γραμμική ( $R^2=0.933$ ), με συνέπεια να είναι σχετικά εύκολη και η βαθμονόμηση της συσκευής triSCAN για την πρόβλεψη της  $\theta$ . Για τον αισθητήρα WET έχει ήδη τεκμηριωθεί μια ανάλογη σχέση (Kargas et al., 2014)



**Σχήμα 2.** Η σχέση της  $\theta$  όπως υπολογίστηκε από την triSCAN και των τιμών  $\sigma_b$  όπως μετρήθηκαν από την WET.



**Σχήμα 3.** Η σχέση μεταξύ των τιμών  $\theta\%$  (triSCAN) και της τετραγωνικής ρίζας της  $\varepsilon$  (WET)

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία γίνεται μια προσπάθεια συσχέτισης σε έδαφος αργιλοπηλώδες των πρωτογενών μετρήσεων της συσκευής triSCAN με τις τιμές της φαινόμενης ηλεκτρικής αγωγιμότητας όπως μετρώνται από άλλον αισθητήρα (WET). Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι προκύπτει σχετικά καλή γραμμική σχέση. Τα αποτελέσματα αυτά πρέπει να εξεταστούν σε διαφορετικούς τύπους εδαφών καθώς και μεγαλύτερες τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας του εδαφικού διαλύματος.

#### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Amente G, Baker M and Reece, C., 2000. *Estimation of soil electrical conductivity from bulk soil electrical conductivity in sandy soil*. Soil Sci. Soc. Amer. Journal 64:1931-1939.
- Delta –T Devices Ltd. 2005. Low road Burwell CAMBRIDGE CB5 0EJ.
- UKwww:http://www.delta-t.co.uk. User manual for the WET sensor (type WET-2),2005.
- Hilhorst M.A., 2000. *A pore water conductivity sensor*. Soil Sci. Soc. Amer. Journal 64: 1922-1925.
- Kargas, G. and Kerkides, P., 2012. *Comparison of two models in predicting pore water electrical conductivity in different porous media*. Geoderma 189:563-573.
- Kargas G, Kerkides P, Seyfried M., 2014. *Response of three soil water sensors to variable solution electrical conductivity in different soils*. Vadose zone Journal 13: doi:10.2136/vzj2013.09.0169
- Malicki M., Walczak R, Koch S and Fluhler H., 1994. *Determining soil salinity from simultaneous readings of its electrical conductivity and permittivity using TDR*. In: Proceedings of the symposium on Time Domain Reflectometry in Environmental, Infrastructure and Mining Applications (Evanston, Illinois, 7-9 September, 1994),328-336. US Bureau of Mines, special publication SP 19-94, NTIS PB-105789.
- Malicki M. and R. Walczak, 1999. *Evaluating soil salinity status from electrical conductivity and permittivity*. Eur. Journal soil science 50:505-514.
- Mualem Y. and S. Friedman, 1991. *Theoretical prediction of electrical conductivity in saturated and unsaturated soil*. Water Resour. Res. 27:2771-2777.
- Regalado C., A. Ritter and R. M. Rodriguez-Gonzalez, 2007. *Performance of the commercial WET capacitance sensor as compared with Time domain reflectometry in volcanic soils*. Vadoze zone Journal 6:244-254.
- 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.
- Rhoades J.D., Manteghi N.A, Shouse P.J., Alves W.J. 1989. *Soil electrical conductivity and soil salinity: new formulations and calibrations*. Soil Sci. Soc. 53:433-439.
- TriSCAN Agronomic User Manual Version 1.2a. 2003.
- United States Salinity Laboratory, 1954. *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*. US Department of Agriculture, Agricultural Handbook No. 60, US Government Printer, Washington, USA.



## ΧΡΟΝΙΚΗ ΠΑΡΑΛΛΑΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΣΤΟΝ ΚΟΡΕΣΜΟ ΤΗΣ ΑΝΩΤΕΡΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ

Γ. Κάργας✉, Κ. Μπακογιάννης, Ι. Παπαϊωάννου, Κ. Σούλης

Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών,  
Ιερά Οδός 75, 11855 Αθήνα, ✉ kargas@aua.gr

### Περίληψη

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η χρονική παραλλακτικότητα της υδραυλικής αγωγιμότητας στον κορεσμό ( $K_s$ ) της ανώτερης εδαφικής στρώσης σε αδιατάρακτα εδαφικά δείγματα στα οποία η  $K_s$  μετρήθηκε σε ένα πηλώδες έδαφος σε τρεις διαφορετικές καλλιεργητικές μεταχειρίσεις. 1) Το έδαφος έχει υποστεί κατεργασία με περιστροφικό καλλιεργητή και τα ζιζάνια απομακρύνονται με χημική καταπολέμηση (RT) 2) Το έδαφος δεν υφίστανται μηχανική κατεργασία αλλά γίνεται μόνο χημική καταπολέμηση των ζιζανίων (NT) 3) Τα ζιζάνια αναπτύσσονται ελεύθερα (NV). Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι η  $K_s$  στις μεταχειρίσεις RT και NT εμφανίζει σημαντική χρονική παραλλακτικότητα η οποία είναι ιδιαίτερα έντονη μεταξύ της περιόδου των χειμερινών βροχοπτώσεων και την περίοδο της άνοιξης και του καλοκαιριού. Κατά την περίοδο των βροχοπτώσεων εμφανίζονται οι χαμηλότερες τιμές ενώ κατά την ξηρή περίοδο οι μέγιστες. Στην περίπτωση της μεταχείρισης NV οι μεταβολές της  $K_s$  είναι πολύ μικρότερες και οι τιμές της εμφανίζουν σχετική σταθερότητα. Από τον προσδιορισμό των ΧΚΥ στις τρεις μεταχειρίσεις φαίνεται ότι οι μεταβολές της  $K_s$  μπορούν να συσχετιστούν με τις μεταβολές στους πόρους που στραγγίζουν στο διάστημα πίεσης ( $h$ ) από 0 έως -60 cm.

*Λέξεις κλειδιά:* Υδραυλικές ιδιότητες, Καλλιεργητικές μεταχειρίσεις, Πορώδες

## TEMPORAL VARIABILITY OF HYDRAULIC CONDUCTIVITY AT SATURATION OF UPPER SOIL LAYER

G. Kargas✉, K. Mpakogianis, I. Papaioanou, K. Soulis

Agricultural University of Athens, Sector of water resources management, ✉ kargas@aua.gr

### Abstract

The purpose of this study was to follow the temporal variation of the hydraulic conductivity of the surface soil layer during three years (2011-2014) in the three cases 1) Cultivated and bare soil (RT) 2) Uncultivated and kept bare (NT) 3) Uncultivated but cover by local weed vegetation (NV). From the results it was shown that there is remarkable temporal variability in the RT and NT treatments. More specifically minimum values of  $K_s$  prevailing during the rainy period and maximum ones during the dry periods. For the NV treatment the  $K_s$  values varied slightly during the years. Soil water retention curves exhibited remarkable variation, particularly in the case of pores draining in the range of negative pressure head  $h$  up to -60 cm. To this the variation of  $K_s$  values measured may related.

*Key words:* Hydraulic properties, Cultivation treatments, Pore space

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μελέτη των υδραυλικών ιδιοτήτων της επιφανειακής εδαφικής στρώσης, δηλαδή η σχέση μεταξύ της περιεκτικότητας σε νερό ( $\theta$ ) και του φορτίου πίεσης ( $h$ ) καθώς και της υδραυλικής αγωγιμότητας ( $K$ ) και της  $\theta$ , είναι μεγάλης σημασίας αφού αυτές καθορίζουν την διήθηση του νερού της βροχής στο έδαφος αλλά επίσης και την επιφανειακή απορροή. Κάθε μεταβολή της επιφανειακής εδαφικής στρώσης που προκαλείται είτε από φυσικούς παράγοντες όπως η βροχόπτωση είτε ανθρωπογενείς όπως οι καλλιεργητικές μεταχειρίσεις μπορεί να οδηγήσουν σε μεταβολές των χαρακτηριστικών του πορώδους της. Οι μεταβολές του πορώδους μπορεί να επιφέρουν σοβαρές αλλαγές των υδραυλικών ιδιοτήτων και να επηρεάσουν την αποθήκευση του νερού στο έδαφος. Έχει διαπιστωθεί ότι οι καλλιεργητικές μεταχειρίσεις προκαλούν αλλαγές που εντοπίζονται κυρίως σε μικρό σχετικά εύρος πίεσης κοντά στον κορεσμό (Lindstrom and Onstad 1984; Mapa et al., 1986; Poulouvasilis 1990; Kargas et al. 2012). Όσον αφορά στην υδραυλική αγωγιμότητα κάποιοι ερευνητές αναφέρουν ότι η κατεργασία προκαλεί αύξηση της υδραυλικής αγωγιμότητας ( $K$ ) (Mc Garry et al. 2000; Kribaa et al. 2001; Moret and Arrue 2007), ενώ άλλοι αναφέρουν μείωση (Mapa et al. 1986; Benjamin 1993; Mahboudi et al. 1993; Azooz and Arshad 1996, 2001) και κάποιοι ερευνητές (Ehlers W. and van der Ploeg 1976; Poulouvasilis, 1990; Kargas et al. 2012) αναφέρουν ότι η  $K(\theta)$  στο ανόργωτο έδαφος ήταν μεγαλύτερη από αυτή στο οργωμένο σε υψηλές υγρασίες αλλά ήταν χαμηλότερη σε χαμηλές έως μέτριες υγρασίες ( $0.35-0.4\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ). Έχει επίσης αποδειχθεί ότι οι επιδράσεις των καλλιεργητικών τεχνικών στις υδραυλικές ιδιότητες δεν είναι μόνιμες, αλλά μεταβάλλονται στον χρόνο (Struddley et al. 2008; Xu et al. 2009). Οι Ahuja et al. (1998) πρότειναν μία μεθοδολογία προσδιορισμού της ΧΚΥ του καλλιεργημένου εδάφους, όπως μεταβάλλεται στον χρόνο με τη χρήση των μεταβολών της φαινομενικής πυκνότητάς του ή του πορώδους. Οι Leij et al. (2002) παρουσίασαν ένα μοντέλο πρόβλεψης της εξέλιξης της κατανομής του μεγέθους των πόρων μετά το όργωμα και εξέτασαν την δυνατότητα εφαρμογής του στην πρόβλεψη της ΧΚΥ και της  $K(\theta)$ . Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι η πρόβλεψη της ΧΚΥ είναι αρκετά καλή ενώ για την  $K(\theta)$  η εφαρμογή του μοντέλου Muallem-van Genuchten (1980) απέτυχε για τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν. Οι Zhou et. al., (2008) αναφέρουν ότι η αρχική  $\theta$  κατά τη μέτρηση με διηθητόμετρο αρνητικής πίεσης μπορεί να επηρεάσει τη τιμή της  $K_s$ . Σε συνθήκες χαμηλής υγρασίας παρατηρήθηκε αύξηση των μεγάλων πόρων που οδηγεί σε αύξηση της  $K_s$  συγκριτικά με συνθήκες υψηλής υγρασίας. Με άλλα λόγια η  $K_s$  παρουσιάζει έντονη χρονική παραλλακτικότητα σε διάφορες μεταχειρίσεις που μελέτησαν εκτός από την περίπτωση των δασικών εδαφών. Οι Hu et al., (2009) μελέτησαν τέσσερις μεταχειρίσεις σ' ένα αμμοπηλώδες έδαφος. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι δεν υπήρξαν στατιστικά σημαντικές διαφορές στην σχέση  $K(h)$  μεταξύ των μεταχειρίσεων εκτός αυτής στην τιμή  $h=10\text{ cm}$  καθώς επίσης ότι η  $K$  επηρεάζεται περισσότερο από τον χρόνο σε σύγκριση με την χρήση γης.

Οι Schwen et al., (2011a) μελέτησαν την χρονική παραλλακτικότητα των υδραυλικών ιδιοτήτων σε τρεις καλλιεργητικές μεταχειρίσεις σε πειράματα δύο χρόνων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι κατά την διάρκεια της περιόδου των βροχών υπάρχει μείωση των υδραυλικών ενεργών πόρων ενώ κατά την διάρκεια της ξηρής περιόδου αύξησή τους. Επίσης από την μελέτη της σχέσης  $\theta(h)$  μετά από την προσαρμογή της στην εξίσωση van Genuchten (1980) προέκυψε ότι η παράμετρος  $\alpha$  παρουσιάζει χρονική παραλλακτικότητα ενώ η παράμετρος  $n$  όχι. Επίσης οι Schwen et al., (2011b) διαπίστωσαν ότι ένα μοντέλο προσομοίωσης έδωσε καλύτερα αποτελέσματα στην πρόβλεψη της εδαφικής υγρασίας και

στην αποθήκευση του νερού όταν ενσωματώνει την χρονική παραλλακτικότητα των υδραυλικών ιδιοτήτων.

Πρέπει να επισημάνουμε ότι η μελέτη των υδραυλικών ιδιοτήτων από τους προηγούμενους ερευνητές έχει πραγματοποιηθεί με την βοήθεια διηθητόμετρου αρνητικής πίεσης.

Στην παρούσα εργασία διερευνάται η χρονική παραλλακτικότητα της  $K_s$  σε τρεις μεταχειρίσεις και εξετάζεται το ύψος του νερού της βροχής που αποθηκεύεται στην εδαφική κατατομή μέχρι βάθος 1 m.

## **2.ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ**

### **2.1. Καλλιεργητικές μεταχειρίσεις και δειγματοληψία**

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε τρία πειραματικά τεμάχια (A, B, C) στο πειραματικό αγρό του εργαστηρίου Γ. Υδραυλικής (Kargas et al., 2012). Το έδαφος μέχρι το βάθος 1 m είναι πηλώδες.

Στο τεμάχιο A πραγματοποιήθηκε μεταχείριση με περιστροφικό καλλιεργητή 18/10/2011, 16/10/2012 και 16/10/2013. Στο τεμάχιο B δεν έγινε καμία μεταχείριση. Στα δύο τεμάχια περιοδικά εφαρμόζονταν ζιζανιοκτονία ώστε η επιφάνειά τους να είναι συνεχώς γυμνή από ζιζάνια. Στο τεμάχιο C δεν έγινε καμία παρέμβαση και τα ζιζάνια αναπτύχθηκαν ελεύθερα. Από κάθε τεμάχιο λαμβάνονταν κατά διαστήματα πέντε εδαφικά δείγματα από τις τέσσερις άκρες του τεμαχίου και το κέντρο ώστε να προσδιοριστεί η  $K_s$ . Επιπρόσθετα σε αραιότερα χρονικά διαστήματα λαμβάνονταν πάλι πέντε εδαφικά δείγματα για τον προσδιορισμό της  $\theta(h)$ . Συνολικά έγινε συλλογή 100 δειγμάτων για προσδιορισμό της  $\theta(h)$  και 400 για προσδιορισμό της  $K_s$ .

Η παρακολούθηση των βροχών έγινε από βροχόμετρο εγκατεστημένο στο πειραματικό αγρό.

### **2.2. Προσδιορισμός της $K_s$ και της $\theta(h)$**

Ο προσδιορισμός της  $K_s$  έγινε με περατόμετρο σταθερού φορτίου ενώ ο προσδιορισμός της  $\theta(h)$  με την συσκευή sand –kaolin box. Ο προσδιορισμός της  $\theta(h)$  έγινε μέχρι  $h=-200$  cm διότι όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή έχει διαπιστωθεί ότι οι καλλιεργητικές μεταχειρίσεις επηρεάζουν το πορώδες σε ένα μικρό εύρος πίεσης.

Σαν τιμή της  $K_s$  σε κάθε τεμάχιο για κάθε δειγματοληψία θεωρήθηκε ο αριθμητικός μέσος όρος των πέντε μετρήσεων ενώ σαν αντιπροσωπευτική χαρακτηριστική καμπύλη η  $\theta(h)$  όπου  $\theta$  η μέση τιμή της  $\theta$  των πέντε δειγμάτων σε κάθε φορτίο πίεσης.

### **2.3. Υπολογισμός του ύψους νερού που αποθηκεύτηκε στο έδαφος**

Για τον προσδιορισμό της  $\theta$  στο έδαφος χρησιμοποιήθηκε η συσκευή PR2 (Delta –T Device Ltd, User manual for the Profile probe, 2008) και οι μετρήσεις ελήφθησαν στο κέντρο κάθε τεμαχίου. Από όλα τα πειραματικά αγροτεμάχια λαμβάνονταν μετρήσεις της  $\theta$  μετά από φαινόμενα βροχοπτώσεων και όταν δεν υπήρχαν τέτοια κάθε εβδομάδα. Περισσότερες πληροφορίες για την πειραματική διαδικασία παρουσιάζονται στην εργασία kargas et al., (2012).

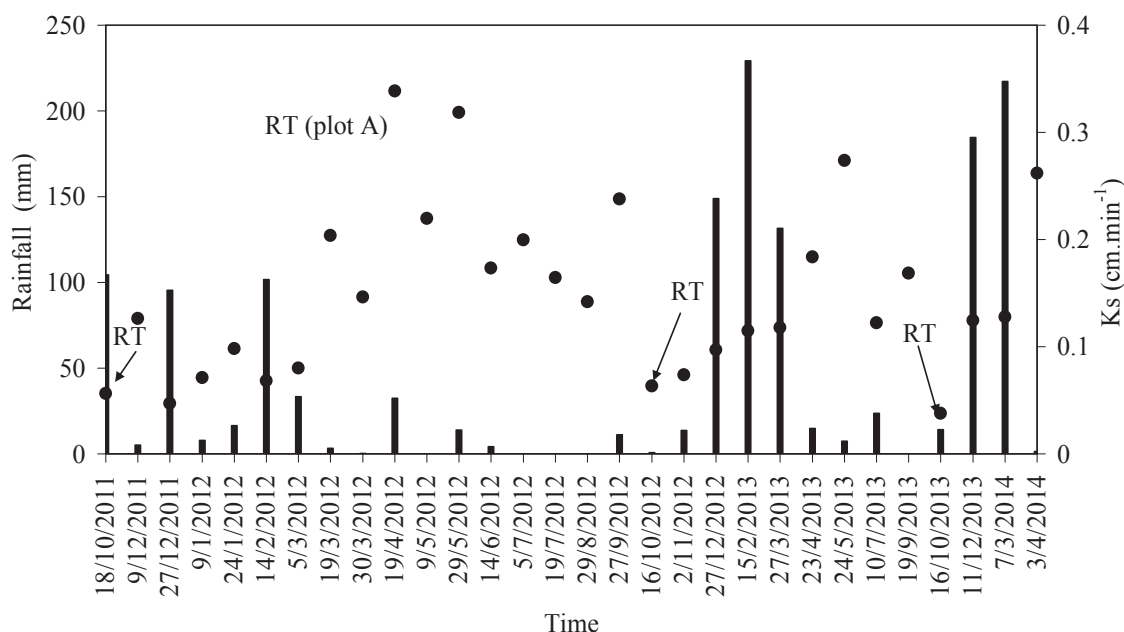
### **2.4 Στατιστική ανάλυση**

Με την βοήθεια της ANOVA εξετάστηκε εάν υπάρχουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων και μεταξύ των δύο περιόδων (υγρή-ξηρή) στις μέσες τιμές της

Ks. Επίσης για την εκτίμηση της χωρικής παραλλακτικότητας της Ks υπολογίστηκε ο συντελεστής CV= standard deviation/mean values (Coefficient of variation).

### 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

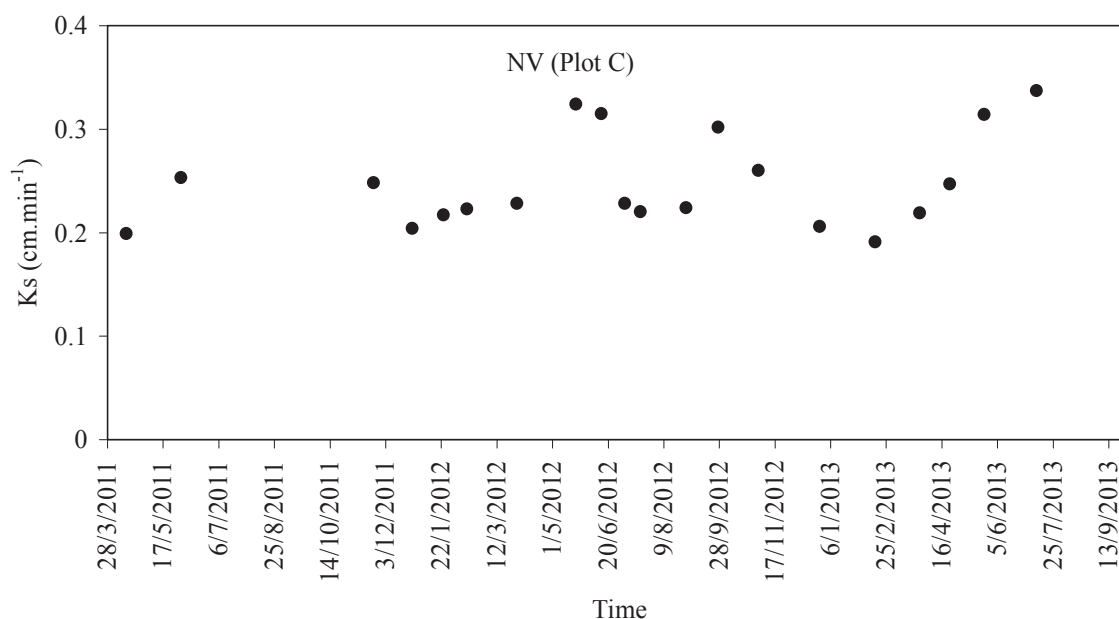
Στα σχήματα 1 και 2 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές της Ks κατά την διάρκεια του πειράματος για τις μεταχειρίσεις RT και NV. Από τα δεδομένα προκύπτει ότι οι μικρές τιμές της Ks για την RT εμφανίζονται ακριβώς μετά το όργωμα και διατηρούνται σε όλη την περίοδο των βροχών ενώ υπάρχει μια αξιοσημείωτη αύξηση κατά την ξηρή περίοδο. Πιο συγκεκριμένα οι τιμές της Ks 5/3/2012, 15/2/2013 και 11/12/2013 ήταν 0.077, 0.109 και 0.099 cm/min ενώ 29/5/2012, 24/5/2013 και 3/4/2014 ήταν 0.333, 0.314 και 0.280 αντίστοιχα. Οι χαμηλές τιμές της Ks κατά την περίοδο των βροχών μπορούν να αποδοθούν σε συνδυασμό παραγόντων όπως η καταστροφή της συνέχειας των πόρων λόγω του οργώματος και στην συμπίεση της ψιλοχωματισμένης επιφανειακής στρώσης λόγω των βροχών. Στην NT μεταχείριση οι χαμηλές τιμές μπορούν να αποδοθούν στις δυσμενείς επιπτώσεις της βροχής π.χ καταστροφή συσσωματωμάτων. Η παρατηρούμενη αύξηση κατά την ξηρή περίοδο οφείλεται σε αλλαγές του πορώδους οι οποίες μπορεί να προκαλούνται από τις εναλλαγές διαβροχής/αποστράγγισης ειδικά κατά την άνοιξη. Παρόμοια αποτελέσματα χρονικής μεταβολής της Ks αναφέρουν και οι Mubarak et al., (2009), Schwen et al., (2011a). Ανάλογη συμπεριφορά εμφανίζει και το γυμνό έδαφος NT. Όμως οι μεταβολές μεταξύ των δύο περιόδων είναι σχετικά μικρότερης έντασης συγκριτικά με αυτές του RT.



**Σχήμα 1.** Οι μέσοι όροι των τιμών της Ks για την RT μεταχείριση κατά την διάρκεια της πειραματικής περιόδου. Επίσης παρουσιάζονται και τα αντίστοιχα ύψη βροχής μεταξύ των διαστημάτων δειγματοληψίας. Τα βέλη δείχνουν τις ημερομηνίες οργώματος.

Στην NV μεταχείριση η Ks μεταβάλλεται από 0.191 cm/min έως 0.337 cm/min για το διάστημα από 23/3/2011 έως 7/6/2013. Το εύρος της μεταβολής της NV είναι αρκετά

μικρότερο από αυτό των RT και N T μεταχειρίσεων. Η μεγαλύτερη διαφορά στις τιμές της Ks μεταξύ των μεταχειρίσεων παρατηρείται κυρίως κατά την διάρκεια της περιόδου των βροχών. Ανάλογη διαφορά, η οποία αποδόθηκε στην επίδραση του ριζικού συστήματος, είχε επισημανθεί και από τους Shirmohammadi and Skaggs (1984) για τις τιμές της Ks σε καλλιεργούμενα και γυμνά εδάφη. Παρόμοια αποτελέσματα έχουν αναφερθεί και από τους Cameira et al., (2003) και Rasse et al., (2000). Οι Zhou et al., (2008) αναφέρουν ότι στην περίπτωση των δασικών εδαφών παρατηρήθηκε μικρή χρονική παραλλακτικότητα στις τιμές της Ks συγκριτικά με καλλιεργούμενα εδάφη.



**Σχήμα 2.** Οι μέσοι όροι των τιμών της Ks για την NV μεταχείριση κατά την διάρκεια της πειραματικής περιόδου.

Από την ANOVA προέκυψε ότι υπήρχαν στατιστικά σημαντικές διαφορές ( $p < 0.05$ ) μεταξύ:

- Των τιμών της Ks κατά την υγρή και εκείνων της ξηρής περιόδου για τις RT και NT μεταχειρίσεις.
- Των τιμών της Ks της NV και των RT και NT κατά την υγρή περίοδο.
- Των τιμών της NV και της NT κατά τη ξηρή περίοδο.

Μη στατιστικά σημαντικές διαφορές προέκυψαν μεταξύ των τιμών της Ks για την RT και την NT καθώς επίσης και μεταξύ των περιόδων για την NV. Με άλλα λόγια στην περίπτωση των RT και NT παρατηρείται σημαντική χρονική παραλλακτικότητα ενώ στην NV δεν παρατηρείται.

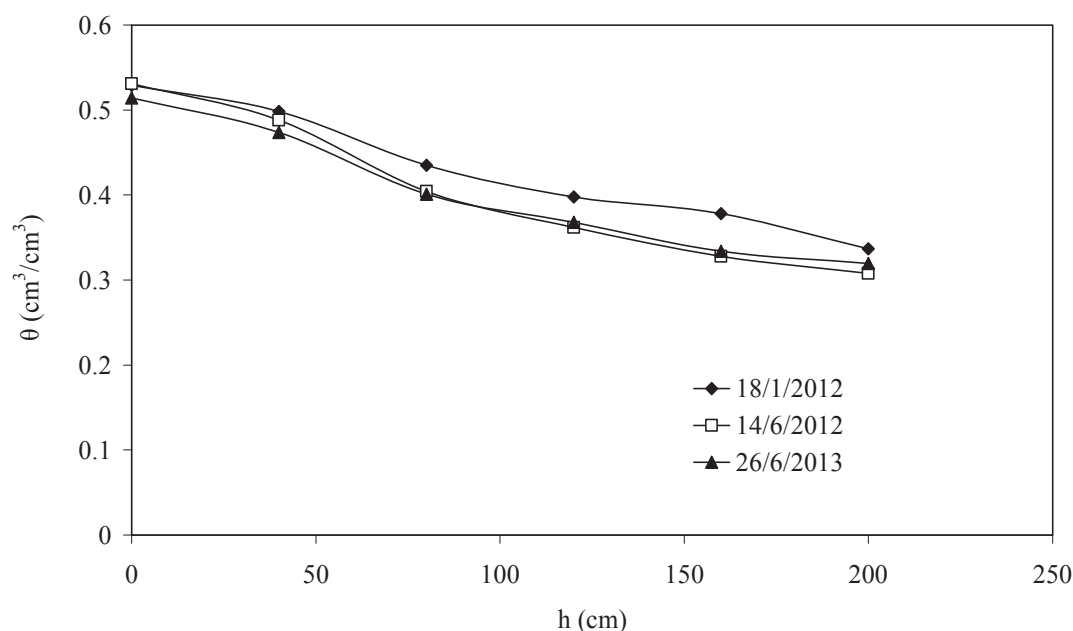
Από τον υπολογισμό του CV για την εκτίμηση της χωρικής παραλλακτικότητας της Ks προέκυψε ότι το εύρος μεταβολής για την RT, NT και την NV ήταν από 24.4 έως 59.8%, από 24.1 έως 68.4% και από 27 έως 60.2% αντίστοιχα. Αυτό το εύρος μεταβολής από τους Hu et al., (2009) χαρακτηρίζεται σαν μικρό έως ενδιάμεσο. Λαμβάνοντας υπόψη τα δεδομένα από ANOVA καθώς και τα δεδομένα της χωρικής παραλλακτικότητας φαίνεται ότι η χρονική παραλλακτικότητα είναι σημαντικότερη αυτής της χωρικής για τις περιπτώσεις RT και NT.



Πρέπει να επισημανθεί ότι οι μικρές τιμές της χωρικής παραλλακτικότητας πιθανόν να οφείλονται στην μέθοδο της δειγματοληψίας αφού τα δείγματα λαμβάνονταν πάντα από σχετικά κοντινά σημεία των πειραματικών τεμαχίων.

Από την μελέτη των σχετικών όγκων νερού, όπως υπολογίζονται από τις ΧΚΥ στο φορτίο πίεσης  $h$  από 0 έως -60 cm, φαίνεται ότι για την μεταχείριση RT ακριβώς μετά το όργωμα ο όγκος κυμαίνεται από 0.041 έως 0.047  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$  ενώ συνολικά ο μέσος όγκος για την υγρή περίοδο είναι 0.057  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$  και για την ξηρή 0.081  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ . Για την NT οι αντίστοιχοι μέσοι όροι είναι 0.049  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$  και 0.052  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$  ενώ για την NV οι μέσοι όροι είναι αντίστοιχα 0.064  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$  και 0.098  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ .

Στο σχήμα 3 παρουσιάζονται οι ΧΚΥ για την μεταχείριση NV σε τρεις διαφορετικές χρονικές στιγμές.



**Σχήμα 3.** Αντιπροσωπευτικές ΧΚΥ για την μεταχείριση NV σε τρεις διαφορετικές χρονικές στιγμές.

Από τα δεδομένα αυτά φαίνεται ότι οι μεταβολές της  $K_s$  μπορούν να συσχετιστούν άμεσα με τις μεταβολές του πορώδους στο διάστημα 0 έως -60 cm όπως φαίνεται από τις ΧΚΥ.

Η καταγραφή του αποθηκευμένου νερού της βροχής μέχρι το βάθος του 1 m στις τρεις μεταχειρίσεις έδειξε αξιοσημείωτες διαφορές. Πιο συγκεκριμένα το νερό που αποθηκεύτηκε κατά την περίοδο 2011-2012 ήταν 101.2 mm για την NV, 63.87 mm για την RT και 48.84 mm για την NT ενώ για την περίοδο 2012/13 ήταν 230.20, 169.13 και 121.40 αντίστοιχα. Τα ύψη βροχής κατά την περίοδο των βροχών ήταν 274.40 και 531.20 mm αντίστοιχα. Συνεπώς οι διαφορές στις υδραυλικές ιδιότητες μεταξύ των μεταχειρίσεων φαίνεται να έχουν σημαντική επίδραση στην αποθήκευση του νερού.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ajuja L., Fiedler F., G. Duna, J. Benjamín and Garrion A., 1998. *Changes in soil water retention curves due to tillage and natural reconsolidation*. Soil Sci. Soc. Am. Journal 62: 1228-1233.

- Azooz R.H and Arshad M.A., 1996. *Soil infiltration and hydraulic conductivity under long-term no tillage and conventional tillage systems*. Can. J. Soil Sci. 76 (2): 143-152.
- Azooz R.H and Arshad M.A., 2001. *Soil water drying and recharge rates as affected by tillage under continuous barley and barley-canola cropping systems in northwestern Canada*. Can. J. Soil Sci 81(1): 45-52.
- Benjamin J., 1993. *Tillage effects on near surface soil hydraulic properties*. Soil and Tillage Res. 26: 277-288.
- Cameira M., Fernando R.M., Pereira L.S., 2003. *Soil macropore dynamics affected by tillage and irrigation for a silty loam alluvial soil in southern Portugal*. Soil Till. Res. 70: 131-140.
- Ehlers W. and van der Ploeg 1976. *Evaporation, drainage and unsaturated hydraulic conductivity of tilled and untilled fallow soil*. Z. Pflanzenern. Bodenk 1976, 3: 373-386.
- Hu W., Shao M., Wang Q., Fan J. and Horton R., 2009. *Temporal changes of soil hydraulic properties under different land uses*. Geoderma 149: 355-366.
- Kargas G., P. Kerkides, A. Poulouvassilis 2012. *Infiltration of rain water in the semi arid area under three land surface treatments*. Soil and Tillage Research 120:15-24.
- Kribaa M., V. Hallaire, P. Curmi, Lahmar R., 2001. *Effect of various cultivation methods on structure and hydraulic properties of a soil in a semi-arid climate*. Soil and Tillage Research 60: 43-53.
- Leij F., Ghezzehei T. and Or D., 2002. *Modeling the dynamics of the soil pore size distribution* Soil and Tillage Research 64: 61-78.
- Lindstrom M. and Onstad C., 1984. *Influence of tillage systems on soil physical parameters and infiltration after planting*. Journal Soil Water Conserv. 39: 149-152.
- Mahboubi A., A. Lal and Faussey N., 1993. *28 years of tillage effects on two soils in Ohio*. Soil Sci. Soc. Am. Journal 57(2): 506-512.
- Mapa R., Green R. and Santo L., 1986. *Temporal variability of soil hydraulic properties with wetting and drying subsequent to tillage*. Soil Sci. Soc. Am. Journal 50: 1133-1138.
- McGarry D., Bridge B.J., Radford B.J., 2000. *Contrasting soil physical properties after zero and traditional tillage of an alluvial soil in the semi-arid subtropics*. Soil Till. Res. 53: 105-115.
- Moret D. and Arrue J.L., 2007. *Dynamics of soil hydraulic properties during fallow by tillage*. Soil and Tillage Research 96: 103-113.
- Mubarak I., Mailhal J., Angulo-Jaramillo., Ruelle P., Boivin P and Khaledian M., 2009. *Temporal variability in soil hydraulic properties under drip irrigation*. Geoderma 150: 158-165.
- Poulouvassilis A.,1990. *The effect of cultivation practices on the physical properties of the upper soil layer*. (Project No 5110). Final report. Laboratory of Agricultural Hydraulics. Agricultural University of Athens.
- Rasse D.P., Smucker A.J.M., Santos D., 2000. *Alfalfa root and shoot mulching effects on soil hydraulic properties and aggregation*. Soil Sci. Soc. Am. J. 64: 725-731.
- Schwen A., Bodner G., Scholl P., Buchan G. and Loiskandl W., 2011a. *Temporal dynamics of soil hydraulic properties and the water conducting porosity under different tillage*. Soil and Tillage Research 113: 89-98.
- Schwen A., Bodner G., and Loiskandl W., 2011b. *Time variable soil hydraulic properties in near surface soil water simulations for different tillage methods*. Agr. Water Man. 99: 42-50.
- Shirmohammadi A. and Skaggs R., 1984. *Effect of surface conditions on infiltration for shallow water table soils*. Trans. ASAE 27: 1780-1787.

- Strudley M., Green T. and Ascough J., 2008. *Tillage effect on soil hydraulic properties in space and time: State of the science*. Soil and Tillage Research 99: 4-48.
- User Manual for the Profile Probe.2008. Delta Device Ltd Cambridge, UK
- 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.
- Zhou X., Lin H. and E. White 2008. *Surface soil hydraulic properties in four soil series under different land uses and their temporal changes*. Catena 73:180-188

## ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΡΗΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΕΝΩΝ ΤΙΜΩΝ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΔΥΟ ΠΟΡΩΔΩΝ ΜΕΣΩΝ

Π. Λόντρα<sup>✉</sup>, Γ. Κάργας, Ι. Βαλιάντζας

Τομέας Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, Σχολή Αγροτικής Παραγωγής, Υποδομών και Περιβάλλοντος, Γ.Π.Α., Ιερά Οδός 75, 11855 Αθήνα, ✉ v.londra@aua.gr

### Περίληψη

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκαν πειράματα προσδιορισμού της καμπύλης υγρασίας,  $\theta(H)$ , και πειράματα εκροής ενός βήματος για τον προσδιορισμό της υδραυλικής αγωγιμότητας,  $K(\theta)$ , σε δύο πορώδη μέσα, μια άμμο και ένα πηλώδες έδαφος. Οι πειραματικές τιμές συγκρίθηκαν με τις προβλεπόμενες από το ευρέως διαδεδομένο κλειστού τύπου αναλυτικό μοντέλο Mualem-van Genuchten χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα RETC για δύο σενάρια σύγκρισης. Το πρώτο αφορούσε στην προσαρμογή της εξίσωσης van Genuchten στα πειραματικά δεδομένα της  $\theta(H)$  και στη σύγκριση των πειραματικών και των προβλεπόμενων  $K(\theta)$  από το μοντέλο Mualem-van Genuchten. Το δεύτερο σενάριο αφορούσε στην προσαρμογή του μοντέλου Mualem-van Genuchten ταυτόχρονα στα πειραματικά δεδομένα  $\theta(H)$  και  $K(\theta)$  και στη σύγκριση των πειραματικών και των προβλεπόμενων  $K(\theta)$  από το μοντέλο. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων έδειξε την αδυναμία του μοντέλου Mualem-van Genuchten να περιγράψει ικανοποιητικά την  $K(\theta)$  σε μια από τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν.

**Λέξεις κλειδιά:** Χαρακτηριστική καμπύλη υγρασίας, Υδραυλική αγωγιμότητα, Μοντέλο Mualem-van Genuchten

## COMPARISON OF MEASURED AND ESTIMATED HYDRAULIC CONDUCTIVITY OF TWO POROUS MEDIA

P. Londra<sup>✉</sup>, G. Kargas, J. Valiantzas

Department of Water Resources Management, School of Agricultural Production, Infrastructures and Environment, A.U.A., 75 Iera Odos street, 11855 Athens, ✉ v.londra@aua.gr

### Abstract

In this study, experiments were conducted to determine the soil water retention curve  $\theta(H)$  and hydraulic conductivity  $K(\theta)$  of two porous media, a sand and a loam soil. The experimental data were compared with those predicted by the worldwide used closed-form analytical hydraulic model of Mualem-van Genuchten using RETC program for two scenarios. The first scenario concerned the adjustment of the van Genuchten equation on the experimental  $\theta(H)$  data and the comparison of experimental and predicted  $K(\theta)$  using the Mualem-van Genuchten model. The second scenario concerned the adjustment of the Mualem-van Genuchten model simultaneously on the experimental  $\theta(H)$  and  $K(\theta)$  data and the comparison of experimental and predicted  $K(\theta)$  using the Mualem-van Genuchten model. Analysis of results showed that in some cases studied there was weakness of Mualem-van Genuchten model to properly describe the unsaturated hydraulic conductivity.

**Key words:** Soil water retention curve, Hydraulic conductivity, Mualem-van Genuchten model

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η γνώση των δύο κυριοτέρων υδραυλικών ιδιοτήτων, της χαρακτηριστικής καμπύλης υγρασίας και της υδραυλικής αγωγιμότητας, είναι απαραίτητη στα μοντέλα προσομοίωσης της κίνησης του νερού και των διαλυτών αλάτων σε πορώδη μέσα.

Όμως, ενώ η μέτρηση της καμπύλης υγρασίας  $\theta(H)$  μπορεί να γίνει γρήγορα και εύκολα, η μέτρηση της υδραυλικής αγωγιμότητας συναρτήσει της υγρασίας,  $K(\theta)$ , ή του φορτίου πίεσης,  $K(H)$ , αποτελεί μία δύσκολη και χρονοβόρα διαδικασία. Γι' αυτό το λόγο, έχουν αναπτυχθεί διάφορα μοντέλα πρόβλεψης της  $K(\theta)$  από τη χαρακτηριστική καμπύλη υγρασίας και την υδραυλική αγωγιμότητα στον κορεσμό  $K_s$  (Burdine, 1953; Childs and Collis George, 1950; Mualem, 1976). Η εισαγωγή αναλυτικών εκφράσεων της καμπύλης υγρασίας σε συνδιασμό με τα παραπάνω μοντέλα οδήγησαν σε κλειστού τύπου αναλυτικά μοντέλα πρόβλεψης των υδραυλικών ιδιοτήτων (Brooks and Corey, 1964; van Genuchten, 1980). Σε αρκετές περιπτώσεις όμως, οι υπολογισμένες τιμές αποκλίνουν σημαντικά από τις πραγματικές τιμές της  $K$  (Londra, 2010; Poulouvassilis et al., 1988; Talsma, 1985; Valiantzas and Salsalou, 1991; Valiantzas et al., 2007).

Η μέθοδος εκροής ενός βήματος (Doering, 1965) αποτελεί μια από τις πιο διαδεδομένες εργαστηριακές μεθόδους, εύκολη και απλή στην εφαρμογή της, προσδιορισμού της σχέσης μεταξύ της διαχυτικότητας του εδάφους και της περιεχόμενης υγρασίας,  $D(\theta)$ , που μπορεί να διεξαχθεί στην ίδια συσκευή προσδιορισμού της καμπύλης υγρασίας. Στη συνέχεια ο υπολογισμός της  $K(\theta)$  προκύπτει από την  $D(\theta)$  και την καμπύλη υγρασίας (Childs and Collis George, 1950). Το βασικό μειονέκτημα της μεθόδου είναι η αδυναμία πρόβλεψης της  $K(\theta)$  κοντά στον κορεσμό. Πολλοί ερευνητές έχουν προτείνει μεθόδους άμεσου υπολογισμού της  $D(\theta)$  από δεδομένα εκροής ενός βήματος (Gupta et al., 1974; Londra and Valiantzas, 2011; Passioura, 1976; Valiantzas, 1989; Valiantzas et al., 2007; Valiantzas and Londra, 2012).

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν να προσδιοριστεί πειραματικά η  $K(\theta)$  σε δύο πορώδη μέσα χρησιμοποιώντας τη μέθοδο εκροής ενός βήματος, και οι πειραματικές τιμές να συγκριθούν με τις προβλεπόμενες από το μοντέλο Mualem-van Genuchten (Mualem, 1976; van Genuchten, 1980) χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα RETC (van Genuchten et al., 1991).

## 2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

### 2.1. Πορώδη μέσα

Σε δύο διαταραγμένα δείγματα, ενός πηλώδους εδάφους (22% clay, 39% silt, 39% sand) και μιας άμμου ( $0.2 \text{ mm} < d < 0.5 \text{ mm}$ ), διεξήχθησαν στο εργαστήριο πειράματα προσδιορισμού της χαρακτηριστικής καμπύλης υγρασίας και πειράματα εκροής ενός βήματος χρησιμοποιώντας συσκευές Haines (Haines, 1930). Αρχικά μετρήθηκε η καμπύλη υγρασίας  $\theta(H)$  και ακολούθησε, στο ίδιο δείγμα και στην ίδια συσκευή, πείραμα εκροής ενός βήματος (Doering, 1965) για τον προσδιορισμό της διαχυτικότητας του εδάφους  $D(\theta)$  και κατά συνέπεια της υδραυλικής αγωγιμότητας του εδάφους  $K(\theta)$  χρησιμοποιώντας την καμπύλη υγρασίας.

### 2.2. Πειραματική διαδικασία

Σε χωνιά Buchner με πορώδη κεραμική πλάκα (συσκευή Haines) τοποθετήθηκαν δείγματα μιας άμμου και ενός πηλώδους εδάφους, ύψους 2.5 cm και διαμέτρου 9.6 cm. Τα δείγματα αφού δέχτηκαν έναν κύκλο διαβροχής και αποστράγγισης, επανακορέστηκαν και



μετρήθηκε ο κλάδος αποστράγγισης της καμπύλης υγρασίας εφαρμόζοντας μικρά βήματα αρνητικής πίεσης και μετρώντας την περιεχόμενη εδαφική υγρασία.

Στα ίδια δείγματα, στην ίδια συσκευή, μετά το τέλος της μέτρησης της καμπύλης υγρασίας, έγινε κορεσμός των δειγμάτων και ακολούθησε η διαδικασία εκροής ενός βήματος. Τα δείγματα δέχτηκαν απότομα ένα μεγάλο βήμα αρνητικής πίεσης  $h_f$  ίσο με την τελική τιμή πίεσης της καμπύλης υγρασίας ( $h_f = -140$  cm για το πηλώδες έδαφος και  $h_f = -110$  cm για την άμμο) και καταγράφονταν οι όγκοι εκροής  $V_i$  στους αντίστοιχους χρόνους  $t_i$ . Ακολουθώντας, υπολογίστηκαν οι αντίστοιχες περιεχόμενες υγρασίες  $\theta_i$ , ως  $\theta_i = \theta_s - V_i/V_o$ , όπου  $\theta_s$  η υγρασία στον κορεσμό και  $V_o$  ο όγκος του δείγματος.

Σύμφωνα με τους Valiantzas et al. (2007) η απεικόνιση της αδιάστατης μεταβλητής  $S$ , που προκύπτει από τα δεδομένα εκροής, με την τετραγωνική ρίζα του χρόνου είναι της μορφής:

$$S(\sqrt{t}) = a(\sqrt{t})^b + c \quad (1)$$

όπου  $S = \frac{\theta - \theta_f}{\theta_s - \theta_f}$  ( $0 \leq S \leq 1$ ),  $\theta_f$  η περιεχόμενη υγρασία στο τέλος του πειράματος εκροής

ενός βήματος, και  $a$ ,  $b$ ,  $c$  παράμετροι προσαρμογής της εξίσωσης στα πειραματικά δεδομένα.

Τα δεδομένα εκροής που λαμβάνονται υπόψη είναι αυτά που δεν υπόκεινται στο εμπόδιο της πλάκας και περιορίζονται στο στάδιο III της περιοχής  $S(\sqrt{t})$  (Valiantzas et al., 2007).

Στη συνέχεια η διαχυτικότητα του εδάφους  $D(\theta)$  υπολογίστηκε από τα δεδομένα εκροής ενός βήματος χρησιμοποιώντας την εξίσωση των Valiantzas et al. (2007):

$$D(\bar{\theta}) = -\frac{2L^2 a^{2/b}}{\pi^2} \left( \frac{\bar{\theta} - \theta_f}{\theta_s - \theta_f} - c \right)^{-2/b} \left[ b - 1 - (b/2)c \left( \frac{\theta_s - \theta_f}{\bar{\theta} - \theta_f} \right) \right] \quad (2)$$

όπου  $L$  το ύψος του δείγματος και  $a$ ,  $b$ ,  $c$  οι προαναφερόμενοι παράμετροι προσαρμογής στα δεδομένα εκροής ενός βήματος (Valiantzas et al., 2007).

Η εξίσωση αυτή έχει επαληθευτεί για διάφορους τύπους πορωδών μέσων (Valiantzas et al., 2007; Valiantzas and Londra, 2008; Kargas and Londra, 2015).

Ο υπολογισμός της  $K(\theta)$  έγινε χρησιμοποιώντας την εξίσωση (Childs and Collis-George, 1950):

$$K(\theta) = D(\bar{\theta}) \frac{d\theta}{dH} \quad (3)$$

όπου  $d\theta/dH$  η κλίση της καμπύλης υγρασίας.

Επίσης, για τα ίδια δείγματα προσδιορίστηκαν πειραματικά η υδραυλική αγωγιμότητα στον κορεσμό  $K_s$  με περατόμετρο σταθερού φορτίου (Klute and Dirksen, 1986).

### 2.3. Πρόγραμμα RETC

Χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα RETC (van Genuchten et al., 1991) για τον υπολογισμό των παραμέτρων προσαρμογής του ευρέως διαδεδομένου μοντέλου Mualem-van Genuchten (Mualem, 1976; van Genuchten, 1980) στα πειραματικά δεδομένα της καμπύλης υγρασίας και της υδραυλικής αγωγιμότητας όπως προέκυψαν από τα δεδομένα εκροής ενός βήματος.

Ο van Genuchten (1980) πρότεινε την ακόλουθη συνάρτηση περιγραφής της καμπύλης υγρασίας:

$$\theta(h) = (\theta_s - \theta_r) \left( \frac{1}{1 + \alpha |h|^n} \right)^m + \theta_r \quad (5)$$

όπου  $\theta_s$  η υγρασία στον κορεσμό,  $\theta_r$  η υγρασία στο σημείο μάρανσης και  $\alpha$ ,  $m$ ,  $n$  εμπειρικοί παράμετροι προσαρμογής και  $m=1-1/n$ .

Συνδυάζοντας την εξίσωση van Genuchten (1980) με το στατιστικό μοντέλο του Mualem (1976) η υδραυλική αγωγιμότητα  $K(\theta)$  προκύπτει ως

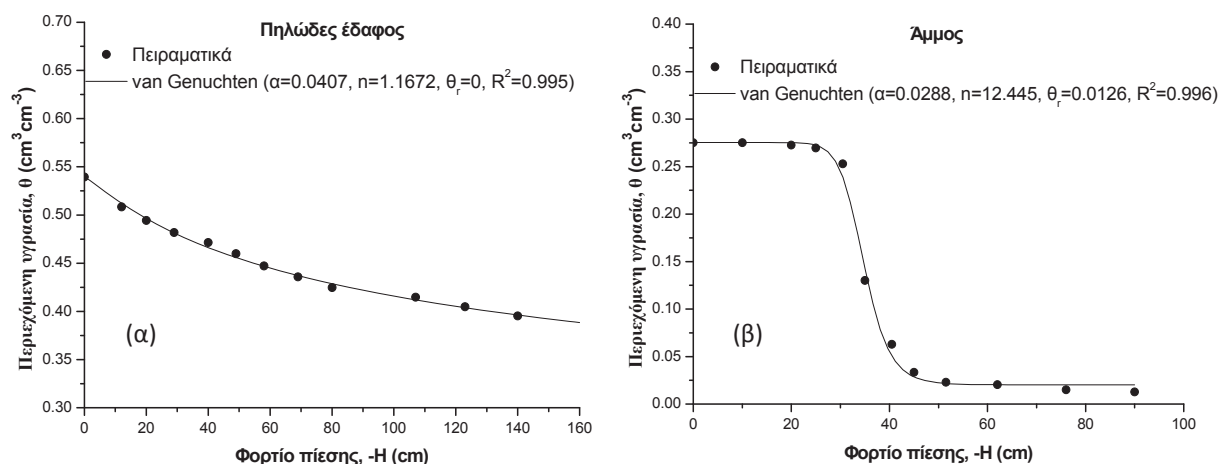
$$K(\theta) = K_s \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^p \left\{ 1 - \left[ 1 - \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{1/m} \right]^m \right\}^2 \quad (6)$$

όπου  $K_s$  η υδραυλική αγωγιμότητα στον κορεσμό και  $p$  παράμετρος κατανομής πόρων.

Οι παράμετροι προσαρμογής του μοντέλου  $\alpha$ ,  $m$ ,  $n$  προσδιορίστηκαν από το πρόγραμμα RETC χρησιμοποιώντας τα πειραματικά δεδομένα της καμπύλης υγρασίας και της υδραυλικής αγωγιμότητας. Η τιμή της παραμέτρου  $p$  ορίστηκε ως  $p=0.5$ , τιμή που χρησιμοποιείται ευρέως (Mualem, 1976).

### 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

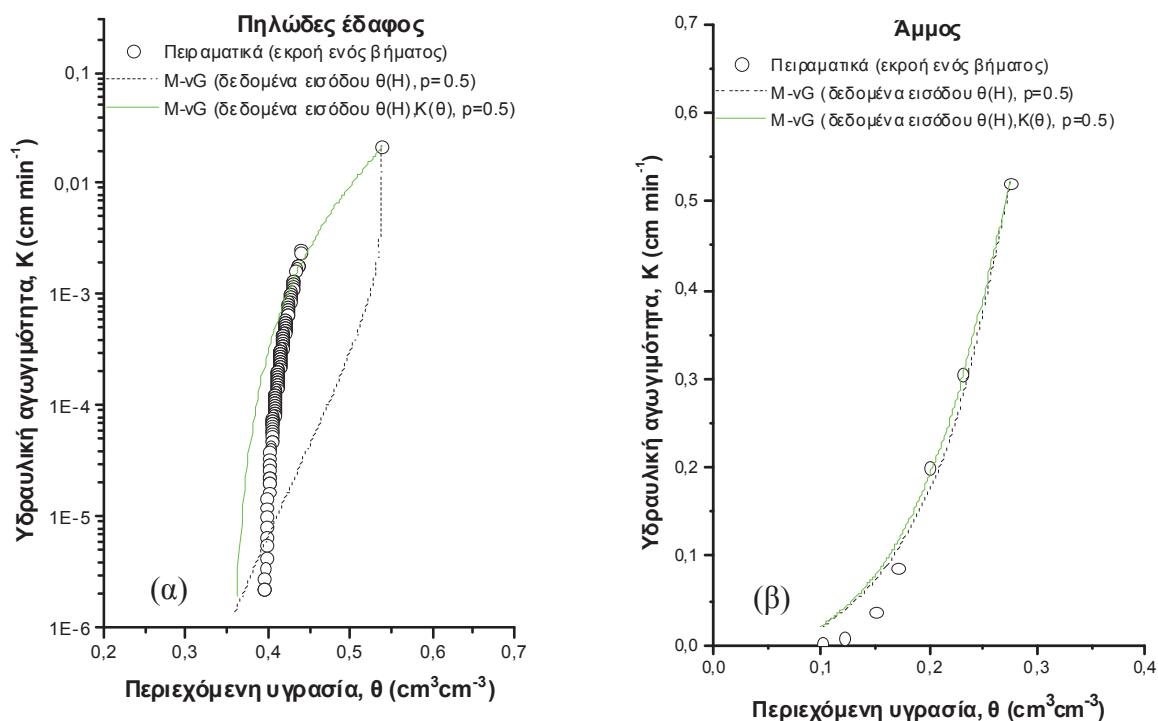
Στο Σχήμα 1 απεικονίζονται οι κλάδοι αποστράγγισης της χαρακτηριστικής καμπύλης υγρασίας,  $\theta(H)$  ενός πηλώδους εδάφους (Σχήμα 1α) και μιας άμμου (Σχήμα 1β), όπως προέκυψαν πειραματικά (συσκευή Haines) και υπολογιστικά χρησιμοποιώντας την εξίσωση van Genuchten μέσω του προγράμματος RETC. Οι παράμετροι προσαρμογής του μοντέλου  $\alpha$ ,  $n$ , και  $\theta_r$ , καθώς και ο συντελεστής προσδιορισμού  $R^2$  δίνονται για κάθε πορώδες μέσο στο Σχήμα 1α,β και όπως φαίνεται υπάρχει πολύ καλή σύγκλιση μεταξύ πειραματικών και προβλεπόμενων τιμών.



**Σχήμα 1.** Συγκριτική απεικόνιση της πειραματικής και της προβλεπόμενης από την εξίσωση van Genuchten χαρακτηριστικής καμπύλης υγρασίας κατά την αποστράγγιση δύο πορώδων μέσων: α) ενός πηλώδους εδάφους (22% clay, 39% silt, 39% sand) και β) μιας άμμου (0.2 mm < d < 0.5 mm).

Στο Σχήμα 2 δίνονται οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας συναρτήσει της υγρασίας,  $K(\theta)$ , των δύο πορώδων μέσων που μελετήθηκαν, όπως προέκυψαν από την εξ. (3), χρησιμοποιώντας την εξ. (2) (Valiantzas et al., 2007), λαμβάνοντας υπόψη τα πειραματικά δεδομένα εκροής ενός βήματος, και την καμπύλη υγρασίας. Επίσης, παρουσιάζονται και οι

προβλέψεις  $K(\theta)$  του μοντέλου Muallem-van Genuchten (M-vG), όπως προέκυψαν από το υπολογιστικό πρόγραμμα RETC με δεδομένα εισαγωγής: α) τις πειραματικές τιμές  $\theta(H)$  και την μετρημένη υδραυλική αγωγιμότητα στον κορεσμό  $K_s$  και β) τις πειραματικές τιμές  $\theta(H)$ , την  $K_s$  και τις  $K(\theta)$  από τα πειραματικά δεδομένα εκροής ενός βήματος. Οι παράμετροι προσαρμογής του μοντέλου M-vG και για τα δύο πορώδη μέσα δίνονται στον Πίνακα 1.



**Σχήμα 2.** Υδραυλική αγωγιμότητα συναρτήσει της υγρασίας ενός πηλώδους εδάφους και μιας άμμου, όπως προέκυψαν: α) από πείραμα εκροής ενός βήματος, β) από το μοντέλο M-vG με δεδομένα εισόδου τις πειραματικές τιμές  $\theta(H)$  και  $K_s$  και γ) από το μοντέλο M-vG με δεδομένα εισόδου τις πειραματικές τιμές  $\theta(H)$ ,  $K_s$  και  $K(\theta)$ .

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2, η  $K(\theta)$  που προέκυψε από τα πειραματικά δεδομένα εκροής ενός βήματος δεν δίνει εκτίμηση της υδραυλικής αγωγιμότητας για τιμές κοντά στον κορεσμό λόγω αδυναμίας της μεθόδου εκροής ενός βήματος.

Η σύγκριση της  $K(\theta)$  από τα πειραματικά δεδομένα εκροής με τις προβλέψεις  $K(\theta)$  από το μοντέλο M-vG έδειξε ότι στην περίπτωση του πηλώδους εδάφους (Σχήμα 2α) η προβλεπόμενη  $K(\theta)$  από δεδομένα εισόδου μόνο την πειραματική  $\theta(H)$  και την  $K_s$  για  $p=0.5$ , που αποτελεί την πιο συνηθισμένη περίπτωση χρήσης, αδυνατεί να περιγράψει την  $K(\theta)$ . Ενώ στην περίπτωση που χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου οι πειραματικές τιμές  $\theta(H)$ ,  $K_s$  και  $K(\theta)$ , η προσαρμογή του μοντέλου είναι καλύτερη δίνοντας και μια εκτίμηση της  $K$  για τιμές υγρασίας κοντά στον κορεσμό, που αδυνατεί να δώσει η μέθοδος εκροής ενός βήματος. Όμως, παρόλα αυτά, φαίνεται ότι για υγρασίες μικρότερες από 0.43 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> το μοντέλο υπερεκτιμά κατά πολύ την υδραυλική αγωγιμότητα.

Στην περίπτωση της άμμου παρατηρείται σχετικά καλή σύγκλιση των αποτελεσμάτων μεταξύ προβλεπομένων και πειραματικών  $K(\theta)$  και στις δύο περιπτώσεις πρόβλεψης (Σχήμα 2β).

Αξίζει να σημειωθεί, ότι η αδυναμία του μοντέλου να περιγράψει ικανοποιητικά την  $K$ , στην περίπτωση του πηλώδους εδάφους, μπορεί να οφείλεται στη δεδομένη τιμή του  $p=0.5$ , δεδομένου ότι η παράμετρος  $p$  του μοντέλου Muallem (παράμετρος που εξαρτάται

από την αρχιτεκτονική των πόρων του πορώδους μέσου) μπορεί να διαφέρει σημαντικά από την τιμή  $p=0.5$  που λαμβάνεται συνήθως (Leij et al., 1992; Schaap and van Genuchten, 2006; Kargas and Londra, 2015).

**Πίνακας 1.** Παράμετροι προσαρμογής  $n$ ,  $\theta_r$ ,  $p$  του μοντέλου Mualem-van Genuchten χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα RETC για δεδομένα εισόδου: α) τις πειραματικές τιμές  $\theta(H)$  και τη μετρημένη υδραυλική αγωγιμότητα στον κορεσμό  $K_s$  και β) τις πειραματικές τιμές  $\theta(H)$ ,  $K_s$  και  $K(\theta)$

Πορώδες μέσο	RETC Mualem-van Genuchten	$n$	$\theta_r$ ( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ )	$p$	$K_s$ ( $\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$ )
Πηλώδες έδαφος	δεδομένα εισόδου $\theta(H)$ , $K_s$	1.1672	0	0.5	0.022
	δεδομένα εισόδου $\theta(H)$ , $K_s$ , $K(\theta)$	6.537	0.354	0.5	0.022
Άμμος	δεδομένα εισόδου $\theta(H)$ , $K_s$	12.445	0.0126	0.5	0.521
	δεδομένα εισόδου $\theta(H)$ , $K_s$ , $K(\theta)$	10.138	0.0126	0.5	0.521

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε δύο πορώδη μέσα, μια άμμο και ένα πηλώδες έδαφος, προσδιορίστηκαν οι δύο βασικές υδραυλικές ιδιότητες, καμπύλη υγρασίας και υδραυλική αγωγιμότητα, στο ίδιο δείγμα, χρησιμοποιώντας μια εύκολη και γρήγορη μεθοδολογία. Οι πειραματικές τιμές  $K(\theta)$  που προέκυψαν από δεδομένα εκροής ενός βήματος συγκρίθηκαν με αυτές που προέβλεψε το μοντέλο Mualem-van Genuchten για διάφορα σενάρια προσαρμογής και η ανάλυση των αποτελεσμάτων έδειξε την αδυναμία του μοντέλου να περιγράψει ικανοποιητικά την υδραυλική αγωγιμότητα σε μια από τις δύο περιπτώσεις που μελετήθηκαν.

#### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Brooks, R.H. and Corey, A.T., 1964. *Hydraulic properties of porous media*. Hydrology Paper No.3, Civil Engineering Department, Colorado State University, Fort Collins, CO.
- Burdine, N.T., 1953. *Relative permeability calculations from pore-size distribution data*. Petr. Trans., Am. Inst. Mining Metall. Eng., 198, 71-77.
- Childs, E.C., and Collis-George, N., 1950. *The permeability of porous materials*. Proc. Roy. Soc., London, 201A, 392-405.
- Doering, E.J., 1965. *Soil water diffusivity by the one-step method*. Soil Science, 99, 322-326.
- Gupta, S.C., Farrel, D.A., Larson, W.E., 1974. *Determining effective soil water diffusivities from one-step outflow experiments*. Soil Sci. Soc. Am. J., 38, 710-716.
- Haines, W.B., 1930. *Studies in the physical properties of soils. V. The hysteresis effect in capillary properties and the modes of moisture distribution associated therewith*. J. Agr. Sci., 20, 97-116.
- Kargas, G., Londra, P.A., 2015. *Effect of tillage practices on the hydraulic properties of a loamy soil*. Desalination and Water Treatment, 54(8), 2138-2146.
- Klute, A. and Dirksen, C., 1986. *Methods of Soil Analysis*. Part 1, 2nd ed. Agron. Monogr. 9, ASA and SSSA, Madison, WI, pp. 687-734.

- Leij, F.J., van Genuchten, M.Th., Yates, S.R., Russell, W.B. and Kaveh, F., 1992. *RETc: A computer program for analyzing soil water retention and hydraulic conductivity data*. p. 263-272. In M.Th. van Genuchten, F.J. Leij and L.J. Lund (ed.) *Proc. Int. Workshop on Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils*. University of California, Riverside, CA.
- Londra, P.A., 2010. *Simultaneous determination of water retention curve and unsaturated hydraulic conductivity of substrates using a steady-state laboratory method*. *HortScience*, 45(7), 1106-1112.
- Londra, P.A., Valiantzas, J.D., 2011. *Soil water diffusivity determination using a new two-point outflow method*. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 75, 1343–1346.
- Mualem, Y., 1976. *A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media*. *Water Resour. Res.*, 12, 513-522.
- Passioura, J.B., 1976. *Determining soil water diffusivities from one step outflow experiments*. *Aust. J. Soil Res.*, 15, 1-8.
- Poulovassilis, A., Polychronides, M. and Kerkides, P., 1988. *Evaluation of various computational schemes in calculating unsaturated hydraulic conductivity*. *Agric. Water Management*, 13, 317-327.
- Schaap, M.G. and van Genuchten M.Th., 2006. *A modified Mualem-van Genuchten formulation for improved description of the hydraulic conductivity near saturation*. *Vadose Zone J.*, 5, 27-34.
- Talsma, T., 1985. *Prediction of hydraulic conductivity from soil water retention data*. *Soil Sci.*, 140(3), 184-188.
- Valiantzas, J.D., 1989. *A simple approximate equation to calculate diffusivities from one-step outflow experiments*. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 53, 342-349.
- Valiantzas, J.D., and Salsalou, A., 1991. *Laboratory determination of unsaturated hydraulic conductivity using a generalized-form hydraulic model*. *J. Hydrol.*, 128, 293-304.
- Valiantzas, J.D., Londra, P. and Salsalou, A., 2007. *Explicit formulae for the soil water diffusivity using the one-step outflow technique*. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 71, 1685-1693.
- Valiantzas, J.D., Londra, P.A., 2008. *Direct determination of the Brooks–Corey hydraulic functions by fitting an extended power function to the outflow method data*. *J. Hydrol.*, 362, 128– 133.
- Valiantzas, J.D., Londra, P.A., 2012. *Simplified equations for the determination of the hydraulic properties of horticultural substrates by one-step outflow experiments*. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 175, 49–52.
- van Genuchten, M.Th., 1980. *A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils*. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44, 892-898.
- van Genuchten, M.Th., Leij, F.J., and Yates, S.R., 1991. *The RETc code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils*. U.S.D.A., Riverside, California.





## ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΞΑΤΜΟΔΙΑΠΝΟΗΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ (ET<sub>o</sub>) ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΕΠΙΓΕΙΩΝ ΚΑΙ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΤΗΝ ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΕΛΛΑΔΑ

Σ. Αλεξανδρή<sup>1,✉</sup>, Δ. Τσεσμελής<sup>1,2</sup>, Ν. Σκόνδρας<sup>1,2</sup>, Δ. Σταματάκος<sup>1,2</sup>, Κ. Βασιλάκου<sup>1,2</sup>,  
Ι. Γκώτσης<sup>1,2</sup>, Β. Φασούλη<sup>1</sup>, Η. Βιτωράτος<sup>3</sup>, Κ. Χατζηθωμάς<sup>1</sup>, Ν. Προύτσος<sup>1</sup>, Χ.Καραβίτης<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων & Γεωργικής Μηχανικής, Γ.Π.Α., Ιερά Οδός 75, Αθήνα, 11855,  
✉ stalex@aua.gr

<sup>2</sup>Water Research & Application, Ιωνίας, Καρλόβαςι Σάμου, 83200.

<sup>3</sup>Syngenta Hellas A.E.B.E., Λ. Ανθούσας, Ανθούσα Αττικής 15349

### Περίληψη

Μέχρι σήμερα, η χρήση δορυφορικών δεδομένων με στόχο την εκτίμηση της πραγματικής εξατμοδιαπνοής (actual evapotranspiration) ή της εξατμοδιαπνοής αναφοράς (reference evapotranspiration) έχει χρησιμοποιηθεί σε μεγάλο αριθμό ερευνών. Ωστόσο, η εφαρμογή και σύγκριση τριών εμπειρικών μεθόδων (Hargreaves, COPAIS και Valiatzas) με τη μέθοδο FAO56 Penman–Monteith με παράλληλη χρήση επίγειων και δορυφορικών δεδομένων πραγματοποιείται για πρώτη φορά. Η παρούσα εργασία αποσκοπεί να αποδείξει ότι οι εμπειρικές μέθοδοι υπολογισμού της ET<sub>o</sub> μπορούν να εφαρμοστούν σε χωρικό επίπεδο με τη χρήση δορυφορικών δεδομένων και να συνεισφέρουν στον ακριβή υπολογισμό των αναγκών άρδευσης των καλλιεργειών με σκοπό την εξοικονόμηση νερού στην γεωργία.

**Λέξεις κλειδιά:** Εξατμοδιαπνοή αναφοράς, Δορυφορικά δεδομένα, Επίγεια δεδομένα, Εμπειρικές μέθοδοι

## COMPARATIVE ANALYSIS OF REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION (ET<sub>o</sub>) USING TERRESTRIAL AND SATELLITE DATA IN CENTRAL GREECE

S. Alexandris<sup>1,✉</sup>, D. Tsesmelis<sup>1,2</sup>, N. Skondras<sup>1,2</sup>, D. Stamatakis<sup>1,2</sup>, C. Vasilakou<sup>1,2</sup>,  
I. Gkotsis<sup>1,2</sup>, V. Fassouli<sup>1</sup>, E. Vitoratos<sup>3</sup>, C. Chatzithomas<sup>1</sup>, N. Proutsos<sup>1</sup>, C. Karavitis<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Department of Natural Resources Development & Agricultural Engineering, A.U.A., 75 Iera Odos Str,  
11855 Athens, Greece, ✉ stalex@aua.gr

<sup>2</sup>Water: Research & Application, Ionias, Karlovassi Samos Island, 83200, Greece

<sup>3</sup>Syngenta Hellas A.E.V.E., Anthoussa Av., 15349, Anthoussa, Attica, Greece

### Abstract

Up to date, the use of satellite data in the calculation of the actual or reference evapotranspiration has been addressed by numerous researchers. However, the application of three empirical methods (Hargreaves, COPAIS and Valiatzas) and their comparison with the FAO56 Penman –Monteith method using both terrestrial and satellite data is presented for the first time. The present effort aims at highlighting the usefulness of the spatial application of those empirical methods which may contribute towards the accurate determination of the crop water requirements and limit the uncontrollable wasting of that resource in the agricultural sector.

**Key words:** Reference Evapotranspiration, Satellite data, Terrestrial data, Empirical methods

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο αγροτικός τομέας, και κυρίως η άρδευση των καλλιεργειών, αποτελεί μια από τους σημαντικότερες πηγές κατανάλωσης νερού. Σε ευρωπαϊκό επίπεδο, η άρδευση καταναλώνει περίπου το 24% του συνολικού μέσου ετήσιου όγκου νερού. Ωστόσο, η εντατική εφαρμογή της άρδευσης στην νότια Ευρώπη (Ελλάδα, Ιταλία, Πορτογαλία, Κύπρος, Ισπανία) ανεβάζει το ποσοστό αυτό στο 80%. Ο ακριβής προσδιορισμός των καθημερινών απαιτήσεων των καλλιεργειών σε νερό (Εξατμοδιαπνοή αναφοράς - ΕΤο) σε μικρό βήμα εκτίμησης (ημερήσιο) θα μπορούσε δυναμικά να περιορίσει την ανεξέλεγκτη άρδευση, αυξάνοντας παράλληλα την αποδοτικότητα των καλλιεργειών (Pereira et al., 1999). Ωστόσο, στην Ελλάδα, η έλλειψη επαρκών και έγκυρων δεδομένων αποτελεί ιδιαίτερο πρόβλημα. Αυτό το κενό μπορεί να καλυφθεί με τη χρήση δορυφορικών δεδομένων (Esty et al., 2005, Ravenga, 2005; Hsu et al., 2014; de Sherbinin et al., 2014).

Το πλεονέκτημα χρήσης δορυφορικών δεδομένων συνεισφέρουν στην βελτίωση του συστήματος παραγωγής αγροτικών προϊόντων, στηριζόμενα στη διαχείριση των εισροών σε επίπεδο αγρού σύμφωνα με τις πραγματικές υδατικές ανάγκες της καλλιέργειας τόσο χωρικά όσο και χρονικά. Ένα σύστημα της γεωργίας ακριβείας στηρίζεται στην δυνατότητα που εξασφαλίζει η νέα τεχνολογία στο να διακρίνει την χωρική παραλλακτικότητα των αναγκών των καλλιεργειών. Κάτι ανάλογο θα ήταν αδύνατο μόνο με τη χρήση επίγειων δεδομένων (Moran and Brondizio, 1994). Ωστόσο, η παράλληλη χρήση επίγειων δεδομένων μπορεί να πιστοποιήσει την ακρίβεια των δορυφορικών δεδομένων.

Μέχρι σήμερα, η χρήση δορυφορικών δεδομένων με στόχο την εκτίμηση της πραγματικής εξατμοδιαπνοής (actual evapotranspiration) ή της εξατμοδιαπνοής αναφοράς (reference evapotranspiration) έχει χρησιμοποιηθεί σε μεγάλο αριθμό ερευνών (Bailey, 1990; Ramos et al., 2009; Blanta et al., 2011; Evans et al., 2011; Irmak et al., 2011). Ωστόσο, η εφαρμογή και σύγκριση τριών εμπειρικών μεθόδων (Hargreaves, COPAIS και Valiatzas) με τη μέθοδο FAO56 Penman-Monteith (FAO56PM) με παράλληλη χρήση επίγειων και δορυφορικών δεδομένων πραγματοποιείται για πρώτη φορά. Η παρούσα εργασία διερευνά την συμβολή εμπειρικών μεθόδων υπολογισμού της ΕΤο σε ημερήσιο βήμα εκτίμησης, σε χωρικό επίπεδο με χρήση δορυφορικών δεδομένων και την δυνατότητα συνεισφοράς τους στον ακριβή υπολογισμό των αναγκών άρδευσης των καλλιεργειών με σκοπό την εξοικονόμηση νερού στην γεωργία.

## 2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Στη παρούσα εργασία, πραγματοποιείται συγκριτική αξιολόγηση των εκτιμήσεων της ημερήσιας ΕΤο που προκύπτουν από επίγεια και δορυφορικά δεδομένα. Πιο συγκεκριμένα, η ΕΤο υπολογίζεται με την εφαρμογή τριών εμπειρικών μεθόδων με τη χρήση επίγειων και δορυφορικών δεδομένων. Οι εκτιμήσεις αυτές της ΕΤο συγκρίνονται με τη συνδυαστική μέθοδο ΕΤο - FAO56 PM όπως αυτή έχει προταθεί από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Τροφίμων (FAO56 Irrigation and Drainage paper) και περιγράφεται από μεγάλο αριθμό ερευνητών (Pereira et al., 1996; Walter et al., 2005; Allen et al., 1998; Alexandris et al., 2008). Τα επίγεια δεδομένα για την εφαρμογή τόσο των τριών εμπειρικών μεθόδων όσο και της μεθόδου ΕΤο FAO56-PM, προέρχονται από τον πρότυπο αυτόματο Αγρομετεωρολογικό σταθμό (ΑΜΣ) που βρίσκεται εγκατεστημένος σε επαρκώς αρδευόμενη έκταση γρασιδιού μισού στρέμματος εντός του πειραματικού αγρού του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών στη περιοχή της Αλιάρτου (23.092N, 38.392E) Βοιωτίας.

Τα δορυφορικά δεδομένα για την εφαρμογή των τριών εμπειρικών μεθόδων έχουν διατεθεί από την εταιρεία Syngenta Hellas A.E.B.E. Αυτά καλύπτουν έκταση 770.06 km<sup>2</sup>.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι επιχειρήθηκε η εκτίμηση ημερήσιων τιμών ΕΤο και με τη χρήση δορυφορικών δεδομένων για την μέθοδο FAO56 PM για τις αντίστοιχες εκτιμήσεις με τα επίγεια δεδομένα. Όλες οι συγκριτικές αξιολογήσεις των μεθόδων καλύπτουν τη χρονική περίοδο του περασμένου έτους (01/01/2014 – 31/12/2014).

## 2.1. Μέθοδοι Υπολογισμού Εξατμοδιαπνοής

### 2.1.1. FAO56 Penman-Monteith (Allen et al., 1998)

Η εξίσωση FAO56-PM για τον υπολογισμό της ΕΤο σε ημερήσια βάση έχει τη μορφή της εξίσωσης 1.

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

Όπου, ο όρος ΕΤο αναφέρεται στην εξατμοδιαπνοή ( $\text{mm day}^{-1}$ ),  $R_n$  είναι η καθαρή ακτινοβολία στην επιφάνεια της καλλιέργειας ( $\text{MJ m}^{-2}\text{day}^{-1}$ ),  $G$  είναι η πυκνότητα της ροής θερμότητας του εδάφους ( $\text{MJ m}^{-2}\text{day}^{-1}$ ),  $T$  είναι η μέση ημερήσια θερμοκρασία του αέρα σε υψόμετρο 2 μέτρων ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $u_2$  είναι η ταχύτητα του ανέμου σε υψόμετρο 2 μέτρων ( $\text{m s}^{-1}$ ),  $e_s$  είναι η τάση κορεσμένων υδρατμών (kPa),  $e_a$  είναι η πραγματική τάση υδρατμών (kPa),  $\Delta$  είναι η κλίση της καμπύλης κορεσμένων υδρατμών ( $\text{kPa}^{\circ}\text{C}^{-1}$ ) και  $\gamma$  είναι ο ψυχομετρικός συντελεστής ( $\text{kPa}^{\circ}\text{C}^{-1}$ ). Η ημερήσια πυκνότητα ροής θερμότητας του εδάφους λαμβάνεται  $G=0$ .

### 2.1.2. Hargreaves (Hargreaves and Samani, 1985)

Η εξίσωση Hargreaves (1975) η οποία τροποποιήθηκε το 1985 για συνθήκες γρασιδιού και απαιτεί μετρήσεις θερμοκρασίας και ηλιακής ακτινοβολίας ακολουθεί την εξίσωση 2.

$$ET_o = 0.0023(T_{max} - T_{min})^{0.5}(T_m + 17.8)R_a \quad (2)$$

$T_{avg}$ ,  $T_{max}$  και  $T_{min}$  είναι η μέση, η μέγιστη και η ελάχιστη ημερήσια θερμοκρασία αέρα ( $^{\circ}\text{C}$ ) αντίστοιχα και η  $R_a$  είναι η ακτινοβολία στο εξωτερικό όριο της ατμόσφαιρας ( $\text{mmday}^{-1}$ ) εκτιμώμενη από το γεωγραφικό πλάτος και την ημέρα του έτους (DOY).

### 2.1.3 Copais (Alexandris et al., 2006)

Η μορφή της συγκεκριμένης μεθόδου για τον υπολογισμό της ημερήσιας ΕΤο εκφράζεται από την εξίσωση 3 καθώς και από τις εξισώσεις 3α και 3β.

$$ET_o = m_1 + m_2 C_2 + m_3 C_1 + m_4 C_1 C_2 \quad (3)$$

Όπου  $m_1 = 0.057$ ,  $m_2 = 0.277$ ,  $m_3 = 0.643$ ,  $m_4 = 0.0124$  και

$$C_1 = 0.6416 - 0.00784RH + 0.372R_s - 0.00264R_s RH \quad (3\alpha)$$

$$C_2 = -0.0033 + 0.00812T + 0.101R_s + 0.00584R_s T \quad (3\beta)$$

$RH$  είναι η μέση σχετική υγρασία (%),  $R_s$  είναι η μέση ηλιακή εισερχόμενη ακτινοβολία ( $\text{MJ m}^{-2}\text{day}^{-1}$ ) και  $T$  είναι η μέση ημερήσια θερμοκρασία αέρα ( $^{\circ}\text{C}$ ).

### 2.1.4. Valiantzas (Valiantzas, 2013)

Η εξίσωση που χρησιμοποιήθηκε για την εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου εκφράζεται από την εξίσωση 4 η οποία δεν απαιτεί δεδομένα για τη ταχύτητα ανέμου.

$$ET_o \approx 0.0393R_s \sqrt{T+9.5} - 0.19R_s^{0.6} \varphi^{0.15} + 0.078(T+20) \left(1 - \frac{RH}{100}\right) \quad (4)$$

Όπου,  $R_s$  είναι η ηλιακή ακτινοβολία ( $\text{MJ m}^{-2}\text{day}^{-1}$ ),  $T$  είναι η θερμοκρασία αέρα ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $RH$  είναι η σχετική υγρασία (%) και  $\varphi$  το γεωγραφικό πλάτος σε rad.

### 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Τα περιγραφικά στατιστικά των κλιματικών δεδομένων που μετρήθηκαν από τον επίγειο σταθμό (ΑΑΣ) και από τον δορυφόρο (SAT) για αριθμό ημερών  $N = 365$  (έτος 2014) παρουσιάζονται στον Πίνακα 1, συγκριτικά.

**Πίνακας 1.** Περιγραφικά στατιστικά επίγειων και δορυφορικών (Sat) δεδομένων

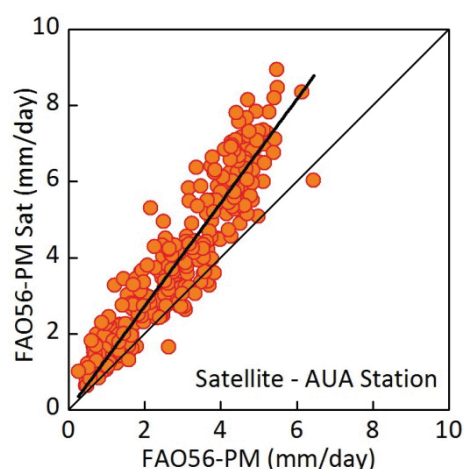
	Min		Max		Mean		Std. Dev		Range	
	ΑΑΣ	SAT	ΑΑΣ	SAT	ΑΑΣ	SAT	ΑΑΣ	SAT	ΑΑΣ	SAT
$T_{avg}$	0.5	2.1	31.4	30.1	17.0	17.3	6.5	6.7	30.9	28.0
$T_{max}$	1.0	3.4	40.4	40.1	23.9	23.4	7.7	7.8	39.4	36.7
$T_{min}$	-1.1	-0.5	21.3	23.6	10.1	11.9	5.6	5.8	22.4	24.1
$RH$	31.7	35.0	100.0	91.0	76.0	67.5	13.8	13.9	68.3	56.0
$RH_{max}$	61.8	51.0	100.0	98.0	98.5	83.9	5.1	10.4	38.2	47.0
$RH_{min}$	10.4	12.0	100.0	86.0	46.4	47.0	19.0	16.6	89.5	74.0
$u_2$	0.0	1.3	3.3	8.1	0.8	2.7	0.5	1.0	3.3	6.8
$R_s$	12.0	42.0	358.2	343.4	191.8	203.6	103.2	87.9	346.2	301.4

Με βάση το συντελεστή Pearson ( $r$ ), διαπιστώνεται ότι οι μέσες ημερήσιες τιμές όλων των κλιματικών επίγειων παραμέτρων παρουσιάζουν πολύ ικανοποιητική συσχέτιση με τις αντίστοιχες εκτιμήσεις που προέρχονται από τα δορυφορικά δεδομένα:  $T_{avg}$  (0.986),  $T_{max}$  (0.981),  $T_{min}$  (0.940),  $RH_{avg}$  (0.869),  $RH_{min}$  (0.842),  $R_s$  (0.957). Αντίθετα, η  $RH_{max}$  του σταθμού παρουσιάζει πολύ μικρή συσχέτιση με την αντίστοιχη μέση εκτίμηση του δορυφόρου (0.276). Αυτό οφείλεται στην ύπαρξη των υγρών συνθηκών του υπερκείμενου μικροκλίματος στον σταθμό (ΑΑΣ) που «ενθαρρύνεται» από την πλήρη επάρκεια εδαφικού νερού λόγω διαπνοής (ενεργό γρασίδι ύψους 8-12 cm) όλο τον χρόνο, και ιδιαίτερα στους θερμούς μήνες. Τέλος, η ταχύτητα του ανέμου ( $u_2 - u_{sat}$ ) παρουσιάζει μέτρια συσχέτιση μεταξύ των επίγειων και δορυφορικών δεδομένων (0.647).

#### 3.1. Σύγκριση FAO56-PM vs FAO56-PM<sub>sat</sub>

Η Εικόνα 1 εμφανίζει την γραμμική τάση και διασπορά που προκύπτει από τις αντίστοιχες εκτιμήσεις ΕΤο (FAO56-PM vs FAO56-PM<sub>sat</sub>) όπως προκύπτουν από την χρήση επίγειων και δορυφορικών δεδομένων. Είναι εμφανές ότι η FAO56-PM<sub>sat</sub> υπερεκτιμά κατά 38.9 % στο σύνολο του έτους συστηματικά το άθροισμα της ΕΤο που προκύπτει από τα επίγεια δεδομένα κατά 358,64 mm (1280.7 mm και 922.0 mm αντίστοιχα).

Εν συνεχεία επιχειρήθηκε συγκριτική αξιολόγηση των εμπειρικών μεθόδων σε σχέση με την μέθοδο αναφοράς. Η ανάλυση που επιχειρήθηκε έγινε σύμφωνα με τους στατιστικούς δείκτες που προτείνονται στην διεθνή βιβλιογραφία όπως περιγράφονται και αιτιολογούνται σε σχετικές εργασίες (Willmott and Wicks, 1980; Fox,



**Εικόνα 1.** Γραμμική διασπορά FAO56-PM vs FAO56-PM SAT



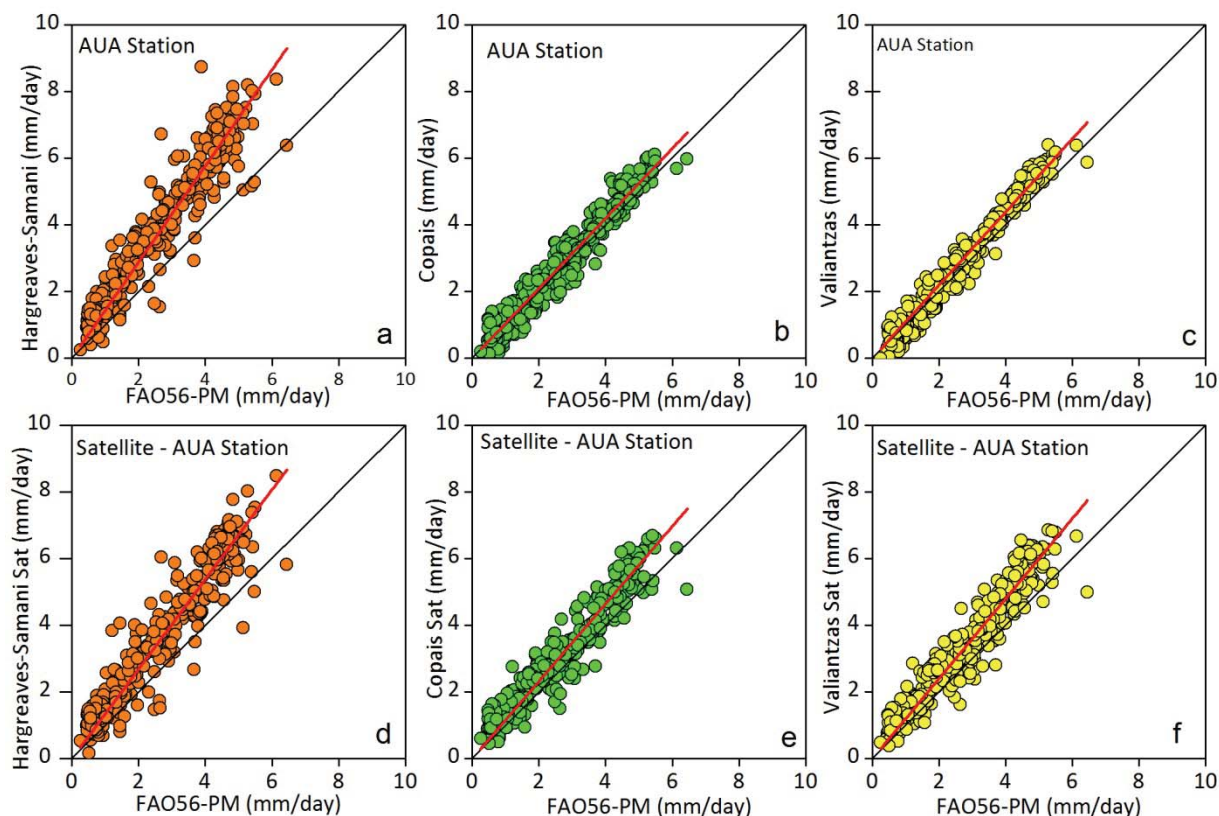
1981; Willmott, 1981, 1982; Alexandris et al., 2008). Υπολογίστηκαν, ο Δείκτης Συμφωνίας (Index of Agreement-d), η τετραγωνική ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (root mean square error-RMSE), το μέσο απόλυτο σφάλμα (mean absolute error-MAE) και το μέσο σφάλμα μεροληψίας (mean bias error-MBE). Οι παράμετροι συμπληρώνονται με την κλίση της γραμμικής παλινδρόμησης (a) και intercept (b),  $R^2$  και εμφανίζονται στον Πίνακα 2 για όλες τις συγκρίσεις.

**Πίνακας 2.** Στατιστικοί δείκτες αξιολόγησης των συγκρινόμενων εμπειρικών μεθόδων έναντι της FAO56PM (ΑΑΣ)

	a	b	MBE	RMSE	MAE	Sd <sup>2</sup>	D	R <sup>2</sup>
FAO56-PM	-	-	-	-	-	-	-	-
Hargreaves-Samani	1.322	0.417	1.231	1.477	1.258	0.667	0.857	0.911
Copais	1.084	-0.121	0.091	0.413	0.343	0.162	0.984	0.952
Valiantzas	1.167	-0.245	0.178	0.443	0.382	0.165	0.983	0.972
FAO56-PM <sub>SAT</sub>	1.291	0.246	0.983	1.278	1.008	0.669	0.886	0.898
Hargreaves-Samani <sub>SAT</sub>	1.236	0.379	0.974	1.210	1.026	0.515	0.893	0.907
Copais <sub>SAT</sub>	1.082	0.279	0.485	0.682	0.562	0.229	0.958	0.930
Valiantza <sub>SAT</sub>	1.136	0.226	0.569	0.781	0.636	0.286	0.948	0.929

### 3.2. Συγκριτική αξιολόγηση των μεθόδων ΕΤο - ΑΑΣ & SAT

Από τη σύγκριση εκτίμησης της ΕΤο των τριών εμπειρικών μεθόδων σε ημερήσιο βήμα υπολογισμού (Hargreaves, Copais, Valiantzas), έναντι της επιλεγόμενης μεθόδου αναφοράς FAO56-PM προέκυψαν οι αποκλίσεις των γραμμικών τάσεων όπως εμφανίζονται στην Εικόνα 2.



**Εικόνα 2.** Σύγκριση των εμπειρικών μεθόδων υπολογισμού της ΕΤο (mm/day) από επίγεια (a,b,c) και δορυφορικά δεδομένα (d,e,f) σε σχέση με την FAO56-PM (δεδομένα ΑΑΣ).

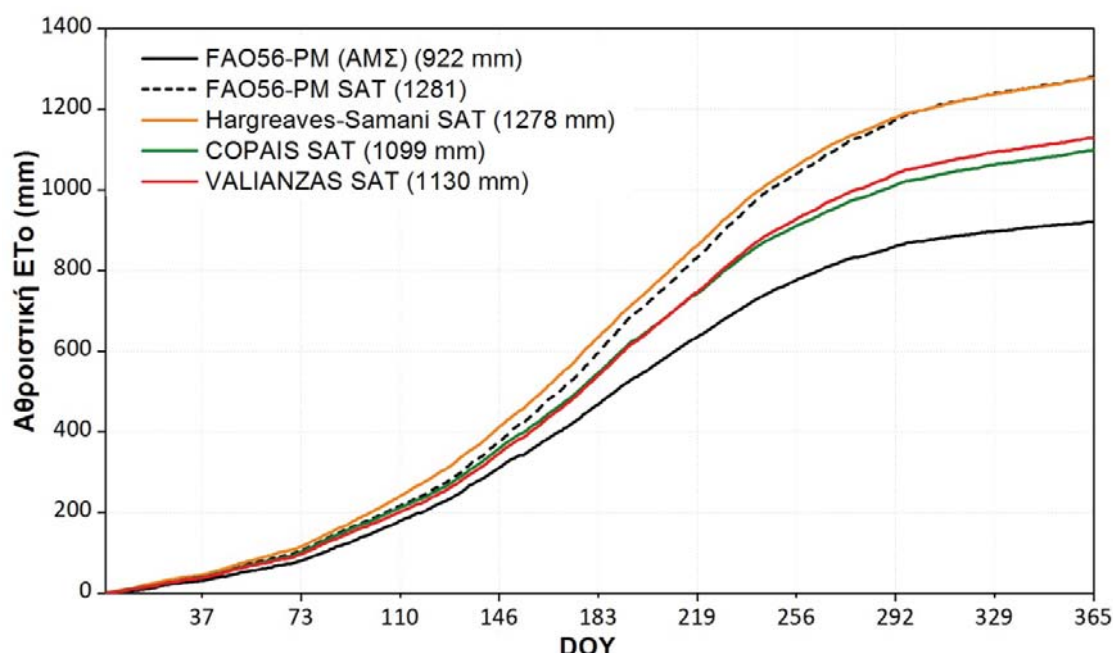
Η χρήση επίγειων δεδομένων των μέσων ημερήσιων τιμών (T, RH, Rs) από τον σταθμό (ΑΑΣ) έδωσε μια ελάχιστη υπερεκτίμηση των εμπειρικών μεθόδων Copais (+3.6%) και Valiantzas (7.05%) σε ετήσια βάση ενώ η υπερεκτίμηση της μεθόδου (απουσία RH) Hargreaves-Samani ανήλθε στο +48.7% χαρακτηριζόμενη ως υπέρμετρα υψηλή. Αντίστοιχοι υπολογισμοί με την χρήση των δορυφορικών δεδομένων για το ίδιο ακριβώς διάστημα δίνουν εκτιμήσεις με αρκετή διαφοροποίηση των δύο πρώτων μεθόδων, COPAIS +19.20% και Valiantzas 22.52% και την Hargreaves-Samani να παρουσιάζει μείωση κατά 10% στην υπερεκτίμηση +38.56%.

Δεδομένου ότι η συνολική ΕΤο για της μεθόδου αναφοράς (δεδομένα ΑΜΣ) FAO56-PM ήταν 922.04 mm οι αντίστοιχες ετήσιες αθροιστικές εκτιμήσεις των διαδοχικών ημερήσιων ρυθμών εξατμοδιαπνοής αναφοράς των μεθόδων με τα συνολικά ποσοστά υπερεκτίμησης αυτών παρουσιάζονται στο πίνακα 3 και στην εικόνα 3.

Στην εικόνα 3 παρουσιάζονται οι ημερήσιες αθροιστικές εκτιμήσεις εξατμοδιαπνοής αναφοράς όλων των μεθόδων για το έτος 2014 στον Αλίαρτο από το σταθμό ΑΑΣ.

**Πίνακας 3.** Ετήσια εκτίμηση ΕΤο (mm/year) και ποσοστά υπερεκτιμήσεων των μεθόδων σε σχέση με την μέθοδο αναφοράς (ref)

Προέλευση δεδομένων	ΕΤο (mm/year)			
	FAO56-PM	Hargreaves	Copais	Valiantzas
ΑΜΣ(επίγεια)	922 (Ref)	1371 (+49%)	955 (+3.6%)	987 (+7.0%)
SAT(δορυφόρου)	1281 (+39%)	1277 (+38%)	1099 (+17%)	1130 (+22%)



**Εικόνα 3.** Οι διαφορές που προκύπτουν στο άθροισμα της ΕΤο από όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις ως προς την FAO56 Penman –Monteith (επίγεια δεδομένα ΑΜΣ).

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι να διερευνήσει αλλά και να επισημάνει την σπουδαιότητα αλλά και την δυνατότητα εφαρμογής ορισμένων εμπειρικών μεθόδων υπολογισμού της ΕΤο σε χωρική εκτίμηση με τη χρήση απλών δορυφορικών κλιματικών παραμέτρων ώστε να συνεισφέρουν στον ακριβή υπολογισμό των αναγκών των καλλιεργειών σε νερό. Οι εμπειρικές μέθοδοι υπολογισμού της ΕΤο όπως είναι εμφανές ότι

υπερτερούν συγκριτικά με τη μέθοδο αναφοράς (FAO56-PM) με την χρήση δορυφορικών δεδομένων. Αυτό οφείλεται πρωτίστως στην δυσκολία να αποτυπώσει ο δορυφόρος την πραγματική ταχύτητα του ανέμου πάνω από την καλλιέργεια. Δευτερευόντως η μέθοδος Penman-Monteith παρουσιάζει μεγάλη ευαισθησία στις παραμέτρους πυκνότητας ροής καθαρής ακτινοβολίας που σχετίζεται με το έδαφος (π.χ εδαφική ροή, ανακλαστικότητα επιφάνειας, μεγάλου μήκους ακτινοβολία (θερμοκρασία, ακτινοβολία, σχετική υγρασία). Τα εμπειρικά μοντέλα που λαμβάνουν υπόψη την σχετική υγρασία μπορούν να προσεγγίσουν ικανοποιητικά την ψυχομετρία της ατμόσφαιρας πάνω από την καλλιέργεια καθώς οι δορυφορικές εκτιμήσεις θερμοκρασίας σχ. Υγρασίας είναι πολύ ικανοποιητικές.

Τα αποτελέσματα αυτής της διερευνητικής προσέγγισης, με περιοχή εφαρμογής ένα πολύγωνο αγροτικής περιοχής (Αλιάρτο Βοιωτίας), έδειξαν ότι κάποιες από τις εμπειρικές μεθόδους που εξετάστηκαν μπορούν να αποφέρουν ικανοποιητικά αποτελέσματα και να γίνουν χρήσιμα εργαλεία. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με τις προσεγγίσεις που πραγματοποιήθηκαν, αποδεικνύεται ότι οι μέθοδοι Copais και Valiantzas, προσεγγίζουν αξιολογικά τις τιμές ΕΤο των επίγειων εκτιμήσεων της μεθόδου FAO56-PM αλλά συγχρόνως διαπιστώνεται και η ικανοποιητική προσέγγιση των τιμών εξατμοδιαπνοής αναφοράς σε αντίθεση με την απόδοση της FAO56-PM όταν γίνεται χρήση δορυφορικών δεδομένων (FAO56-PM<sub>SAT</sub>). Αντίθετα, η μέθοδος Hargreaves-Samani και στις δύο περιπτώσεις εμφανίζει σημαντική απόκλιση, επισημαίνοντας και την σημασία της σχετικής υγρασίας της ατμόσφαιρας ως απαραίτητη και θεμελιώδη παράμετρο.

Ωστόσο, προτείνεται εκτενέστερη έρευνα προκειμένου να προκύψουν σημαντικότερα ευρήματα καθώς η τεχνολογία εξέλιξης των αισθητήρων των δορυφόρων είναι ταχεία και συνεπώς αναβαθμίζεται ο ρόλος των εμπειρικών μεθόδων υπολογισμού της ΕΤο στο μέλλον.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς ευχαριστούν θερμά την εταιρεία Syngenta Hellas A.E.B.E. για τη συνεργασία και την παραχώρηση των δορυφορικών δεδομένων για την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Alexandris S., Kerkides, P., and Liakatas, A. 2006. *Daily reference evapotranspiration estimates by the "Copais" approach*. Agricultural Water Management, Volume 82, Issue 3, 24, Pages 371-386
- Alexandris, S., Stricevic, R., and Petkovic, S. 2008. *Comparative analysis of reference evapotranspiration from the surface of rainfed grass in central Serbia, calculated by six empirical methods against the Penman-Monteith formula*. European Water 21/22: 17-28, 2008
- Allen, R.G, Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M., 1998: *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and drainage paper 56, FAO, Rome.
- Bailey, J.O., 1990. *The Potential Value of Remotely Sensed Data in the Assessment of Evapotranspiration and Evaporation*. Remote Sensing Reviews, 4(2), 349-377.
- Blanta, A., Dalezios, N.R., Maliara, A. and Spyropoulos, N. 2011. *Monitoring cotton crop evapotranspiration based on satellite data*. In: M. Salampasis, A. Matopoulos (eds.): *Proceedings of the International Conference on Information and Communication Technologies for Sustainable Agri-production and Environment (HAICTA 2011)*, Skiathos, 8-11 September, 2011.

- de Sherbinin, A., Levy, M.A., Zell, E., Weber, S. and Jaiteh, M. 2014. *Using satellite data to develop environmental indicators*. Environ. Res. Lett. 9 (2014): 1-12.
- Esty, D.C., Levy, M., Srebotnjak, T. and de Sherbinin, A. 2005. 2005 Environmental Sustainability Index: Benchmarking National Environmental Stewardship (New Haven: Yale Center for Environmental Law and Policy)
- Evans, J.P., McCabe, M.F., Mueller, B., Meng, X. and Ershadi, A. 2011. A comparison of satellite evapotranspiration estimation efforts. WIRADA Science Symposium Proceedings, Melbourne, Australia, 1–5 August 2011.
- Fox, D. G., 1981. Judging air quality model performance: A summary of the AMS Workshop on Dispersion Model Performance. Bull. Am. Meteorol.Soc. 62, 599-609.
- Hargreaves, G.H., and Z.A. Samani., 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. Appl. Eng. in Agr., 1(2):96-99.
- Hsu, A., Emerson, J., Levy, M., de Sherbinin, A., Johnson, L., Malik, O., Schwartz, J. and Jaiteh, M. 2014. The 2014 Environmental Performance Index (New Haven, CT: Yale Center for Environmental Law and Policy)
- Irmak, A., Ratcliffe, I., Ranade, P., Hubbard, K., Singh, R.K., Kamble, B., and Kjaersgaard, J. 2011. Estimation of Land Surface Evapotranspiration with a Satellite Remote Sensing Procedure. Papers in Natural Resources. Paper297.  
<http://digitalcommons.unl.edu/natrespapers/297>
- Moran, E.F. and Brondizio, E. 1994. Integrating Amazonian vegetation, land-use, and satellite data. Bioscience, 44 (5):p329 – 338.
- Pereira L.S., Alain, S., Perrier A. and Allen, R.G. 1999. Evapotranspiration: Concepts and Future Trends. Journal Of Irrigation and Drainage Engineering / March/April 1999 /51.
- Pereira, L.S., Perrier, A., Allen, R.G. and Alves, I. 1996. Evapotranspiration: Review of concepts and future trends. J. Irrig. And Drain. Engrg., ASCE 25.
- Ramos, J.G., Cratchley, C.R., Kay, J.A., Casterad, M.A., Martínez-Cob, A., Domínguez, R. 2009. Evaluation of satellite evapotranspiration estimates using ground-meteorological data available for the Flumen District into the Ebro Valley of N.E. Spain. Agricultural Water Management, 96 (4): 638–652
- Ravenga, C., 2005. Developing indicators of ecosystem condition using geographic information systems and remote sensing Reg. Environ. Change 5 205–14
- Valiantzas, J.D., 2013. Simple ETo Forms of Penman's Equation without Wind and/or Humidity Data. II: Comparisons with Reduced Set-FAO and Other Methodologies. J. Irrig. Drain Eng. 2013.139:9-19.
- Walter, I.A., Allen, R.G., Elliott, R., Itenfisu, D., Brown, P., Jensen, M.E., Mecham, B., Howell, T.A., Snyder, R., Eching, S., Spofford, T., Hattendorf, M., Martin, D., Cuenca, R.H., and Wright, J.L., 2005. The ASCE Standardized Reference Evapotranspiration Equation. Final Report (ASCE-EWRI). Pr. Eds: Allen, R.G., Walter, I.A., Elliott, R., Howell, T., Itenfisu, D. and Jensen, M. Environmental and Water Resources Institute. 2005. Task Committee on Standardization of Reference Evapotranspiration of the Environmental and Water Resources Institute.
- Willmott, C.J. and D.E. Wicks, 1980. An empirical method for the spatial interpolation of monthly precipitation within California. Physical Geography, 1, 59-73
- Willmott, C.J., 1981. On the validation of models. Phys. Geog., 2, 184-194.
- Willmott, C.J., 1982. Some comments on the evaluation of model performance. Bull. Am. Meteorol. Soc. 63: 1309-1313.



## ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΞΗΡΑΣΙΑΣ SPEI ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΛΑΡΙΣΑΣ ΣΤΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ «ΔΑΦΝΗ»

Θ. Καρακώστας✉, Ι. Τεγούλιας, Δ. Μπαμπζέλης

Τομέας Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας, Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ., 54124 Θεσσαλονίκη,

✉ karac@geo.auth.gr

### Περίληψη

Το πρόγραμμα ΔΑΦΝΗ (DAPHNE) πραγματεύεται την καταπολέμηση της ξηρασίας στην περιοχή της Θεσσαλίας εφαρμόζοντας καινοτόμες μεθοδολογίες ενεργητικής παρέμβασης, όπως η τροποποίηση του καιρού. Στο πλαίσιο υλοποίησης του προγράμματος αυτού πραγματοποιήθηκε μελέτη της μετεωρολογικής ξηρασίας στην περιοχή της Θεσσαλίας με τη χρήση του δείκτη ξηρασίας Palmer (PDSI). Στην παρούσα εργασία πραγματοποιείται η εφαρμογή, χρήση και σύγκριση ενός νέου δείκτη ξηρασίας, του Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index (SPEI), με τους δείκτες ξηρασίας PDSI και Standardized Precipitation Index (SPI) στην περιοχή της Λάρισας για την περίοδο 1955-2010. Ο αντικειμενικός σκοπός στην εργασία είναι να εξεταστεί κατά πόσο ο δείκτης SPEI ανταποκρίνεται στην ανίχνευση επεισοδίων ξηρασίας που έχουν εμφανιστεί κατά την εξεταζόμενη περίοδο στην περιοχή, καθώς και η σύγκρισή του με τους ήδη δοκιμασμένους δείκτες PDSI και SPI. Από την ανάλυση και μελέτη προέκυψε ότι μέσου του δείκτη SPEI, ανιχνεύονται και εντοπίζονται τα επεισόδια ξηρασίας που εμφανίστηκαν κατά την εξεταζόμενη περίοδο στο συγκεκριμένο σταθμό, καθώς και ότι ταυτίζονται με εκείνα που αναγνώρισε ο δείκτης SPI, αλλά και ο PDSI. Τα επεισόδια αυτά καθίστανται ευδιάκριτα μεταξύ των δεικτών SPEI και SPI, στις μεγάλες χρονικές κλίμακες, με βήμα υπολογισμού 12 μήνες, τουλάχιστον.

Λέξεις κλειδιά: Ξηρασία, Θεσσαλία, Δείκτες Ξηρασίας, SPEI, PDSI, SPI

## ON THE APPLICABILITY OF THE METEOROLOGICAL DROUGHT INDEX SPEI OVER THE LARISSA AREA IN THE CONTEXT OF THE “DAPHNE” PROGRAM

T. Karacostas✉, I. Tegoulis, D. Bampzelis

Department of Meteorology and Climatology, School of Geology, A.U.Th., 54124 Thessaloniki,

✉ karac@geo.auth.gr

### Abstract

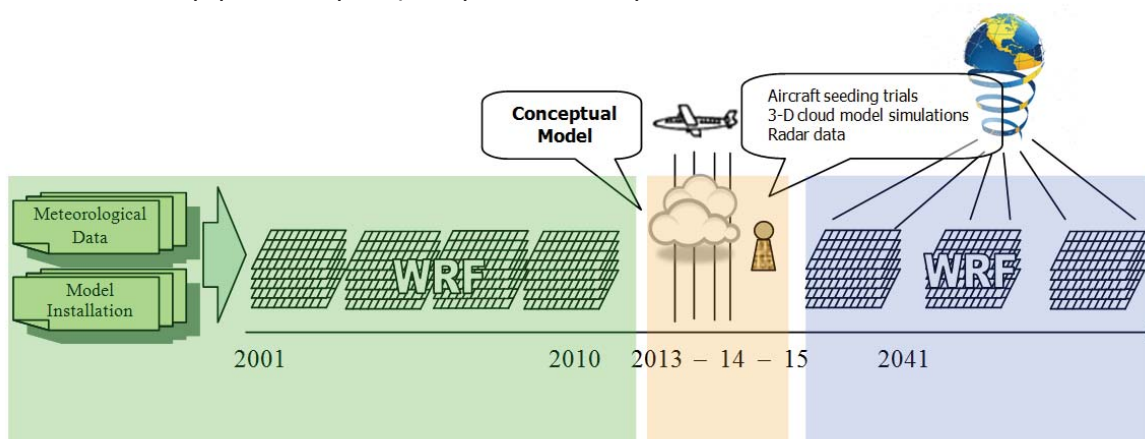
The DAPHNE project aims at mitigating meteorological drought in Thessaly, by means of Weather Modification. For this reason, an investigation of the meteorological drought in Thessaly has been made using Palmer Drought Severity Index (PDSI). In the present study, the newly derived drought index SPEI is adopted, computed and compared against the already known drought indices, PDSI and SPI, in the area of Larissa for the period 1955-2010. The aim on this study is to verify the SPEI capability on measuring drought severity according to its intensity and duration, and to compare the results with PDSI and SPI drought indices. Results indicated that SPEI index successfully identified several drought episodes that affected the area during the period of study. Moreover, these episodes were also recognized from the other two drought indices that were used with minor differences. Drought episodes exhibited identical behavior between SPEI and SPI drought indices especially at long time scales (12-24 months).

**Key words:** Meteorological Drought, Thessaly, Drought Indices, SPEI, PDSI, SPI



## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το πρόγραμμα ΔΑΦΝΗ (DAPHNE) πραγματεύεται την καταπολέμηση της ξηρασίας στην περιοχή της Θεσσαλίας εφαρμόζοντας καινοτόμες μεθοδολογίες ενεργητικής παρέμβασης, όπως η τροποποίηση καιρού (Σχήμα 1). Σκοπός του Προγράμματος είναι η δημιουργία ενός καινοτόμου και ολοκληρωμένου «εννοιολογικού» (conceptual) μοντέλου, μέσω του οποίου δύναται να καθοριστεί με σαφή και τεκμηριωμένο επιστημονικά τρόπο η δυνητικότητα εφαρμογής ενός προγράμματος αύξησης υετού στην περιοχή (Karacostas et al., 2015). Για το λόγο αυτό εφαρμόζεται το αριθμητικό μοντέλο WRF (Weather Research and Forecasting) με το δυναμικό πυρήνα ARW (Advanced Research), το οποίο είναι ένα ευέλικτο, τελευταίας γενιάς σύστημα πρόγνωσης καιρού, το οποίο έχει σχεδιασθεί για να λειτουργεί, τόσο επιχειρησιακά όσο και ερευνητικά, στη συστοιχία υπολογιστών του Τομέα Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας του ΑΠΘ. Είναι κατάλληλο για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, όπως ιδεατές προσομοιώσεις, έρευνα παραμετροποιήσεων, αφομοίωση δεδομένων, κλιματικές εκτιμήσεις και επιχειρησιακή πρόγνωση σε παγκόσμια, περιοχική και τοπική κλίμακα. Επιπρόσθετα, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1, και για την περίοδο 2013-2015, εκπονούνται πτήσεις ειδικά εξοπλισμένων αεροσκαφών για τις επιτόπου παρατηρήσεις των μετεωρολογικών χαρακτηριστικών της ατμόσφαιρας και ιδιαίτερα των νεφικών σχηματισμών στην περιοχή ενδιαφέροντος. Οι παραπάνω μετρήσεις συμπληρώνονται ολοκληρωτικά με τις συνεχείς καταγραφές του μετεωρολογικού ραντάρ στο Λιόπρασο Τρικάλων. Τα μελλοντικά χαρακτηριστικά του καιρού (περίοδος 2041-2055) μελετούνται με τη βοήθεια του αριθμητικού μοντέλου WRF, και συγκρίνονται με την παρελθούσα περίοδο 2001-2010.



**Σχήμα 1.** Σχηματική απεικόνιση του Προγράμματος ΔΑΦΝΗ για την περιοχή της Θεσσαλίας.

Στο πλαίσιο υλοποίησης του Προγράμματος πραγματοποιήθηκε μελέτη της μετεωρολογικής ξηρασίας στην περιοχή της Θεσσαλίας με τη χρήση του δείκτη ξηρασίας του Palmer (Bamzulis et al., 2014). Η ξηρασία αποτελεί ένα ακραίο περιβαλλοντικό φαινόμενο, χωρίς ωστόσο να μπορεί να οριστεί επακριβώς, καθόσον η βασική αιτία της είναι η παρατεταμένη έλλειψη υετού σε μία περιοχή για ένα χρονικό διάστημα. Συνεπώς δεν υφίσταται ένας κοινά αποδεκτός ορισμός των μορφών της ξηρασίας, αλλά αυτός τροποποιείται ανάλογα με την εξεταζόμενη παράμετρο αλλά και το κλίμα της περιοχής στην οποία αναφέρεται (Keyan-tash and Dracup, 2002). Τέσσερις είναι οι κατηγορίες ξηρασίας, όπως έχουν προταθεί από τους Wilhite και Glantz (1985), οι οποίες δεν παρουσιάζονται πάντα χωριστά αλλά μπορεί να συνδυάζονται ή να ακολουθούν η μία την άλλη. Η μετεωρολογική ξηρασία, η οποία θεωρείται μία παρατεταμένη και μη κανονική έλλειψη υετού, έως 60% ή λιγότερο του μέσου ετήσιου υετού για τουλάχιστον δύο συνεχόμενα έτη και σε έκταση μεγαλύτερη του 50% της

εξεταζόμενης περιοχής (WMO, 1986). Η υδρολογική ξηρασία η οποία χαρακτηρίζει μία περίοδο κατά την οποία η παροχή νερού είναι μικρότερη από την ελάχιστη που απαιτείται για την ικανοποίηση των αναγκών μιας περιοχής. Η γεωργική ξηρασία η οποία προσδιορίζεται από τη μη κανονική ανάπτυξη των φυτών εξαιτίας της έλλειψης νερού αλλά και της εδαφικής υγρασίας. Η κοινωνικο-οικονομική ξηρασία στην οποία το έλλειμμα υδατικών πόρων οφείλεται στην υπερκατανάλωση αλλά και στις ανεπαρκείς υποδομές από τον ανθρώπινο παράγοντα.

Το φαινόμενο της ξηρασίας, σε αντίθεση με άλλα ακραία φαινόμενα όπως πλημμύρες, ή καταιγίδες έχει συνήθως μεγάλη χρονική διάρκεια. Ο χρονικός προσδιορισμός της έναρξης, της έντασης, της έκτασης αλλά και της λήξης του φαινομένου έχει αποτελέσει αλλά και αποτελεί ένα σημαντικό πεδίο μελέτης των επιστημόνων. Η επικρατέστερη μέθοδος μελέτης του φαινομένου της ξηρασίας πραγματοποιείται με τη χρήση ποσοτικών δεικτών ξηρασίας. Ανάμεσα σε αυτούς με την μεγαλύτερη εφαρμοσιμότητα παγκοσμίως είναι ο δείκτης ξηρασίας που έχει προταθεί από τον Palmer(1965), Palmer Drought Severity Index (PDSI) και ο Standardized Precipitation Index (SPI) (McKee et al., 1993). Ο PDSI εξετάζει την μετεωρολογική ξηρασία εκτιμώντας το υδατικό ισοζύγιο μιας περιοχής και έχει, με επιτυχία, εφαρμοστεί στην Ελλάδα (Dalezios et al., 1991, Loukas et al., 2000). Ο δείκτης SPI υπολογίζεται χρησιμοποιώντας ως δεδομένα τη βροχόπτωση και εξετάζοντας τη διαφορά της από τη μέση τιμή για μία ορισμένη χρονική περίοδο. Η κανονικοποίηση της παραπάνω διαδικασίας επιτρέπει την αναπαράσταση των υγρότερων και των ξηρότερων ετών με τον ίδιο τρόπο. Ο SPI μπορεί να υπολογιστεί για διάφορες χρονικές περιόδους δίνοντας σε κάθε περίπτωση ανάλογα αποτελέσματα και εκτιμώντας την περίοδο της ξηρασίας. Η Αναγνωστοπούλου (2003), αλλά και οι Livada και Assimakopoulos (2006) έχουν εφαρμόσει με επιτυχία τον δείκτη SPI σε όλη την Ελλάδα αναδεικνύοντας την πολύ καλή προσαρμογή του δείκτη στην Ελληνική περιοχή για διάφορες χρονικές κλίμακες.

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιείται ο υπολογισμός αλλά και η σύγκριση ενός νέου δείκτη ξηρασίας του Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index (SPEI) (Vicente-Serrano et al., 2010) με τους παραπάνω αναφερόμενους δείκτες για την περιοχή της Λάρισας. Ο δείκτης ξηρασίας SPEI έχει τη δυνατότητα απεικόνισης της έντασης, της διάρκειας αλλά και των περιόδων έναρξης και λήξης επεισοδίων ξηρασίας σε πολλές περιοχές με αρκετά διαφορετικά κλιματικά χαρακτηριστικά. Ειδικότερα, παρέχει εύχρηστα και επιστημονικά αποδεκτά αποτελέσματα, ως συνέπεια της απλής και εύχρηστης διαδικασίας υπολογισμού του. Τα βασικότερα πλεονεκτήματα που εμφανίζει είναι η εισαγωγή της δυναμικής εξατμισοδιαπνοής (PET) στους υπολογισμούς αλλά και η δυνατότητα εκτίμησης του δείκτη σε πολλαπλές χρονικές κλίμακες, επιτρέποντας τη μελέτη της ξηρασίας στο πλαίσιο της κλιματικής μεταβολής (Vicente-Serrano et al., 2010).

## 2. ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Στην εργασία, για τον υπολογισμό των δεικτών ξηρασίας, χρησιμοποιούνται μηνιαίες τιμές θερμοκρασίας και βροχόπτωσης από το μετεωρολογικό σταθμό της Λάρισας. Τα δεδομένα καλύπτουν μία περίοδο 55 ετών, από το 1955 έως το 2010, η οποία θεωρείται ικανοποιητική για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων.

Ο υπολογισμός του δείκτη ξηρασίας SPEI είναι αρκετά απλός και βασίζεται στον τρόπο υπολογισμού του SPI, εισάγοντας δηλαδή μηνιαίες ή εβδομαδιαίες τιμές βροχόπτωσης, με τη διαφορά ότι αντί για βροχόπτωση εισάγεται η διαφορά της βροχόπτωσης από την δυναμική εξατμισοδιαπνοή. Η διαδικασία αντιπροσωπεύει την εκτίμηση του υδατικού ισοζυγίου της περιοχής και ο υπολογισμός του σε διαφορετικές χρονικές κλίμακες μας δίνει τον δείκτη

SPEI. Ο υπολογισμός της δυναμικής εξατμισοδιαπνοής μπορεί να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας οποιοδήποτε επιστημονικά αποδεκτή μέθοδο. Στη συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιείται η μέθοδος Thornthwaite (1948).

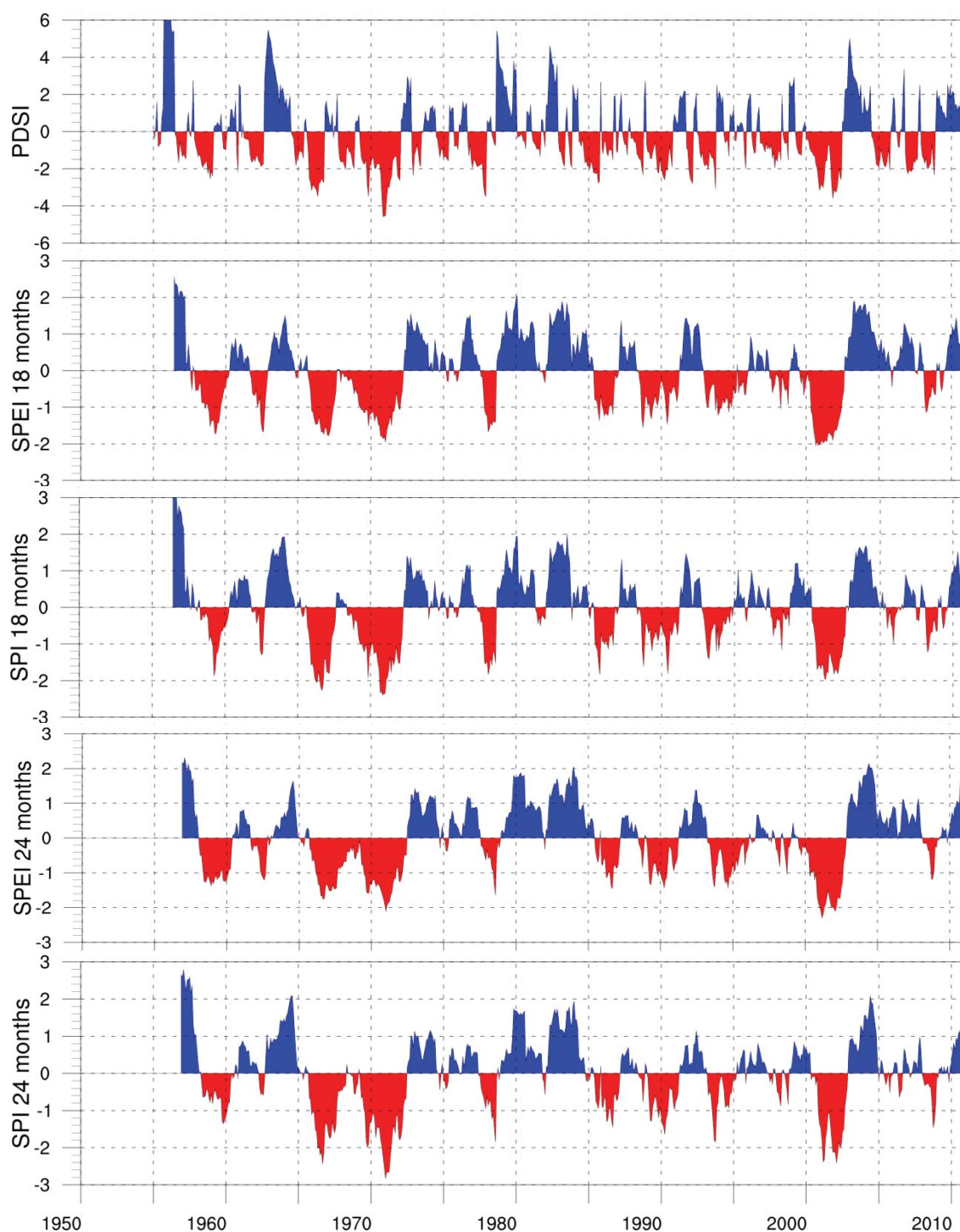
Η ταξινόμηση του δείκτη ακολουθεί αυτή του SPI. Ένα επεισόδιο ξηρασίας εμφανίζεται σε οποιαδήποτε χρονική κλίμακα όταν ο δείκτης παίρνει αρνητική τιμή και γίνεται περισσότερο έντονο όταν ο δείκτης λαμβάνει τιμή μικρότερη ή ίση από -1,5. Το επεισόδιο θεωρείται ότι τελειώνει όταν ο δείκτης λαμβάνει ξανά θετικές τιμές. Η διάρκεια του επεισοδίου καθορίζεται από το διάστημα των αρνητικών τιμών του δείκτη ενώ η έντασή του από τη μέγιστη αρνητική τιμή κατά τη διάρκεια του επεισοδίου. Η κατάταξη των ξηρών και υγρών περιόδων σύμφωνα με τους δείκτες SPEI και SPI απεικονίζεται στον Πίνακα 1.

<b>Πίνακας 1. Κατάταξη των ξηρών και υγρών περιόδων σύμφωνα με το δείκτη SPEI</b>	
<b>Τιμές του δείκτη SPEI</b>	<b>Χαρακτηρισμός περιόδου</b>
> +2.0	Εξαιρετικά υγρή περίοδος (Extremely wet)
1.5 έως 1.99	Πολύ υγρή περίοδος (Very wet)
1.0 έως 1.49	Υγρή περίοδος (Moderate wet)
-0.99 έως 0.99	Κανονική (Near normal)
-1.49 έως -1.0	Μέτρια ξηρασία (Moderate dry)
-1.99 έως -1.5	Σημαντική ξηρασία (Severely dry)
<-2.0	Εξαιρετική ξηρασία (Extremely dry)

Η διαδικασία ποσοτικού υπολογισμού των δεικτών ξηρασίας πραγματοποιείται για την περιοχή της Λάρισας. Πέραν του υπολογισμού του δείκτη PDSI σε μηνιαία βάση υπολογίζονται οι δείκτες SPEI και SPI σε διαφορετικές χρονικές κλίμακες και ειδικότερα για διαστήματα 3, 6, 12, 18 και 24 μηνών. Ο τρόπος υπολογισμού των δεικτών ξηρασίας παραλείπεται καθώς δεν αποτελεί τον σκοπό της παρούσας εργασίας. Περισσότερες πληροφορίες για τη μεθοδολογία υπολογισμού των δεικτών αυτών παρέχονται από τον Palmer (1965) για τον PDSI, από τους McKee et al. (1993) για τον SPI και από τους Vicente-Serrano et al. (2010) για τον SPEI.

### 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Οι τιμές των δεικτών για την περιοχή της Λάρισας εμφανίζονται στο Σχήμα 2 όπου απεικονίζονται οι τιμές του δείκτη PDSI αλλά και των SPEI και SPI για διαφορετικές χρονικές κλίμακες 18 και 24 μηνών. Σύμφωνα με τον δείκτη PDSI, ο οποίος υπολογίζεται σε μηνιαία βάση, εμφανίζονται αρκετά επεισόδια ξηρασίας κατά την περίοδο μελέτης. Τα σημαντικότερα επεισόδια εμφανίστηκαν τις δεκαετίες 1970, 1990 και 2000. Τα επεισόδια αυτά καταγράφονται τόσο από τους δείκτες SPEI και SPI ιδιαίτερα στις μεγάλες χρονικές κλίμακες, (από 12 μήνες και πάνω). Αξιοσημείωτη επίσης είναι η ομοιότητα που εμφανίζεται μεταξύ των δεικτών SPEI και SPI ιδιαίτερα σε μεγάλες χρονικές κλίμακες όπου τα επεισόδια ξηρασίας αναγνωρίζονται και από τους δύο δείκτες και ταυτίζονται για την εξεταζόμενη περιοχή της Λάρισας. Το γεγονός αυτό αποδεικνύει την πολύ καλή προσαρμογή που εμφανίζει ο δείκτης SPEI για το συγκεκριμένο σταθμό συγκρινόμενος με ένα δοκιμασμένο δείκτη όπως είναι ο SPI.

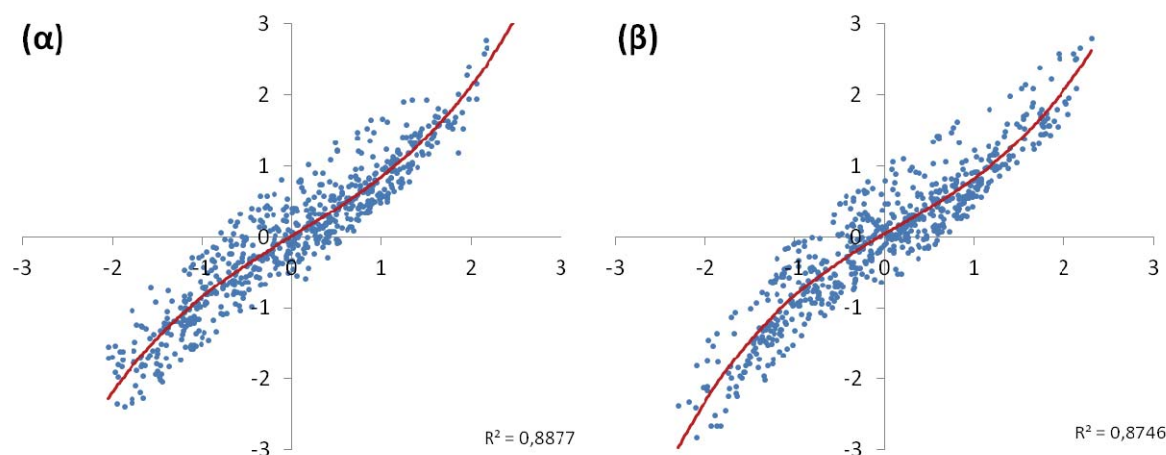


**Σχήμα 2.** Χρονική κατανομή των δεικτών PDSI, και SPEI, SPI για διάρκειες 18 και 24 μήνες κατά την περίοδο 1955 – 2010 για το σταθμό της Λάρισας.

Για τους δείκτες SPEI και SPI είναι χαρακτηριστική η έντονη διακύμανση που εμφανίζεται στον κάθε δείκτη με τη αλλαγή της χρονικής κλίμακας. Για μικρό κατώφλι (3 μήνες) η ξηρασία εμφανίζεται συχνά αλλά με μικρή διάρκεια. Αντίθετα όσο αυξάνεται η χρονική κλίμακα ο δείκτης ανταποκρίνεται πιο αργά έχοντας σαν συνέπεια λιγότερα επεισόδια ξηρασίας αλλά με μεγαλύτερη διάρκεια. Το γεγονός αυτό είναι λογικό καθώς στις μικρές χρονικές κλίμακες ο κάθε μήνας επηρεάζει σημαντικά τον υπολογισμό του δείκτη με αποτέλεσμα τη γρήγορη μετάβασή του από αρνητικές σε θετικές τιμές και αντίστροφα.



Στο Σχήμα 3 απεικονίζεται η συσχέτιση των δεικτών SPEI και SPI με βήμα υπολογισμού αυτό των 18 και 24 μηνών. Ο συντελεστής προσδιορισμού  $R^2$  των δύο δεικτών είναι 0,89 και 0,87 για διάρκειες 18 και 24 μηνών (συσχέτιση με πολυώνυμο 3<sup>ου</sup> βαθμού), ενώ η γραμμική συσχέτιση δίδει τιμές για το  $R^2$  0,88 και 0,86 αντίστοιχα. Όπως προκύπτει από το Σχήμα 3, ελαφρά καλύτερη συσχέτιση μεταξύ των δύο δεικτών εμφανίζει η χρονική διάρκεια των 18 μηνών. Συμπερασματικά, η παρόμοια συμπεριφορά και των δύο δεικτών, όπως απεικονίζεται από την υψηλή τιμή του συντελεστή προσδιορισμού που εμφανίζεται, επιβεβαιώνει την ορθή απεικόνιση των συνθηκών ξηρασίας από τον δείκτη SPEI.



**Σχήμα 3.** Συσχέτιση των δεικτών PDSI και SPI για διάρκειες (α):18 και (β):24 μήνες κατά την περίοδο 1955 – 2010 στο σταθμό της Λάρισας.

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε ο υπολογισμός και η σύγκριση του νέου δείκτη ξηρασίας SPEI, όπως προτάθηκε από τους Vicente-Serrano et al. το 2010, με τους ήδη δοκιμασμένους δείκτες PDSI και SPI για την περιοχή της Λάρισας. Ο υπολογισμός του SPEI δύναται να πραγματοποιηθεί για πολλαπλές χρονικές κλίμακες αναγνωρίζοντας σαφώς τα επεισόδια ξηρασίας που έχουν ήδη εμφανιστεί, σε αντίθεση με τον PDSI ο οποίος παρουσιάζει μηνιαίο χρονικό βήμα. Παράλληλα η εισαγωγή του παράγοντα της θερμοκρασίας, εκφραζόμενος από τη δυναμική εξατμισοδιαπνοή στον τρόπο υπολογισμού του δείκτη SPEI, τον καθιστά πιο ευέλικτο στην αποτύπωση των επιπτώσεων της κλιματικής μεταβολής και της επικείμενης αύξησης της θερμοκρασίας σε σχέση με τον δείκτη SPI.

Από τη σύγκριση των δεικτών προέκυψε ότι ο δείκτης SPEI διακρίνει τα επεισόδια ξηρασίας που εμφανίστηκαν κατά την εξεταζόμενη περίοδο στο συγκεκριμένο σταθμό, τα οποία ταυτίζονται με αυτά που αναγνώρισε ο δείκτης SPI αλλά και ο PDSI. Τα επεισόδια αυτά διακρίνονται ξεκάθαρα στις μεγάλες χρονικές κλίμακες, δηλαδή στον υπολογισμό των δεικτών με διάρκεια 12, 18 και 24 μήνες. Επιπλέον, αντιληπτό γίνεται ότι σε περιόδους όπου η επικρατεί μικρή ενδοετήσια κύμανση της θερμοκρασίας οι δείκτες ανταποκρίνονται κυρίως στην κύμανση που εμφανίζει η βροχόπτωση.

Συνοψίζοντας ο δείκτης SPEI συγκεντρώνει όλα τα πλεονεκτήματα του δείκτη SPI, όπως είναι η εύκολη και απλή διαδικασία προσδιορισμού καθώς και η δυνατότητα υπολογισμού σε διάφορες χρονικές κλίμακες, επιτρέποντας την εκτίμηση τόσο της μετεωρολογικής αλλά και υδρολογικής ξηρασίας. Ταυτόχρονα η εισαγωγή του παράγοντα της θερμοκρασίας τον καθιστά ευαίσθητο σε μεταβολές που οφείλονται στην κλιματική αλλαγή και την επικείμενη αύξηση της θερμοκρασίας παγκοσμίως.



Η χρήση του δείκτη SPEI μελλοντικά θα μπορούσε να επεκταθεί σε περισσότερες περιοχές ώστε να ολοκληρωθεί η εικόνα που εμφανίζει η κατανομή του δείκτη στον Ελληνικό χώρο ενώ παράλληλα θα μπορούσαν τα εξεταστούς διάφορα σενάρια αύξησης της θερμοκρασίας και οι επιπτώσεις που θα έχουν στα επεισόδια ξηρασίας.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Το Πρόγραμμα ΔΑΦΝΗ (DAPHNE) συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση και από Εθνικούς πόρους μέσω της Δράσης «Συνεργασία 2011 – Συμπράξεις Παραγωγικών και Ερευνητικών Φορέων σε Εστιασμένους Ερευνητικούς & Τεχνολογικούς Τομείς» στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Ανταγωνιστικότητα & Επιχειρηματικότητα» και Περιφερειών σε Μετάβαση (ΕΣΠΑ, ΕΠΑΝ 2007-2013).

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Αναγνωστοπούλου, Χ., 2003. *Συμβολή στη μελέτη της ξηρασίας στον ελληνικό χώρο*. Διδακτορική διατριβή. Παράρτημα της Επιστημονικής Επετηρίδας του Τμήματος Γεωλογίας της Σχολής Θετικών Επιστημών του Α.Π.Θ., Αριθμός 74.
- Bampzelis, D., Pytharoulis, I., Tegoulis, I., Zanis, P., and Karacostas, T., 2014. *Rainfall characteristics and drought conditions interconnected to the potentiality and applicability of the "DAPHNE" rain enhancement project in Thessaly*. Presented at the 10<sup>th</sup> International Congress of the Hellenic Geographical Society. 22-24 Oct. 2014, Thessaloniki, Greece.
- Dalezios, R.N., Papazafiriou, G.Z., Papamichail, M.D., and Karacostas, S.T., 1991. *Drought Assessment for the Potential of Precipitation Enhancement in Northern Greece*. Theoretical and Applied Climatology, 44, 75-88.
- Livada, I. and Assimakopoulos, V. D., 2007. *Spatial and temporal analysis of drought in Greece using the Standardized Precipitation Index (SPI)*. Theor. Appl. Climatol. 89, 143–153.
- Karacostas, T., Pytharoulis, I., Tegoulis, I., Bampzelis, D., Kartsios, S., Kotsopoulos, S., Zanis, P., Katragkou, E., Mouskos, P. and Tympanidis, K., 2015. *The Development of the DAPHNE Conceptual Model for the Potentiality of Designing a Precipitation Enhancement Project in Thessaly, Greece*. Presented at the 95<sup>th</sup> American Meteorological Society meeting, 4-9 Jan. 2015, Phoenix, Arizona. U.S.A.
- Keyantash, J. A., and Dracup, J. A., 2002. *The quantification of drought: An evaluation of drought indices*. Bulletin of the American Meteorological Society 83: 1167–1180.
- Loukas, A., Vasiliadis, L. and Dalezios, R.N., 2000. *Hydroclimatic Variability of Regional Droughts in Greece Using the Palmer Moisture Anomaly Index*. Nordic Hydrology, 33, 425-442.
- McKee, T.B., Doesken, N.J. and Kleist, J., 1993. *The relationship of drought frequency and duration to time scale*. Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology. American Meteorological Society, Boston, 179-184.
- Palmer, W.C., 1965. *Meteorological Drought*. US Department of Commerce Weather Bureau Research Paper No. 45.
- Thornthwaite, W.C., 1948. *An approach toward a rational classification of climate*. Geogr. Rev. 38, 55-94.
- Vicente-Serrano, S.M., Santiago Beguería, J. I. and López-Moreno, 2010. *A Multi-scalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index – SPEI*. Journal of Climate, 23, 1696-1718.

- Wilhite, A.D. and Glantz, N.H., 1985. *Understanding the drought phenomenon: The role of definitions*. Water International, 10, 111-120.
- WMO (World Meteorological Organization) 1986. *The Global Climate System, A contribution to the Global Environmental Monitoring System*. CSM R84 /86, Geneva: World Meteorological Organization.

## ΕΠΙΠΕΔΑ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗΣ ΤΩΝ ΠΡΟΒΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ ΤΙΣ ΤΕΛΕΥΤΑΙΕΣ ΔΕΚΑΕΤΙΕΣ

**Δ. Παπαναστασίου<sup>1,✉</sup>, Θ. Μπαρτζάνας<sup>1</sup>, Κ. Κίττας<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Εργ. Γεωργικής Μηχανικής και Περιβάλλοντος, Ινστιτούτο Έρευνας και Τεχνολογίας Θεσσαλίας, Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης, Δημητριάδος 95 & Παύλου Μελά, 3<sup>ος</sup> όροφος, ΤΚ 38333, Βόλος, ✉ dkpapan@ireteth.certh.gr

<sup>2</sup>Εργ. Γεωργικών Κατασκευών και Ελέγχου Περιβάλλοντος, Τμ. Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Παν. Θεσσαλίας, Οδός Φυτόκου, 38446, Ν. Ιωνία Μαγνησίας

### Περίληψη

Η θερμική καταπόνηση επηρεάζει σημαντικά τη φυσιολογία, την ευζωία, την υγεία και την παραγωγικότητα των ζώων. Στο άρθρο αυτό μελετώνται οι συνθήκες θερμικής καταπόνησης στις οποίες εκτέθηκαν τα πρόβατα το καλοκαίρι των τελευταίων 50 ετών σε 4 περιοχές στην Ελλάδα με τη βοήθεια του Δείκτη Θερμοκρασίας Υγρασίας. Εξετάστηκαν, η διακύμανση της μέγιστης ημερήσιας μέγιστης τιμής του δείκτη και η διακύμανση της συχνότητας εμφάνισης των κλάσεων θερμικής καταπόνησης που παρατηρήθηκαν κάθε καλοκαίρι και κάθε καλοκαιρινό μήνα ξεχωριστά. Παρατέθηκαν στατιστικά στοιχεία και προσδιορίστηκαν χρονικές τάσεις. Στην εργασία παρατίθενται χωρικά ποσοτικά αποτελέσματα τα οποία μπορεί να ληφθούν υπόψη κατά τη λήψη μέτρων βελτίωσης των συνθηκών στέγασης των προβάτων, καθώς και μέτρων προσαρμογής και μετριασμού των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής.

*Λέξεις κλειδιά:* Πρόβατα, Θερμική καταπόνηση, Δείκτης Θερμοκρασίας υγρασίας, Τάση

## SHEEP'S HEAT-STRESS LEVELS IN GREECE DURING THE LAST DECADES

**D. Papanastasiou<sup>1,✉</sup>, T. Bartzanas<sup>1</sup>, C. Kittas<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Lab. of Agricultural Engineering and Environment, Institute for Research and Technology of Thessaly, Centre for Research and Technology Hellas, Dimitriadou St 95 & Pavlou Mela St, 3rd floor, PC 38333, Volos, Greece, ✉ dkpapan@ireteth.certh.gr

<sup>2</sup>Lab. of Agricultural Constructions and Environmental Control, Dept. of Agricultural Crop Production and Rural Environment, University of Thessaly, Fytokou Str., PC 38446, N. Ionia, Magnisia, Greece

### Abstract

Heat-stress (HS) affects significantly physiology, welfare, health, and productivity of ruminants. This paper studied the HS conditions to which sheep were potentially exposed during the summer of the last 50 years at 4 sites in Greece by means of the Temperature Humidity Index (THI). The variation of the maximum daily maximum THI value and the variation of the frequency of occurrence of the HS categories observed every summer and every summer month separately were examined. Descriptive statistics were presented and temporal trends were identified. This study provides spatial quantitative results which could be taken into account when proposing measures to improve sheep's housing conditions and adaptation and mitigation measures in the frame of climate change.

*Keywords:* Sheep, Heat-stress, Temperature humidity index, Trend

## 1. INTRODUCTION

Many researchers have found that physiology, welfare, health, and productivity of ruminants are significantly affected when ruminants are exposed to HS conditions (Finocchiario et al, 2005; Panagakis & Chronopoulou, 2010; Sevi et al, 2001; Sevi & Caroprese, 2012; Silanikove, 2000). A combination of high ambient temperatures and high relative humidity is unsuitable for sheep (Papanastasiou et al, 2014; Seedorf et al, 1998; Thwaites, 1985).

The increase in temperature due to climate change may induce various effects on livestock production (Kuczynski et al, 2011). A temperature increase will probably have a direct effect on animals' HS. Segnalini et al (2011) used NCEP Reanalysis data (monthly mean values of temperature and relative humidity) to study the dynamics of THI (i.e. mean values of annual and seasonal THI of three 30-year periods and one decade and THI anomalies for the same periods) over the Mediterranean basin for the period 1951–2007. Their seasonal analysis pointed out an increase of summer THI values. Solymosi et al (2010) found that in Hungary the number of HS days increased by 4.1% per year during the period 1973–2008. However, the last two studies mentioned above underlined that the observed and projected increases, and consequently their impacts, are spatially heterogeneous due to several physical and geographical factors such as the atmospheric circulation, the regimes of climate variables, the latitude, the altitude and the topography, as well as due to the spatial distribution of the livestock population. Consequently, there is a need to perform temporal and spatial monitoring of the HS conditions.

This paper aimed to study the variation and the trend of the HS conditions to which sheep were potentially exposed during the summers of the period 1964 – 2013 in Greece.

## 2. MATERIAL AND METHODS

### 2.1. Estimation of sheep's potential heat-stress

Marai et al. (2007) suggested that an appropriate climatic index to estimate the severity of sheep HS is the THI given in equation 1, where T is the dry-bulb temperature (°C) and RH is the relative humidity (%). The same authors defined four HS categories (Table 1).

$$THI = T - (0.31 - 0.0031 \cdot RH) \cdot (T - 14.4) \quad (1)$$

**Table 1.** Definition of HS categories according to THI values

THI class	HS category
$THI < 22.2$	absence of HS
$22.2 \leq THI < 23.3$	moderate HS
$23.3 \leq THI < 25.6$	severe HS
$THI \geq 25.6$	extreme severe HS

### 2.2. Data

Temperature and relative humidity data recorded every three hours during the summers of the period 1964 – 2013 by four automated ground-based meteorological stations distributed in Greece were used to calculate THI values. The meteorological stations operate by the Hellenic National Meteorological Service (HNMS). The locations of the four meteorological stations are shown in figure 1, while information about them is given in table 2. The analysis in the present paper is based on the daily maximum THI values. Missing values were 1.3%, 7.3%, 0.1% and 0.1% in AGR, ALE, LAR and SOU, respectively.

**Table 2.** Information about the meteorological stations

Name	Abbreviation of the name used in this study	Latitude (oN)	Longitude (oE)	Height (m)
Agrinio	AGR	38.37	21.23	24
Alexandroupoli	ALE	40.51	25.53	2
Larisa	LAR	39.38	22.25	73
Souda	SOU	35.31	24.09	150

**Figure 1.** Location of meteorological stations.

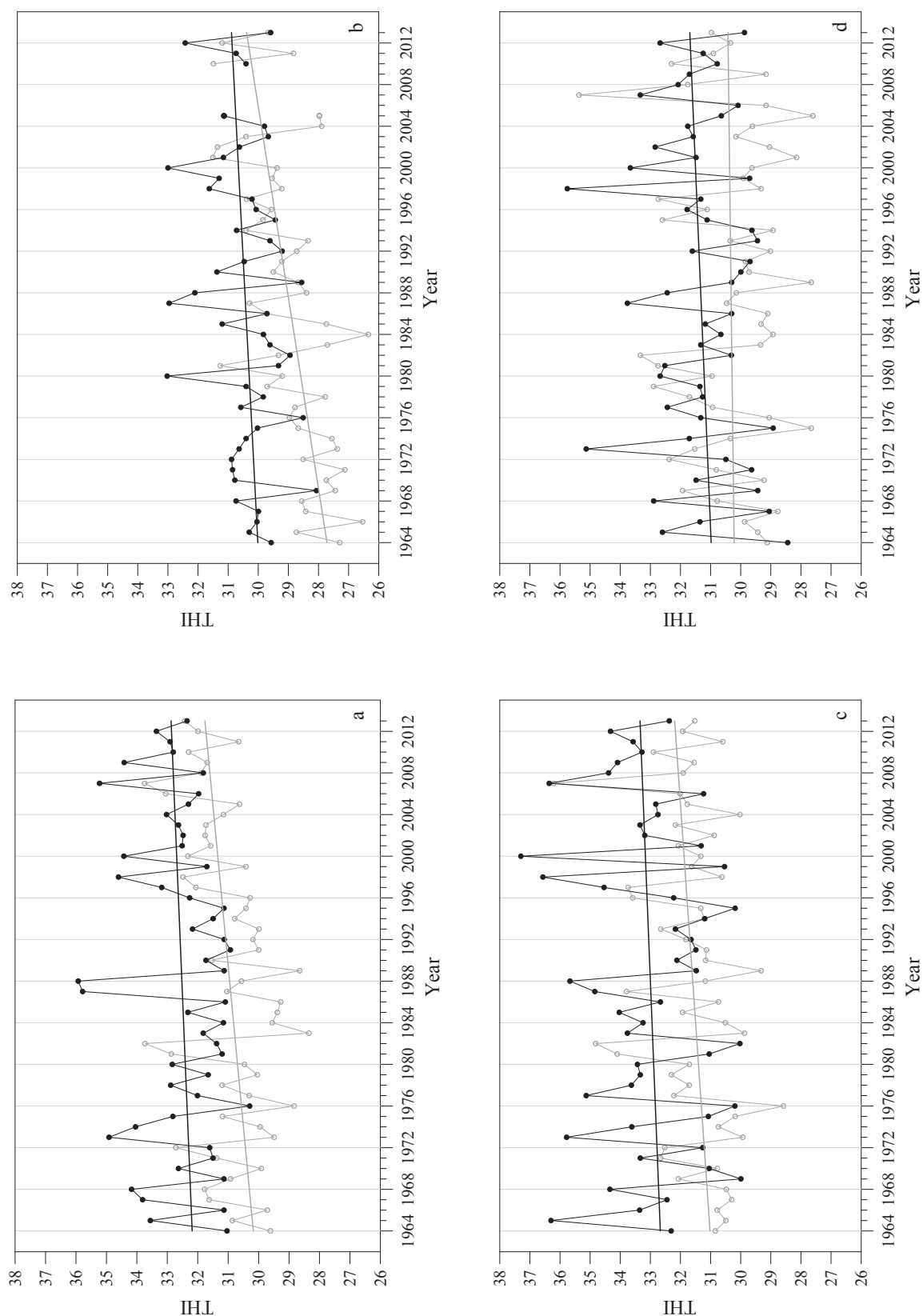
### 3. RESULTS AND DISCUSSION

Figure 2 shows the maximum values of the daily maximum THI values observed during June and July and their corresponding linear trends. Descriptive statistics for the maximum values of the daily maximum THI values and the slopes of the identified trends for every summer month are presented in table 3. The mean values reported in table 3 show that the warmest month was July and the coldest month was June. For this purpose figure 2 refers to these two months. Figure 2 shows that the maximum values of the daily maximum THI values during June and July exhibited an increasing trend. The same also stands for August, not shown in figure 2, except for SOU.

Table 4 shows the frequency of occurrence of every HS category. As the two worse HS categories were observed during the vast majority of the days, the analysis is focused on these two categories. Figures 3 and 4 show the number of days when severe HS and extreme severe HS, respectively, was observed during summer and their corresponding linear trends during the examined period. The number of days when severe HS conditions were established exhibited a decreasing trend (figure 3), while the number of days when extreme severe HS conditions were established exhibited an increasing trend (figure 4).

The trends of the number of days when these two HS conditions were established were further examined on a monthly basis. Figure 5 show the trend of the number of days when severe HS and extreme severe HS was observed during June and July. The corresponding slopes, also for August which is not included in figure 5, are presented in table 5. Decreasing and increasing trends were identified, similarly to figures 3 and 4. In June and July, the number of days when extreme severe HS conditions were established was always higher than the number of days when severe HS conditions were established in AGR and LAR (figure 5a and 5c, respectively). However, figure 5d shows that these two numbers were almost equal in SOU in June in mid 60s. Moreover, figure 5b shows that the days when severe HS conditions were established were higher than the days when extreme severe HS conditions were established in ALE in June until mid 80s.





**Figure 2.** Maximum values of the daily maximum THI values observed during June (grey curved line) and July (black curved line) and corresponding linear trends (straight lines) in AGR (a), ALE (b), LAR (c) and SOU (d).

**Table 3.** Descriptive statistics for the daily maximum THI values observed during every summer month and slopes for the corresponding linear trends.  
Max: maximum; Min: minimum; SD: standard deviation

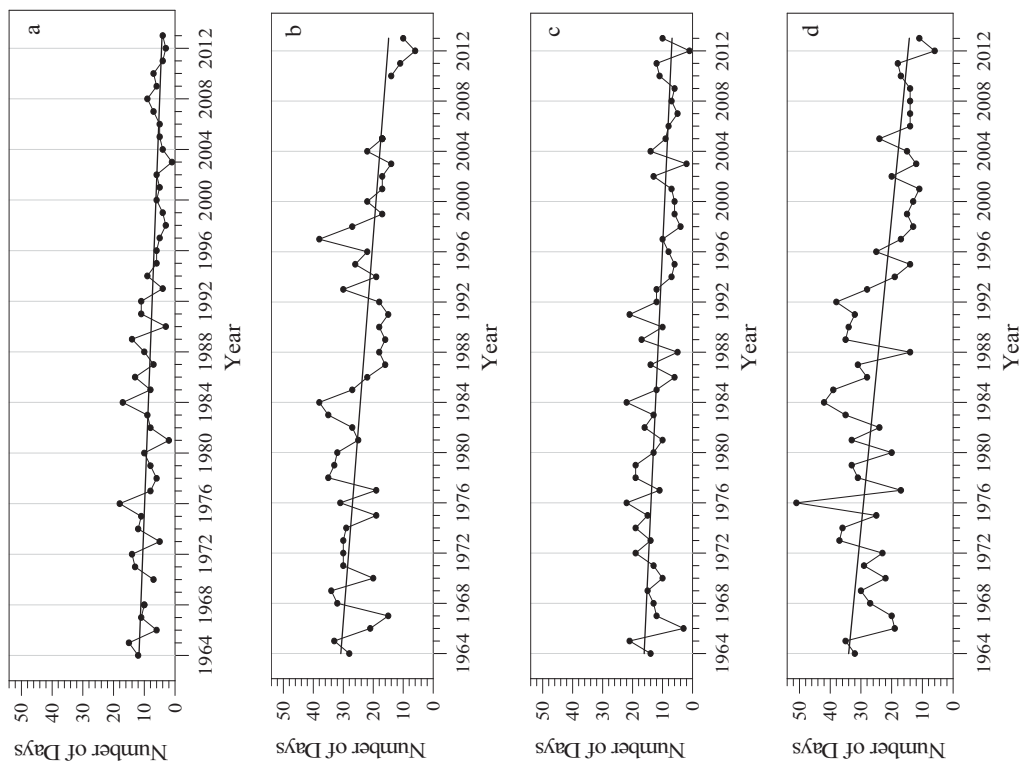
Meteorological Station	Month	Max value	Min value	Mean value	SD	Percentile			Slope
						90 <sup>th</sup>	50 <sup>th</sup>	10 <sup>th</sup>	
AGR	June	33.7	28.3	31.0	1.3	32.5	30.9	29.5	0.032
	July	35.9	30.3	32.5	1.4	34.4	32.3	31.1	0.014
	August	35.2	29.2	32.2	1.3	34.2	31.9	30.9	0.036
ALE	June	31.5	26.3	29.0	1.3	30.8	28.8	27.4	0.054
	July	33.0	28.1	30.4	1.1	31.9	30.4	29.3	0.018
	August	33.5	26.8	30.1	1.5	31.7	30.4	28.2	0.045
LAR	June	36.2	28.6	31.6	1.4	33.6	31.5	30.2	0.024
	July	37.3	30.0	33.0	1.8	35.7	33.2	31.0	0.014
	August	34.9	28.2	31.9	1.4	33.8	31.7	30.0	0.018
SOU	June	35.4	27.6	30.3	1.6	32.6	30.0	28.9	0.004
	July	35.8	28.4	31.3	1.5	32.9	31.3	29.6	0.014
	August	35.2	28.1	30.8	1.6	32.5	30.7	28.9	-0.002

**Table 4.** Frequency of occurrence (%) of every HS category

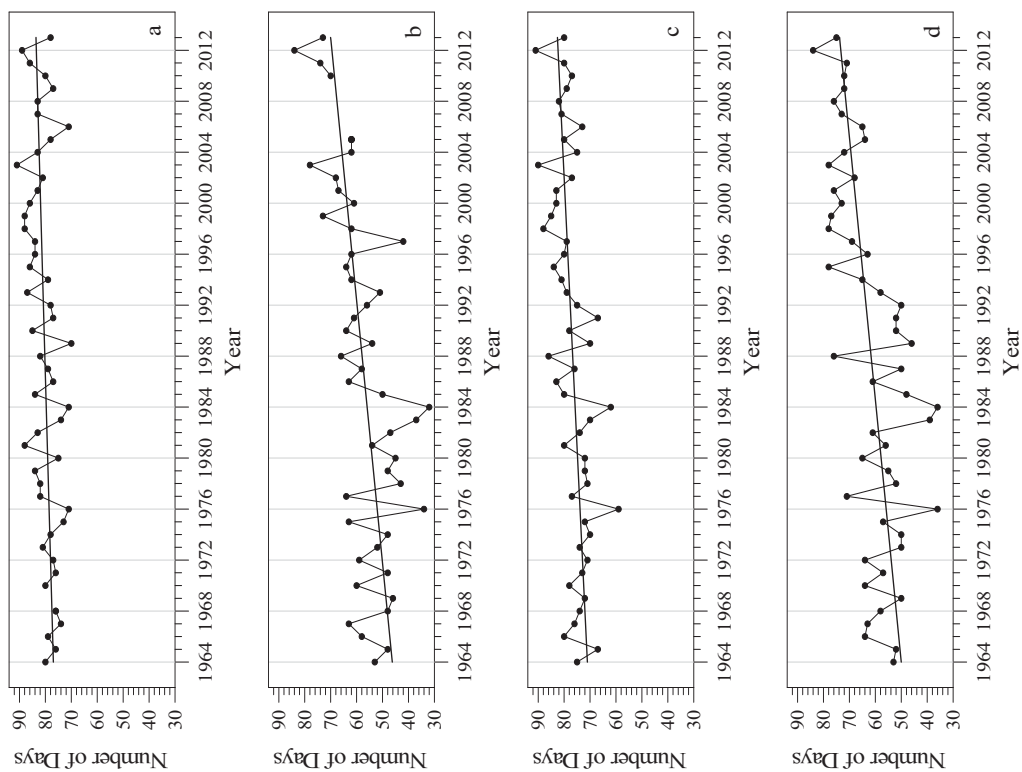
Heat-stress category	Meteorological station			
	AGR	ALE	LAR	SOU
absence of HS	2	6	2	2
moderate HS	1	6	2	4
severe HS	9	25	12	26
extreme severe HS	88	63	84	68

**Table 5.** Slopes of the linear trends of the number of days when severe HS and extreme severe HS was observed during every summer month

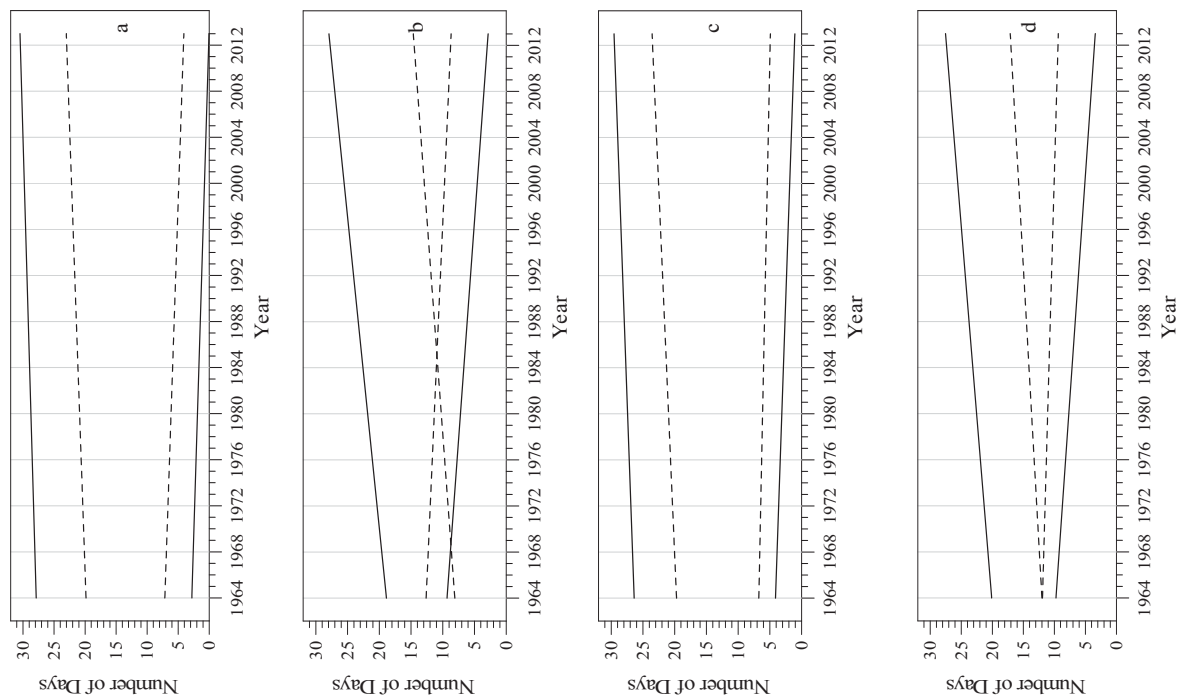
Meteorological station	Month	Severe HS conditions	Extreme severe HS conditions
AGR	June	-0,062	0,065
	July	-0,056	0,053
	August	-0,042	0,029
ALE	June	-0,079	0,132
	July	-0,130	0,182
	August	-0,111	0,165
LAR	June	-0,037	0,079
	July	-0,062	0,065
	August	-0,091	0,092
SOU	June	-0,052	0,104
	July	-0,129	0,152
	August	-0,222	0,229



**Figure 3.** Number of days when severe HS was observed during summer and corresponding linear trend in AGR (a; slope: -0.153), ALE (b; slope: -0.321), LAR (c; slope: -0.190) and SOU (d; slope: -0.403).



**Figure 4.** Number of days when extreme severe HS was observed during summer and corresponding linear trend in AGR (a; slope: 0.137), ALE (b; slope: 0.479), LAR (c; slope: 0.235) and SOU (d; slope: 0.485).



**Figure 5.** Linear trends of number of days when extreme severe (upward lines) and severe (downward lines) HS was observed during June (dashed lines) and July (solid lines) in AGR (a), ALE (b), LAR (c) and SOU (d).

#### 4. CONCLUSIONS

The potential HS of sheep during the summers of the period 1964 – 2013 at four sites in Greece was examined by means of THI. Results showed that sheep experienced HS at least during the 96% of the examined days at the four monitoring sites. The number of days when extreme severe HS conditions were established varied between 63% and 88%, being higher in central mainland and lower to the northeast of the country and to a southern island. The trend analysis revealed that (a) the maximum values of the daily maximum THI values during the three summer months (except during August at one site) and (b) the number of days during the whole summer and during every summer month separately when extreme severe HS conditions were established, exhibited an increasing trend. On the contrary, the number of days during the whole summer and during every summer month separately when severe HS conditions were established, exhibited a decreasing trend.

#### ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank the Hellenic National Meteorological Service for providing the data recorded by the meteorological stations. This work was supported by the projects (a) “EcoSheep”, funded by the national action “Programme to develop Industrial research and Technology (PAVET) 2013” and (b) “Smart Pole for Specialization and Development of Thessaly. Research, Innovation, Strategies”, a project within GSRT’s KRIPIS action, both funded by Greece and EU ERDF under NSRF 2007–2013 Operational Programme “Competitiveness and Entrepreneurship”, GSRT, Ministry of Education and Religious Affairs.

## REFERENCES

- Finocchiaro, R., Van Kaam, J.B.C.H.M., Portolano, B. and Misztal, I., 2005. *Effect of heat stress on production of Mediterranean dairy sheep*. Journal of Dairy Science, 88, 1855-864.
- Kuczynski, T., Blanes-Vidal, V., Li, B.M., Gates, R.S., Nääs, I.A., Moura, D.J., Berckmans, D. and Banhazi, T.M., 2011. *Impact of lobar climate change on the health, welfare and productivity of intensively housed livestock*. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 4, 1-22.
- Marai, I.F.M., El-Darawany, A.A., Fadiel, A. and Abdel-Hafez, M.A.M., 2007. *Physiological traits as affected by heat stress in sheep-A review*. Small Ruminant Research, 71, 1-12.
- Panagakis, P. and Chronopoulou, E., 2010. *Preliminary evaluation of the apparent short term heat-stress of dairy ewes reared under hot summer conditions*. Applied Engineering in Agriculture, 26, 1035-1042.
- Papanastasiou, D.K., Bartzanas, T., Panagakis, P. and Kittas, C., 2014. *Assessment of a typical sheep barn based on potential seasonal heat-stress of dairy ewes*. Applied Engineering in Agriculture, 30, 953-959.
- Seedorf, J., Hartung, J., Schröder, M., Linkert, K.H., Pedersen, S., Takai, H., Johnsen, J.O., Metz, J.H.M., Groot Koerkamp, P.W.G., Uenk, G.H., Phillips, V.R., Holden, M.R., Sneath, R. W., Short, J.L., White, R.P. and Wathes C.M., 1998. *Temperature and moisture conditions in livestock buildings in Northern Europe*. Journal of Agricultural Engineering Research, 70, 49-57.
- Segnalini, M., Nardone, A., Bernabucci, U., Vitali, A., Ronchi, B. and Lacetera, N., 2011. *Dynamics of the temperature-humidity index in the Mediterranean basin*. International Journal of Biometeorology, 55, 253-263.
- Sevi, A., Annicchiarico, G., Albenzio, M., Taibi, L., Muscio, A. and Dell'Aquila, S., 2001. *Effects of solar radiation and feeding time on behavior, immune response and production of lactating ewes under high ambient temperature*. Journal of Dairy Science, 84, 629-640.
- Sevi, A. and Caroprese, M., 2012. *Impact of heat stress on milk production, immunity & udder health in sheep: A critical review*. Small Ruminant Research, 107, 1-7.
- Silanikove, N., 2000. *Effects of heat stress on the welfare of extensively managed domestic ruminants*. Livestock Production Science, 67, 1-18.
- Solymosi, N., Torma, C., Kern, A., Maróti-Agóts, A., Barcza, Z., Könyves, L., Berke, O. and Reiczigel, J., 2010. *Changing climate in Hungary and trends in the annual number of heat stress days*. International Journal of Biometeorology, 54, 423-431.
- Thwaites, C.J., 1985. *Physiological responses and productivity in sheep. Vol. II: Ungulates*. In Stress Physiology in Livestock, ed. Yousef, M.K. ch. 2, 25-38. Boca Raton, FL, USA: CRC Press.